

ISSN 2712-7648

HEALTH, FOOD & BIOTECHNOLOGY

VOLUME 5 • ISSUE 1 • MARCH 2023



HFB
HEALTH, FOOD & BIOTECHNOLOGY



№ 1 – 2023

Периодичность издания – 4 номера в год

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский биотехнологический университет» (РОСБИОТЕХ)

Редакция

Заведующий редакцией	— Тихонова Елена Викторовна
Выпускающий редактор	— Косычева Марина Александровна
Редактор по этике	— Косычева Марина Александровна
Ответственный секретарь	— Лаптева Елена Александровна
Медийный редактор	— Щербакова Екатерина Олеговна

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации средства массовой информации ЭЛ №ФС77-72959 от 25 мая 2018 г.

Адрес:

125080, г. Москва, Волоколамское шоссе, 11
Тел. +7 (499) 750-01-11*6585
E-mail: hfb@mgupp.ru
Официальный сайт учредителя: mgupp.ru
Официальный сайт редакции: hfb-mgupp.com

© ФГБОУ ВО «Российский биотехнологический университет» (РОСБИОТЕХ), 2023.

№ 1 – 2023

Periodicity of publication – 4 issues per year

Founder: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Russian Biotechnological University» (BIOTECH University)

Editorial Team

Head of Editorial Team	— Elena V. Tikhonova
Editor of Issue	— Marina A. Kosycheva
Ethics Editor	— Marina A. Kosycheva
Executive Secretary	— Elena A. Lapteva
Social Media and Product Editor	— Ekaterina O. Shcherbakova

The Journal is registered by the Federal Service for Supervision in the Sphere of Communication, Information Technologies and Mass Media. The Mass Media Registration Certificate EL No FS77-72959 dated May 25, 2018.

Address::

11, Volokolamskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 125080
Tel. +7 (499) 750-01-11*6585
E-mail: hfb@mgupp.ru
Official web site of Founder: mgupp.ru
Official web site of the Editorial Office: hfb-mgupp.com

© FSBEI HE «Russian Biotechnological University» (BIOTECH University) , 2023.

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

■ ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Данильчук Татьяна Николаевна

Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), Россия

■ ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА

Абдуллаева Асият Мухтаровна

Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), Россия

Андреева Татьяна Ивановна

Институт пластмасс им. Г.С. Петрова, Россия

Бычков Алексей Леонидович

Институт химии твёрдого тела и механохимии СО РАН, Россия

Данильчук Татьяна Николаевна

Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), Россия

Джавахян Марина Аркадьевна

Московский государственный медико-стоматологический университет им А.И. Евдокимова, Россия

Жилякова Елена Теодоровна

Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Россия

Игнар Штефан

Варшавский университет естественных наук, Польша

Игнатенко Григорий Анатольевич

Донецкий национальный медицинский университет им. М. Горького, ДНР

Кирш Ирина Анатольевна

Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), Россия

Коврига Владислав Витальевич

ООО «Группа «Полимертепло», Россия

Корокин Михаил Викторович

Белгородский национальный исследовательский университет, Россия

Куркин Денис Владимирович

Московский государственный медико-стоматологический университет им. А. И. Евдокимова, Россия

Маль Галина Сергеевна

Курский государственный медицинский университет, Россия

Налетов Андрей Васильевич

Донецкий национальный медицинский университет им. М. Горького, ДНР

Новиков Олег Олегович

Научно-образовательный ресурсный центр РУДН, Россия

Оковитый Сергей Владимирович

Санкт-Петербургский государственный химико-фармацевтический университет, Россия

Присный Андрей Андреевич

Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Россия

Сагян Ашот Серобович

Национальная Академия наук РА, Республика Армения

Самбандам Ананадан

Национальный институт технологий, Индия

Северинов Константин Викторович

Институт молекулярной генетики НИЦ «Курчатовский институт», Россия

Серба Елена Михайловна

Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи (ВНИИПБТ – филиал ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии»), Россия

Симонов-Емельянов Игорь Дмитриевич

Российский технологический университет МИРЭА, Россия

Фриас Йезус

Дублинский технологический институт, Ирландия

Цыганова Татьяна Борисовна

Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), Россия

Чалых Татьяна Ивановна

Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Россия

Щетинин Михаил Павлович

Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), Россия

EDITORIAL BOARD

EDITOR-IN-CHIEF**Tatyana N. Danilchuk**

Russian Biotechnological University (BIOTECH University)

MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD**Asiyat M. Abdullaeva**

Russian Biotechnological University (BIOTECH University), Russia

Tatyana I. Andreeva

G.S. Petrov Scientific Research Institute of Plastics, Russia

Aleksey L. Bychkov

Institute of Solid-State Chemistry and Mechanochemistry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Russia

Tatyana N. Danilchuk

Russian Biotechnological University (BIOTECH University), Russia

Marina A. Dzhevakhyan

A.I. Yevdokimov Moscow State University of Medicine and Dentistry, Russia

Elena T. Zhilyakova

Belgorod State University, Russia

Jesus Frias

Dublin Institute of Technology, Ireland

Stefan Ignar

Warsaw University of Life and Sciences, Poland

Grigory A. Ignatenko

Donetsk National Medical University, DPR

Irina A. Kirsh

Russian Biotechnological University (BIOTECH University), Russia

Mikhail V. Korokin

Belgorod State University, Russia

Vladislav V. Kovriga

Polymerteplo Group, Russia

Denis V. Kurkin

A.I. Yevdokimov Moscow State University of Medicine and Dentistry, Russia

Galina S. Mal

Kursk State Medical University, Russia

Andrey V. Nalyotov

Donetsk National Medical University, DPR

Oleg O. Novikov

RUDN University Shared Research and Educational Centre, Russia

Sergey V. Okovityi

Saint-Petersburg State Chemical and Pharmaceutical University, Russia

Andrey A. Prisnyi

Belgorod State University, Russia

Ashot S. Saghyan

National Academy of Sciences of the Republic of Armenia, Armenia

Anandan Sambandam

National Institute of Technology of Tiruchirappalli, India

Elena M. SerbaAll-Russian Research Institute of Food Biotechnology, Federal Research **Center for Nutrition**, Biotechnology and Food Safety, Russia**Konstantin V. Severinov**

Institute of Gene Biology Russian Academy of Sciences, Russia

Igor D. Simonov-Emelyanov

MIREA-Russian Technological University, Russia

Mikhail P. Schetinin

Russian Biotechnological University (BIOTECH University), Russia

Tatyana I. Tchalykh

Russian University of Economics named after G. V. Plekhanov, Russia

Tatyana B. Tsyganova

Russian Biotechnological University (BIOTECH University), Russia

РЕДАКТОРСКАЯ СТАТЬЯ

М.А. Косычева
Система CRediT для описания авторского вклада 6

ЗДОРОВЬЕ

А.В. Налетов, А.Н. Мацынин, Р.Ф. Махмутов
Йодная обеспеченность населения: современный взгляд на проблему 10

С.В. Пономаренко
Влияние незаменимых аминокислот на синтез полипротеинов вируса SARS-CoV-2
в патогенезе COVID-19 19

ПИТАНИЕ

Е.Н. Юматов
Концепция легкого рациона питания военнослужащих РФ — ЛРП.
Минимизация массогабаритных показателей 35

БИОТЕХНОЛОГИИ

Л.Ч. Бурак, А.Н. Сапач, М.И. Писарик
Интеллектуальная упаковка для овощей и фруктов, классификация и перспективы использования:
Обзор предметного поля 51

EDITORIAL*Marina A. Kosycheva*

Design Strategies in Research Article Results Section.....	6
--	---

HEALTH*Andrey V. Nalyotov, Alexander N. Matsynin, Ravil F. Makhmutov*

Iodine Security of the Population: A Modern View of the Problem	10
---	----

S.V. Ponomarenko

Influence of Essential Amino Acids on the Synthesis of Polyproteins of the SARS-CoV-2 Virus in the COVID-19 Pathogenesis.....	19
--	----

FOOD*Evgeny N. Yumatov*

The Concept of Light Food Ration for Military Personnel of the Russian Federation or LFR. Minimization of Weight and Size Indicators	35
---	----

BIOTECHNOLOGY*Leonid Ch. Burak , Aleksandr N. Sapach , Maksim I. Pisarik*

Intelligent Packaging For Vegetables And Fruits, Classification And Use Prospects: Scoping Review	51
--	----

<https://doi.org/10.36107/hfb.2023.i5.s169>

Система CRediT для описания авторского вклада

М.А. Косычева

Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ),
Москва, Россия

Корреспонденция:

Косычева Марина Александровна,
Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ),
125080, г. Москва,
Волоколамское шоссе, 11,
E-mail: kosychevama@mgurp.ru

Конфликт интересов:

автор сообщает об отсутствии конфликта интересов.

Поступила: 30.04.2023

Поступила после

рецензирования: 30.04.2023

Принята: 30.04.2023

Copyright: © 2023 Автор

АННОТАЦИЯ

Одним из острых вопросов этики научных публикаций является вопрос авторства. Создание системы описания авторского вклада способствует продвижению принципа прозрачности научных исследований. Система CRediT позволяет объективно оценить роль каждого из авторов, вовлеченных в написание статьи, и исключить нарушения публикационной этики в отношении авторства.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

вклад автора, публикационная этика, CRediT



Для цитирования: Косычева М.А. (2023). Система CRediT для описания авторского вклада. *Health, Food & Biotechnology*, 5(1), 6–9. <https://doi.org/10.36107/hfb.2023.i5.s169>

<https://doi.org/10.36107/hfb.2023.i5.s169>

Design Strategies in Research Article Results Section

Marina A. Kosycheva

Russian Biotechnological University
(BIOTECH University), Moscow, Russia

Correspondence:

Marina A. Kosycheva,
Russian Biotechnological University,
11 Volokolamskoe highway,
Moscow, 125080, Russia
E-mail: kosychevama@mgupp.ru

Declaration of competing interest:
none declared.

Received: 30.04.2023

Received in revised form: 30.04.2023

Accepted: 30.04.2023

Copyright: © 2023 The Author

ABSTRACT

Authorship is considered to be one of the acute issues of publication ethics. The creation of a system for recognizing the author's contribution promotes the principle of transparency of scientific research. CRediT statement allows objectively recognize the role of each of the authors involved in writing the article and exclude violations of publication ethics in relation to authorship.

KEYWORDS

author's contribution, publication ethics, CRediT



To cite: Kosycheva M.A. (2023). CRediT Statement for Recognizing author Contributions. *Health, Food & Biotechnology*, 5(1), 6–9. <https://doi.org/10.36107/hfb.2023.i5.s169>

Вопросы авторства остаются одной из самых острых проблем публикационной этики. Согласно Комитету по публикационной этике (COPE)¹ под автором подразумевается лицо, (1) внесшее значительный вклад в разработку концепции и дизайна работы или анализ и интерпретацию полученных данных; (2) принимающее участие в подготовке проекта статьи или ее качественном пересмотре относительно принципиальных аспектов содержания; (3) утверждающее окончательную версию для печати; (4) давшее согласие нести ответственность за точность и целостность любой части работы.

И хотя не существует строгих правил относительно того, сколько авторов могут участвовать в написании статьи, их количество может быть разным в разных дисциплинах. Так, например, медицинские исследования подразумевают вовлечение в написание статьи целых лабораторий, однако роль каждого из соавторов может вызывать вопросы как у редакторов, так и у рецензентов. Для того, чтобы избежать споров о правомерности

больших авторских коллективов, а также чтобы исключить случаи гостевого² или подарочного³ соавторства, авторам и журналам рекомендуют использовать систему CRediT для описания авторского вклада.

Система CRediT (Contributor Roles Taxonomy)⁴ включает 14 ролей участников, которые призваны обозначить вклад отдельных авторов, сократить споры об авторстве и способствовать научному сотрудничеству. Более того, данная система дает авторам возможность поделиться точным и подробным описанием своего вклада в опубликованную работу. Также эта система позволяет авторам разделить ответственность за публикуемый материал. Следует отметить, что авторы могут участвовать в нескольких ролях, а также дублировать их. Данная система не вступает в противоречие с критериями журнала об авторстве, а лишь облегчает взаимодействие между авторами и редакцией, предлагая авторам при подаче статьи обозначить роль каждого из соавторов. В Таблице 1 представлено описание авторского вклада согласно системе CRediT.

Таблица 1
Описание авторских ролей системы CRediT

Роль	Описание
Концептуализация	Формулирование идеи; формулирование исследовательских целей и задач
Методология	Разработка или проектирование методологии исследования; создание модели исследования
Программное обеспечение	Разработка программного обеспечения; реализация компьютерного кода и вспомогательных алгоритмов; тестирование существующих компонентов кода
Верификация данных	Отслеживание воспроизводимости результатов / экспериментов и других результатов исследований
Формальный анализ	Применение статистических, математических или других формальных методов для анализа или синтеза данных исследования
Проведение исследования	Проведение исследовательского процесса, в частности, проведение экспериментов или сбор данных / доказательств
Ресурсы	Предоставление учебных материалов, реагентов, материалов, пациентов, лабораторных образцов, животных, приборов, вычислительных ресурсов или других инструментов анализа
Администрирование данных	Деятельность по аннотированию (созданию метаданных), аккумулярованию исследовательских данных как для первоначального использования, так и для последующего повторного использования

¹ COPE Discussion Document: Authorship. https://publicationethics.org/sites/default/files/COPE_DD_A4_Authorship_SEPT19_SCREEN_AW.pdf

² «Гостевые авторы» — это те авторы, которые не соответствуют принятым критериям авторства, но внесены в список благодаря их званию, репутации или предполагаемому влиянию, чтобы он выглядел более впечатляющим.

³ «Подарочные авторы» — это те авторы, которые не соответствуют принятым критериям авторства, но внесены в список благодаря личным отношениям в целях взаимного улучшения автобиографии (включение коллег в свои статьи в обмен на включение в авторский список их статей).

⁴ Таксономия ролей участников исследования.

Окончание Таблицы 1

Роль	Описание
Создание черновика рукописи	Подготовка и создание черновика рукописи, в частности написание первоначального текста рукописи
Создание рукописи и её редактирование	Подготовка и создание рукописи, её комментирование или пересмотр, включая этапы до или после публикации рукописи.
Визуализация	Визуализация/представление данных
Руководство исследованием	Надзор и руководство за планированием и выполнением исследовательской деятельности, включая наставничество
Администрирование проекта	Ответственность за управление и координацию планирования и осуществления научно-исследовательской деятельности
Получение финансирования	Получение финансовой поддержки проекта, приведшего к написанию рукописи публикации

Примечание. Адаптировано из Beyond authorship: attribution, contribution, collaboration, and credit, by Brand et al (2015), p.153. Copyright 2015 by Learned Publishing.

Например, вклад авторов может быть описан следующим образом:

Альхатиб К-М.: Верификация данных, проведение исследований, создание черновика рукописи, визуализация.

Данильчук Т.Н.: Концептуализация, методология, создание рукописи и её редактирование, руководство исследованием⁵.

Таким образом представление протокола авторского вклада позволяет авторам декларировать степень вовлеченности в написание рукописи и ее подготовки к публикации, а также соблюдать принципы публикационной этики.

ЛИТЕРАТУРА

Brand, A., Allen, L., Altman, M., Hlava, M., & Scott, J. (2015). Beyond authorship: attribution, contribution, collaboration, and credit. *Learned Publishing*, 28, 151–155. <https://doi.org/10.1087/20150211>

⁵ Альхатиб, К. М., & Данильчук, Т. Н. (2022). Использование протеолитических свойств биомассы молочнокислых микроорганизмов для создания новых продуктов питания. *Health, Food & Biotechnology*, 4(4), 65–77. <https://doi.org/10.36107/hfb.2022.i4.s160>

<https://doi.org/10.36107/hfb.2023.il.s157>

УДК 616-008.64-053.2+546.15

Йодная обеспеченность населения: современный взгляд на проблему

А. В. Налетов, А. Н. Мацынин, Р. Ф. Махмутов

Донецкий национальный медицинский университет имени М. Горького, Донецкая Народная Республика

Корреспонденция:

Налетов Андрей Васильевич

Донецкий национальный медицинский университет имени М. Горького, 83003 Донецкая Народная Республика, г. Донецк, пр. Ильича, 16
E-mail: nalyotov-a@mail.ru

Конфликт интересов:

авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов

Поступила: 27.12.2022

Поступила после

рецензирования: 03.04.2023

Принята: 04.04.2023

Copyright: © 2023 Авторы

АННОТАЦИЯ

Введение. Йод является одним из важнейших микроэлементов, без которого невозможно нормальное функционирование нашего организма, а регулярное поступление с пищей йода имеет большое значение для поддержания здоровья. На сегодняшний день доказано, что йодный дефицит может иметь серьезные последствия для здоровья человека в любом возрасте, но наиболее опасен для беременных, учитывая его влияние на внутриутробное развитие плода и для детей первых лет жизни. В статье представлены современные сведения о распространенности йодного дефицита и йододефицитных заболеваний на территории Российской Федерации.

Цель. На основании изучения результатов ряда клинических исследований определить распространенность йодного дефицита на территории Российской Федерации, современные методы его диагностики и влияние на здоровье человека, а также рассмотреть возможные способы коррекции данного состояния.

Материалы и методы. На основе анализа данных современной научной литературы по вопросу распространенности и современных методов диагностики йодного дефицита, и его влиянию на состояние здоровья человека, были рассмотрены современные методы определения йодной обеспеченности населения и изучены возможные пути профилактики йодного дефицита.

Результаты и их применение. На сегодняшний день трактовка результатов методов оценки йодной обеспеченности населения динамично меняются. Проблема йодного дефицита остается актуальным вопросом для населения нашей страны, несмотря на отсутствие популяционных исследований по данному вопросу. Одной из причин высокой распространенности йодного дефицита в нашей стране является отсутствие массовой его профилактики путем обязательного использования йодированной соли.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

йод, йодный дефицит, йододефицитные заболевания, йодированная соль, йодурия



Для цитирования: Налетов, А. В., Мацынин, А. Н., & Махмутов, Р. Ф. (2022). Йодная обеспеченность населения: современный взгляд на проблему. *Health, Food & Biotechnology*, 5(1), СТРАНИЦЫ. <https://doi.org/10.36107/hfb.2023.il.s157>

<https://doi.org/10.36107/hfb.2023.i1.s157>

Iodine Security of the Population: A Modern View of the Problem

Andrey V. Nalyotov, Alexander N. Matsynin, Ravil F. Makhmutov

M. Gorky Donetsk National Medical University, Donetsk, Donetsk People's Republic

Correspondence:

Andrey V. Nalyotov,

M. Gorky Donetsk National Medical University, 16, Illich av., Donetsk, 283003, Donetsk People's Republic.
E-mail: nalyotov-a@mail.ru

Declaration of competing interest:
none declared.

Received: 27.12.2022

Received in revised form: 03.04.2023

Accepted: 04.04.2023

Copyright: © 2023 The Authors

ABSTRACT

Background. Iodine is one of the most important trace elements, without which the normal functioning of our body is impossible, and regular intake of iodine with food is of great importance for maintaining our health. To date, it has been proven that iodine deficiency can have serious consequences for human health at any age, but it is most dangerous for pregnant women, given its effect on fetal development and for children of the first years of life. The article presents up-to-date information on the prevalence of iodine deficiency and iodine deficiency diseases in the territory of the Russian Federation.

Purpose. Based on the study of the results of a number of clinical studies, this paper is to determine the prevalence of iodine deficiency in the territory of the Russian Federation, modern methods of its diagnosis and impact on human health, as well as to consider possible ways to correct this condition.

Materials and Methods. On the basis of the analysis of the data of modern scientific literature on the prevalence and modern methods of diagnosis of iodine deficiency, and its impact on human health modern methods of determining the iodine security of the population are considered, possible ways to prevent iodine deficiency are studied.

Results. The paper presents up-to-date information on the prevalence of iodine deficiency and iodine deficiency diseases in the Russian Federation. Modern methods of determining the iodine security of the population are considered. The greatest attention is paid to the consideration of the method of mass prevention of iodine deficiency using iodized salt.

KEYWORDS

iodine, iodine deficiency, iodine deficiency diseases, iodized salt, ioduria



To cite: Nalyotov, A. V., Matsynin, A. N., & Makhmutov, R. F. (2023). Iodine security of the population: a modern view of the problem. *Health, Food & Biotechnology*, 5(1), PAGES. <https://doi.org/10.36107/hfb.2023.i1.s157>

На сегодняшний день на основании результатов большого количества клинических и лабораторных исследований установлено, что йод является одним из важнейших микроэлементов, без которого невозможно нормальное функционирование нашего организма, а регулярное поступление с пищей йода имеет большое значение для поддержания нашего здоровья (Bouga et al, 2018). Йод является обязательным структурным компонентом гормонов щитовидной железы (ЩЖ) — тироксина (Т4) и трийодтиронина (Т3), определяющих активность большинства метаболических процессов в нашем организме. Доказано, что для физиологического синтеза и секреции тиреоидных гормонов требуется адекватное поступление данного микроэлемента в организм, а йодный дефицит (ЙД) может иметь серьезные последствия для здоровья человека любого возраста, но наиболее опасен для беременных, учитывая его влияние на внутриутробное развитие плода и для детей первых лет жизни (Медведева и др., 2022).

Недостаточность поступления йода в организм приводит к активации последовательных приспособительных процессов, направленных на поддержание нормального синтеза и секреции гормонов ЩЖ. При длительном дефиците поступления данного микроэлемента происходит срыв механизмов адаптации с последующим развитием йододефицитных заболеваний (ЙДЗ).

В настоящее время активно обсуждается влияние ЙД во время беременности с позиции оценки последствий для здоровья плода и новорожденного. Согласно мнению ученых, ЙД может лежать в основе женского бесплодия, приводить к самопроизвольным абортam, мертворождениям. Доказано, что ЙД может быть триггером гипотироксинемии как в организме беременной, так и у плода (Мохорт и др., 2021). Во время внутриутробного развития гормоны ЩЖ играют важную роль в формировании головного мозга, а недостаточная йодная обеспеченность беременной может вызвать необратимые повреждения мозга плода (Мацынин и др., 2022). По мнению исследователей, среди возможных неблагоприятных последствий ЙД у детей рассматриваются развитие врожденного гипотиреоза, зоба, умственная отсталость (вплоть до кретинизма), нарушение когнитивной функции, отставание в нервно-психическом и физическом развитии (Беспалов & Туманян, 2019; Мацынин и др., 2022; Суплотова и др., 2019). Следует обратить внимание, что в эндемичных районах по ЙД особенно опасны последствия загрязнения радиоактивным йодом, так как усиливается его поглощение ЩЖ, которая в итоге получает более высокую дозу облучения (Беспалов & Туманян, 2019).

Цель работы — на основании изучения результатов ряда клинических исследований определить распространенность йодного дефицита на территории Российской Федерации, современные методы его диагностики и влияние на здоровье человека, а также рассмотреть возможные способы коррекции данного состояния.

Распространенность йодного дефицита в мире и в Российской Федерации

По данным ВОЗ и ЮНИСЕФ, в 2007 г. более 2 млрд людей во всем мире проживали в условиях недостатка йода¹. При этом около миллиарда человек имеют клинические проявления ЙДЗ: у 740 млн человек имеется эндемический зоб, а 43 млн страдают умственной отсталостью вплоть до кретинизма, развившейся в результате ЙД. Ежегодно 1,2 млн детей из-за ЙД рождаются кретинами и умственно отсталыми, физически слабыми, глухонемыми или парализованными. ЙД повышает младенческую смертность. По мнению ученых, общее количество выкидышей и неонатальных смертей из-за тяжелого ЙД на ранних сроках беременности составляет не менее 60 000 случаев в год (Choudhry & Nasrullah, 2018).

Согласно литературным данным, около 50 % населения Европы имеют легкий ЙД (Lazarus, 2014). Самыми эндемичными по данному состоянию регионами принято считать горную местность, территории, где часто выпадают дожди, смыывающие йод с поверхности почвы, а также регионы, расположенные далеко от океана. Уже, исходя из данных сведений, большую территорию Российской Федерации можно рассматривать в качестве эндемичных территорий по ЙД. Следует отметить, что в Российской Федерации не было проведено общенационального исследования обеспеченности населения йодом по стандартной методике, что затрудняет понимание о каких именно дефицитах идет речь. По данным Глобальной сети по йоду², Российская Федерация относится к районам с умеренным ЙД. Считается, что более двух третей территории нашей страны относятся к районам с ЙД. Ежегодно в Российской Федерации рождаются более 200 000 детей с нарушениями функций мозга, вызванного ЙД. За период 2009–2015 гг. установлено увеличение среднего показателя распространенности эндемического зоба, гипотиреоза, тиреоидитов (Трошина и др. 2018). Природный ЙД усугубляется еще и низким потреблением пищевых продуктов, являющихся источниками йода (рыба, морепродукты и водоросли). В ряде исследований установлено, что наиболее выраженный ЙД наблюдается среди жителей предгорных и горных местностей (Северный Кавказ, Урал, Алтай, Дальний

¹ Assessment of iodine deficiency disorders and monitoring their elimination: A guide for programmer managers, 2007. https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/43781/9789241595827_eng.pdf

² Iodine Global Network. <https://www.ign.org/>

Восток), на территориях Верхнего и Среднего Поволжья, Забайкалья, у населения Западной и Восточной Сибири (Алферова и др. 2019).

Основные источники йода

Традиционно считается, что основными природными источниками йода для человека являются продукты растительного и животного происхождения, питьевая вода. По мнению ученых, большая часть природных запасов йода находится в морской воде, куда он был смыт с поверхности почвы дождями, тающими ледниками и снегом. При этом установлено, что значительная часть суши и пресной воды обеднены данным микроэлементом (Vanderpump, 2017). В связи с тем, что содержание йода в питьевой воде является незначительным (менее 2 мкг/л), основным источником его поступления в организм выступает пища. Морская рыба, морепродукты и морские водоросли рассматриваются в качестве основных источников йода (Таблица 1).

Таблица 1

Содержание йода в основных продуктах питания³

Название продукта	Содержание йода в мкг на 100 г съедобной части продукта
Морская капуста	300–400
Печень трески	350–370
Кальмар	300
Сайра	200
Лосось	200
Камбала	190
Хек	150
Минтай	150
Треска	130
Тунец	50
Горбуша	50
Яйцо куриное	20
Свинина	15–20
Молочные продукты	10–15
Овощи, фрукты	5–10
Хлеб	5–6

Морская капуста (ламинария) считается самым богатым продуктом по содержанию микроэлемента (до 1 % от массы сухого вещества). Потребление 100–200 г морепродуктов в день обеспечивает полную физиологическую потребность в йоде. Количество данного микроэлемента в продуктах не морского происхождения незначительное и не обеспечивает потребность в нем. Причем содержание йода в одних и тех же продуктах существенно колеблется, что зависит от концентрации микроэлемента в почве и воде данной местности. Следует иметь в виду, что при тепловой обработке и хранении продукта, концентрация йода в нем значительно уменьшается, что существенно снижает ценность данного продукта и блюд из него приготовленных как источника йода (Zimmermann & Andersson, 2021; Беспалов & Туманян, 2019).

Известно, что в организм йод попадает как в неорганической, так и в органической формах. После приема внутрь он практически полностью всасывается в тонкой кишке, накапливаясь в ЩЖ, которая является основным депо йода, почках, желудке, молочных и слюнных железах. В крови микроэлемент циркулирует как в виде йодида, так и в связанном с белками состоянии. Около 2/3 поступившего в организм йода выводится почками (йод также может быть выведен молочными, слюнными и потовыми железами) (Трошина & Платонова, 2009).

Установлено, что ежедневная потребность в йоде зависит от возраста и физиологического состояния организма (Беспалов & Туманян, 2019). Согласно данным ВОЗ для различных групп населения суточная доза йода отличается. Химический состав пищевых продуктов и культура питания населения Российской Федерации свидетельствуют о невозможности обеспечить рекомендуемые нормы потребления йода с помощью традиционных продуктов (Таблица 2).

Таблица 2

Нормы потребления йода по данным ВОЗ⁴

Возрастной период	Потребность в йоде, мкг/сут.
Дети от рождения до 6 лет	90
Дети 6–12 лет	120
Дети старше 12 лет и взрослые	150
Беременные и кормящие женщины	250

³ Природные источники йода. https://iodomarin.com/prirodnye_istochniki-ioda/

⁴ Assessment of iodine deficiency disorders and monitoring their elimination. A guide for programme managers, Third edition (updated 1st September 2008). <https://www.who.int/publications/m/item/salt-iodization--assessment-of-iodine-deficiency-disorders-and-monitoring-their-elimination>

Известно, что летом 1990 г. ВОЗ поставила перед мировым сообществом задачу ликвидировать ЙДЗ во всем мире⁵. На сегодняшний день контроль потребления йода населением, профилактика ЙД является актуальной медико-социальной задачей. Существует мнение, что все ЙДЗ могут быть предотвращены, тогда как изменения, вызванные нехваткой йода на этапе внутриутробного развития и в раннем детском возрасте, являются необратимыми и практически не поддаются лечению и реабилитации, приводя к инвалидизации пациента.

Методы определения йодной обеспеченности

О степени тяжести ЙД принято судить по уровню экскреции йода с мочой, что адекватно отображает его потребление, учитывая, что 90 % потребленного с пищей йода выводится с мочой. Известно, что уровень йода в моче (йодурия) у конкретного лица меняется в течение дня. В связи с этим данные измерения можно использовать только для оценки обеспеченности йодом популяции в целом при эпидемиологических исследованиях.

ВОЗ определяет ЙД как медиану йодурии < 100 мкг/л для школьников и взрослых и < 150 мкг/л — для беременных. Адекватная обеспеченность йодом рассматривается как медиана йодурии 100–200 мкг/л и 150–250 мкг/л — для беременных. При ЙД легкой степени медиана йодурии составляет 50–99 мкг/сутки, при ЙД средней степени тяжести — 20–49 мкг/сутки, при ЙД тяжелой степени — менее 20 мкг/сутки^{6,7}.

В руководстве ЮНИСЕФ и «Глобальной сети по йоду» по мониторингу программ йодирования соли и оценке статуса йодной обеспеченности населения, опубликованном в 2018 г., отмечается, что учитывая в настоящее время отсутствие доступных методов, позволяющих определить долю населения с избыточным или недостаточным употреблением йода, определена возможность оценки йодного статуса населения по медиане йодурии, а не доле лиц с пониженным, адекватным или избыточным потреблением йода. Также в документе расширен диапазон оптимальной медианы йодурии у школьников до 100–299 мкг/л (избыточный уровень — > 300 мкг/л). При этом нет данных, указывающих на то, что этот расширенный диапазон может быть применен к другим груп-

пам, таким как женщины репродуктивного возраста. Интерпретация значения медианы йодурии ≥ 300 мкг/л как чрезмерного потребления йода остается неизменной⁸ (Guidance on the monitoring of salt iodization programmes and determination of population iodine status, 2018).

В настоящее время во всем мире двумя основными статистическими показателями, необходимыми для оценки статуса йодной обеспеченности, являются величина медианы концентрации йода в моче и доля образцов мочи с уровнем йодурии менее 50 мкг/л. Основным показателем степени напряженности ЙД в популяции является йодурия — уровень экскреции йода с мочой в репрезентативной группе населения, проживающего в конкретном регионе. Репрезентативной группой принято считать детей младшего школьного возраста (6–12 лет), поскольку в данный возрастной период исключается влияние профессии и условий труда, а также гормональных сдвигов и других изменений, характерных для пубертатного периода. После определения уровней экскреции йода в индивидуальных порциях мочи проводится расчет интегрального показателя — медианной концентрации йода в моче, согласно которой определяется уровень йодной обеспеченности всей популяции. При оптимальном йодном обеспечении не более 20% образцов мочи должны иметь уровень йода < 50 мкг/л (Алферова и др., 2019).

Методы профилактики йодного дефицита

Все мероприятия по профилактике ЙДЗ основаны на нормах физиологического потребления йода. На сегодняшний день совместными усилиями мировых экспертов сформирована основная стратегия преодоления ЙД, базирующаяся на трех основных видах йодной профилактики: массовой, индивидуальной и групповой (Мельниченко и др., 2019).

Наиболее эффективной принято считать массовую профилактику путем употребления в пищу йодированной соли и продуктов, содержащих высокие концентрации йода (йодированный хлеб, кисломолочные продукты, адаптированные молочные смеси для детей) (Трошина & Платонова, 2009). Всеобщее йодирование соли рекомендовано ВОЗ в качестве универсального высокоэффективного метода массовой йодной профилактики, согласно которому вся соль для употребления чело-

⁵ Assessment of iodine deficiency disorders and monitoring their elimination. A guide for programme managers, Third edition (updated 1st September 2008). <https://www.who.int/publications/m/item/salt-iodization--assessment-of-iodine-deficiency-disorders-and-monitoring-their-elimination>

⁶ Assessment of iodine deficiency disorders and monitoring their elimination: A guide for programmer manager, 2007). https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/43781/9789241595827_eng.pdf

⁷ Iodine Global Network. <https://www.ign.org/>

⁸ Guidance on the monitoring of salt iodization programmes and determination of population iodine status: Russian language version. Clinical and experimental thyroidology (2018). <https://doi.org/10.14341/ket9734>

веком (т.е. продающаяся в магазинах и используемая в пищевой промышленности) должна быть йодирована (Суплотова и др., 2019).

Для достижения оптимального потребления йода (150 мкг/сутки) ВОЗ и Международный совет по контролю за ЙДЗ рекомендуют добавление в среднем 20–40 мг йода на 1 кг соли. В качестве йодирующей добавки рекомендовано использовать йодат калия.

Согласно нового ГОСТ Р 51574–2018 «Соль пищевая. Общие технические условия» единственным способом обогащения соли йодом станет применение йодата калия вместо распространенного сейчас йодида калия, от использования которого уже отказались в большинстве стран, учитывая его способность быстро улетучиваться (сохраняется только до трех месяцев и исчезает при нагревании до 30°C). В свою очередь, йодат калия может продержаться в составе соли до 12–18 месяцев и выдержать более высокие температуры⁹. Выбор соли в качестве «носителя» йода обусловлен еще и тем, что она используется населением вне зависимости от социальных, религиозных и экономических особенностей.

В то же время следует учитывать возрастающую важность сокращения потребления соли населением для предотвращения целого ряда неинфекционной патологии.

Среднесуточная норма потребления соли составляет 5–10 г и может варьировать в зависимости от возраста, пола, времени года. В отличие от других пищевых продуктов, йод из которых усваивается не полностью (10–50 %), из йодированной соли он усваивается практически полностью (85–90 %). Даже если данное количество йода (150 мкг) будет добавлено к среднесуточному количеству в рационе (40–80 мкг), то это составит лишь 20–25 % от максимального безопасного количества его потребления.

Современные технологии йодирования соли надежные и малозатратные. В то же время установлено, что методы массовой йодной профилактики эффективны, если более 90 % населения используют йодированную соль в домашних условиях. Передозировка йода при правильном йодировании соли практически невозможна. Все перечисленное послужило поводом, чтобы более 120 стран на планете выбрали именно данный метод йодной профилактики в качестве национальной стратегии преодоления ЙД и профилактики ЙДЗ.

В 80-х гг. прошлого столетия профилактика ЙД в СССР перестала проводиться, в результате чего произошло постепенное увеличение распространенности и повышение степени тяжести ЙД среди населения в странах постсоветского пространства. В Российской Федерации использование йодированной соли, как основного метода профилактики ЙДЗ, было введено правительством РФ в 1999 г. Однако в нашей стране использование йодированной соли носит добровольный характер, и только около 30–40% семей используют ее в приготовлении пищи (Zimmermann et al., 2021). Однако по нашему мнению данный показатель значительно меньше.

В 2022 г. Минздравом Российской Федерации разработан законопроект, направленный на борьбу с нехваткой йода. В случае его принятия, добавление йодата калия в соль и другие продукты питания станет обязательным с осени 2023 г.¹⁰

В свою очередь, использование стратегии всеобщего йодирования соли позволило Республике Беларусь стать территорией, свободной от ЙД, и относится к странам, имеющим оптимальную йодную обеспеченность, что признано Международной сетью по йоду (Мохорт и др., 2021). В свою очередь, на этапе внедрения данной национальной стратегии также возникал ряд проблем, обусловленный непониманием населения необходимости достижения адекватного потребления йода с пищевыми продуктами. Высказывалась точка зрения о праве человека в отношении выбора вида использования соли, о невозможности применения йодированной соли при домашнем консервировании. Однако с течением времени, повышение информированности населения, достигнутое посредством активной информационной кампании (листовки, баннеры, социальная реклама по телевидению и радио и т.д.), обеспечила принятие подавляющим большинством населения решения о необходимости использования йодированной соли (Федоренко и др., 2019).

Достаточно важным в профилактике ЙД является контроль, организация которого осуществляется непрерывным мониторингом обеспечения населения йодом. Эффективность йодной профилактики также оценивают по уровню медианы йодурии, использованию йодированной соли и соответствию ее образцов государственным стандартам. Эффективной йодную профилактику считают при показателе медианы йодурии у населения в диапазоне 100–199 мкг/л, а у беременных — 150–249 мкг/л; использование йодированной соли в 90 % домохозяйств и при соответствии 95 % образцов соли государственным стандартам по содержанию йода — ГОСТ

⁹ ГОСТ Р 51574–2018. (2018). *Соль пищевая. Общие технические условия*. Стандартинформ.

¹⁰ Минздрав России разработал законопроект по всеобщему йодированию пищевой соли — Документы Управления Роспотребнадзора — Официальный сайт Роспотребнадзора (rospotrebnadzor.ru). <http://surl.li/gpmre>

Р 51575–2000 «Соль поваренная пищевая йодированная. Методы определения йода и тиосульфата натрия»¹¹ (Суплотова и др., 2019). На сегодняшний день, согласно мнению ученых оценка распространенности зоба не является чувствительным индикатором влияния потребления йодированной соли на население.

Следует помнить, что при хранении йодированной соли необходимо избегать попадания прямых солнечных лучей. Срок годности пищевой соли со дня выработки с добавкой йода — 18 месяцев. По истечении срока годности пищевую соль с профилактическими добавками реализуют как соль без профилактических добавок (ГОСТ Р 51574–2018 «Соль пищевая. Общие технические условия»).

В руководстве ЮНИСЕФ и «Глобальной сети по йоду» по мониторингу программ йодирования соли и оценке статуса йодной обеспеченности населения, опубликованном в 2018 г., указывается на необходимость мониторингирования не только качества и использования йодированной соли в домохозяйствах, но и ее применение в пищевой и хлебобулочной промышленности (Guidance on the monitoring of salt iodization programmes and determination of population iodine status, 2018)¹².

Однако в определенные периоды жизни (дети до 2-х лет, беременные и кормящие женщины) физиологическая потребность в йоде возрастает, и организм нуждается в дополнительном количестве данного микроэлемента. В таких случаях проводится индивидуальная и групповая йодная профилактика, которая осуществляется путем приема фармакологических средств, содержащих физиологическую (стандартизированную) дозу калия йодида. В данных группах населения особенно высока распространенность ЙДЗ, и поэтому прием лекарственных средств, имеющих точную дозу йодида калия, имеет не только профилактическое, но и лечебное значение. Использование фармакологических препаратов йода с конкретным его уровнем позволяет индивидуально подобрать необходимую дозу и контролировать эффективность проводимой профилактики. Для групповой и индивидуальной йодной профилактики принято использовать препараты йодида калия в соответствии

с возрастными нормами. Для региона легкого йодного дефицита рекомендовано использовать: детям раннего возраста — 50–100 мкг/сутки; детям младшего школьного возраста (6–12 лет) — 100 мкг/сутки; подросткам — 200 мкг/сутки; беременным и кормящим женщинам — 250 мкг/сутки.

ВЫВОДЫ

Таким образом, проблема изучения обеспеченности йодом населения нашей страны и дальнейшая профилактика ЙД и развития ЙДЗ являются актуальными вопросами современной медицины, учитывая географическое расположение, особенности питания и отсутствие в Российской Федерации закона о всеобщем использовании йодировании соли. Отсутствие в России государственной стратегии, направленной на ликвидацию ЙД продолжает негативно сказываться на здоровье всего населения страны. Однако на данную проблему обращается мало внимания на государственном уровне. Многие регионы до сих пор находятся в условиях умеренного или тяжелого ЙД. Согласно нашему мнению, актуальным на сегодняшний день, помимо принятия на государственном уровне закона о массовой йодной профилактики с применением обязательного йодирования соли, является проведение популяризации профилактических мероприятий с использованием йодированной соли на примере Республики Беларусь, а также групповой и индивидуальной профилактики с помощью препаратов йодида калия в наиболее уязвимых группах населения, к которым относятся беременные, кормящие женщины и младенцы.

ВКЛАД АВТОРОВ

Налетов А.В.: концептуализация, создание рукописи и ее редактирование, научное руководство исследованием.

Мацынин А.Н.: подготовка черновика рукописи.

Махмутов Р.Ф.: проведение исследования, администрирование данных.

¹¹ ГОСТ Р 51575–2000. (2001). *Соль поваренная пищевая йодированная. Методы определения йода и тиосульфата натрия*. Стандартинформ.

¹² Guidance on the monitoring of salt iodization programmes and determination of population iodine status: Russian language version. Clinical and experimental thyroidology (2018). <https://doi.org/10.14341/ket9734>

ЛИТЕРАТУРА

- Алферова, В. И., Мустафина, С. В., & Рымар, О. Д. (2019). Йодная обеспеченность в России и мире: что мы знаем на 2019 год? *Клиническая и экспериментальная тиреодология*, 15(2), 73–82. <https://doi.org/10.14341/ket10353>
- Беспалов, В. Г., & Туманян, И. А. (2019). Дефицит йода в питании как мультидисциплинарная проблема. *Лечащий врач*, (3), 8–12.
- Мацынин, А. Н., Чурилов, А. В., Налетов, А. В., & Коктышев, И. В. (2022). Клинико-анамнестическая характеристика беременных с йодным дефицитом. *Мать и Дитя в Кузбассе*, (3), 135–139. <https://doi.org/10.24412/2686-7338-2022-3-135-139>
- Медведева, М. С., Ляшенко, А. С., & Ляшенко, Е. Н. (2022). Йодный дефицит как причина гипотиреоза у беременных: диагностика и меры профилактики. *Медицинский совет*, 16(5), 70–77. <https://doi.org/10.21518/2079-701X-2022-16-5-70-77>
- Мельниченко, Г. А., Трошина, Е. А., Платонова, Н. М., Панфилова, Е. А., Рыбакова, А. А., Абдулхабирова, Ф. М., & Бостанова, Ф. А. (2019). Йододефицитные заболевания щитовидной железы в Российской Федерации: современное состояние проблемы. Аналитический обзор публикаций и данных официальной государственной статистики (Росстат). *Consilium Medicum*, 21(4), 14–20. <https://doi.org/10.26442/20751753.2019.4.190337>
- Мохорт, Т. В., Коломиец, Н. Д., Петренко, С. В., Федоренко, Е. В., & Мохорт, Е. Г. (2021). Йодная обеспеченность и йододефицитные заболевания: текущее состояние проблемы в Республике Беларусь. *Вопросы организации и информатизации здравоохранения*, (4), 16–22.
- Суплотова, Л. А., Шаруха, Г. В., Ковальжина, Л. С., & Макарова, О. Б. (2019). Социально-гигиенический мониторинг в реализации региональной стратегии профилактики йодного дефицита. *Гигиена и санитария*, 98(2), 225–230. <http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-2-225-230>
- Трошина, Е. А. & Платонова, Н. М. (2009). Метаболизм йода и профилактика йододефицитных заболеваний у детей и подростков. *Вопросы современной педиатрии*, 7 (3), 66–75.
- Трошина, Е. А., Платонова, Н. М., & Панфилов, К. О. (2018). Аналитический обзор результатов мониторинга основных эндемических характеристик йододефицитных заболеваний у населения РФ за период 2009–2015 гг. *Проблемы эндокринологии*, 64(1), 21–37. <https://doi.org/10.14341/probl9308>
- Федоренко, Е. В., Мохорт, Е. Г., Коломиец, Н. Д., Мохорт, Т. В. & Петренко, С. В. (2019). Йодная обеспеченность населения в Республике Беларусь : оценка потребления йода с солью и основными пищевыми продуктами. *Пищевая промышленность: наука и технология*, 12 (3) 45, 81–84.
- Bouga, M., Lean, M. E. J., & Combet, E. (2018). Contemporary challenges to iodine status and nutrition: the role of foods, dietary recommendations, fortification and supplementation. *Proceedings of the Nutrition Society*, 77(3), 302–313. <https://doi.org/10.1017/S0029665118000137>
- Choudhry, H., & Nasrullah, M. (2018). Iodine consumption and cognitive performance: Confirmation of adequate consumption. *Food Science & Nutrition*, 6(6), 1341–1351. <https://doi.org/10.1008/fsn.3.694>
- Lazarus, J. H. (2014). Iodine status in Europe in 2014. *European Thyroid Journal*, 3(3), 3–6. <https://doi.org/10.1159/000358873>
- Vanderpump, M. P. (2017). Epidemiology of iodine deficiency. *Minerva Medica*, 108(2), 116–123. <https://doi.org/10.23736/S0026-4806.16.04918-1>
- Zimmermann, M. B. & Andersson, M. (2021). Global perspectives in endocrinology: coverage of iodized salt programs and iodine status in 2020. *European Journal of Endocrinology*, 185(1), R13–R21. <https://doi.org/10.1530/EJE-21-0171>

REFERENCES

- Alferova, V. I., Mustafina, S. V., & Ryamar, O. D. (2019). Iodnaya obespechennost' v Rossii i mire: chto my znaem na 2019 god [Iodine security in Russia and the world: what we know for 2019]. *Klinicheskaya i eksperimental'naya tireodologiya* [Clinical and Experimental Thyroidology], 15(2), 73–82. <https://doi.org/10.14341/ket10353>
- Bespalov, V. G., & Tumanyan, I. A. (2019). Defitsit ioda v pitanii kak mul'tidistsiplinarnaya problema [Iodine deficiency in nutrition as a multidisciplinary problem]. *Lechashchii vrach* [Attending Physician], (3), 8–12.
- Matsynin, A. N., Churilov, A. V., Naleto, A. V., & Koktyshev, I. V. (2022). Kliniko-anamnesticheskaya kharakteristika beremennykh s iodnym defitsitom [Clinical and anamnestic characteristics of pregnant women with iodine deficiency]. *Mat' i Ditya v Kuzbasse* [Mother and Child in Kuzbass], (3), 135–139. <https://doi.org/10.24412/2686-7338-2022-3-135-139>
- Medvedeva M.S., Ljashenko A.S., & Ljashenko E.N. (2022). Jodnyj deficit kak prichina gipotireoza u beremennyh: diagnostika i mery profilaktiki [Iodine deficiency as a

- cause of hypothyroidism in pregnant women: diagnosis and preventive measures. *Medical Advice*. *Medicinskij sovet* [Medical Advice], 16(5), 70–77. <https://doi.org/10.21518/2079-701X-2022-16-5-70-77>
- Mel'nichenko, G. A., Troshina, E. A., Platonova, N. M., Panfilova, E. A., Rybakova, A. A., Abdulhabirova, F. M., & Bostanova, F. A. (2019). Jododeficitnye zabolevaniya shhitovidnoj zhelezy v Rossijskoj Federacii: sovremennoe sostojanie problemy. *Analiticheskij obzor publikacij i dannyh oficial'noj gosudarstvennoj statistiki (Rosstat)* [Iodine deficiency diseases of the thyroid gland in the Russian Federation: the current state of the problem. Analytical review of publications and data of official state statistics (Rosstat)]. *Consilium Medicum*, 21 (4), 14–20. <https://doi.org/10.26442/20751753.2019.4.190337>
- Mokhort, T. V., Kolomiets, N. D., Petrenko, S. V., Fedorenko, E. V., & Mokhort, E. G. (2021). Iodnaya obespechennost' i ioddefitsitnye zabolevaniya: tekushchee sostojanie problemy v Respublike Belarus' [Iodine security and iodine deficiency diseases: the current state of the problem in the Republic of Belarus]. *Voprosy organizatsii i informatizatsii zdavookhraneniya* [Issues of Organization and Informatization of Healthcare], (4), 16–22.
- Suplotova, L. A., Sharukho, G. V., Koval'zhina, L. S., & Makarova, O. B. (2019). Sotsial'no-gigienicheskii monitoring v realizatsii regional'noi strategii profilaktiki iodnogo defitsita [Social and hygienic monitoring in the implementation of the regional strategy for the prevention of iodine deficiency]. *Gigiena i sanitariya* [Hygiene and Sanitation], 98(2), 225–230. <http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-2-225-230>
- Troshina, E. A. & Platonova, N. M. (2009) Metabolizm joda i profilaktika jododeficitnyh zabolevanij u detej i podrostkov [Iodine metabolism and prevention of iodine deficiency diseases in children and adolescents]. *Voprosy sovremennoj pediatrii* [Issues of modern pediatrics], 7 (3), 66–75.
- Troshina, E. A., Platonova, N. M., & Panfilov, K. O. (2018). Analiticheskij obzor rezul'tatov monitoringa osnovnykh endemicheskikh kharakteristik ioddefitsitnykh zabolevanij u naseleniya RF za period 2009–2015 gg [Analytical review of the results of monitoring the main endemic characteristics of iodine deficiency diseases in the population of the Russian Federation for the period 2009–2015]. *Problemy endokrinologii* [Problems of Endocrinology], 64(1), 21–37. <https://doi.org/10.14341/probl9308>
- Fedorenko, E. V., Mohort, E. G., Kolomiec, N. D., Mohort, T. V. & Petrenko, S. V. (2019) Jodnaja obespechennost' naselenija v Respublike Belarus' : ocenka potreblenija joda s sol'ju i osnovnymi pishhevymi produktami [Iodine security of the population in the Republic of Belarus : assessment of iodine consumption with salt and basic foodstuffs]. *Pishhevaja promyshlennost': nauka i tehnologija* [Food industry: Science and Technology], 12 (3) 45, 81–84.
- Bouga, M., Lean, M. E. J., & Combet, E. (2018). Contemporary challenges to iodine status and nutrition: the role of foods, dietary recommendations, fortification and supplementation. *Proceedings of the Nutrition Society*, 77(3), 302–313. <https://doi.org/10.1017/S0029665118000137>
- Choudhry, H., & Nasrullah, M. (2018). Iodine consumption and cognitive performance: Confirmation of adequate consumption. *Food Science & Nutrition*, 6(6), 1341–1351. <https://doi.org/10.1008/fsn.3.694>
- Lazarus, J. H. (2014). Iodine status in Europe in 2014. *European Thyroid Journal*, 3(3), 3–6. <https://doi.org/10.1159/000358873>
- Vanderpump, M. P. (2017). Epidemiology of iodine deficiency. *Minerva Medica*, 108(2), 116–123. <https://doi.org/10.23736/S0026-4806.16.04918-1>
- Zimmermann, M. B. & Andersson, M. (2021). Global perspectives in endocrinology: coverage of iodized salt programs and iodine status in 2020. *European Journal of Endocrinology*, 185(1), R13-R21. <https://doi.org/10.1530/EJE-21-0171>

<https://doi.org/10.36107/hfb.2023.i1.s162>

Influence of Essential Amino Acids on the Synthesis of Polyproteins of the SARS-CoV-2 Virus in the COVID-19 Pathogenesis

Sophia V. Ponomarenko

Sophigen inGr, Bönen, Germany

Correspondence:

Sophia V. Ponomarenko
Sophigen inGr, 42, Siemensstraße,
Bönen, 59199, Germany
E-mail: sp@sophigen.com

Declaration of competing interest:
none declared

Received: 15.02.2023

Received in revised form: 09.03.2023

Accepted: 10.03.2023

Copyright: © 2023 The Author

ABSTRACT

Introduction. Diet is a critical factor in the development of viral pathogenesis. Previously it was shown that a high intake of proteins correlated directly with dangerous outcomes of SARS-CoV-2 infection. It is necessary to analyze the biochemistry of the metabolic relations of the host and pathogen to explain the contribution of proteins in the development of COVID-19.

Purpose. Identify a risk factor influencing the development of the COVID-19 disease. Compare the amino acid composition of animal and plant proteins with non-structural polyproteins of the SARS-CoV-2 virus. Analyze the impact of dietary essential amino acids (EAAs) in the COVID-19 infectious disease.

Materials and Methods. The scientific data and information needed for this analysis were found in publications and media available on the Internet, as well as taken from statistical databases. Statistical samples were formed from sources and facts available on the Internet. Amino acid sequences of proteins were obtained from databases (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>, <https://www.uniprot.org/uniprot/>).

Results and Discussion. Analysis of statistical data and assessment of nutritional factors during the development of the 22-month pandemic in 20 countries indicated that the outcomes of COVID-19 disease were worsened by excessive consumption of animal proteins. The numbers of reported cases of SARS-CoV-2 virus (RPr) infection and deaths (IFR) from the COVID-19 disease per one thousand inhabitants were significantly lower in regions that predominantly consumed plant-based foods with minimal EAAs. A positive relationship was found between the pathogenicity of SARS-CoV-2 and the amount of animal protein ingested, with correlation coefficients $r = 0.83$ for RPr and $r = 0.61$ for IFR. Human Coronaviruses are composed of higher proportion of EAAs than cellular organisms. Edible plant proteins contain 2-3 times less leucine, lysine, and especially threonine and valine (LKTv) than SARS-CoV-2 polypeptides. Optimal synthesis of the SARS-CoV-2 virus Pp1a and Pp1ab polyproteins requires a rapidly large amount of these four EAAs.

Conclusions. A deficiency of EAAs, especially free valine, and threonine, could suppress the early translation of SARS-CoV-2 nonstructural polyproteins. It was concluded that a diet low in EAAs and especially LKTv may prevent rapid, highly productive viral replication and pathogenic development of COVID-19.

KEYWORDS

animal proteins; coronavirus SARS-CoV-2; COVID-19; diet; essential amino acids; infection; pandemic; pathogenesis; polyprotein; protein synthesis; risk factor



To cite: Ponomarenko, S. V. (2023). Influence of essential amino acids on the synthesis of polyproteins of the SARS-CoV-2 virus in the COVID-19 pathogenesis *Health, Food & Biotechnology*, 5(1), PAGES. <https://doi.org/10.36107/hfb.2023.i1.s162>

<https://doi.org/10.36107/hfb.2023.il.s162>

Влияние незаменимых аминокислот на синтез полипротеинов вируса SARS-CoV-2 в патогенезе COVID-19

С. В. Пономаренко

Sophigen inGr, Бёнен, ФРГ

Корреспонденция:

Пономаренко Софья Васильевна,
Sophigen inGr, 59199, г. Бёнен,
Сименсштрассе, д. 42
E-mail: sp@sophigen.com

Конфликт интересов:

автор заявляет об отсутствии
конфликта интересов.

Поступила: 15.02.2023

Поступила после

рецензирования: 09.03.2023

Принята: 10.03.2023

Copyright: © 2023 Автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Диета является решающим фактором в развитии вирусного патогенеза. Предварительно было показано, что высокое потребление животных белков напрямую коррелирует с опасными исходами инфекции SARS-CoV-2. Анализ биохимии метаболических отношений хозяина и возбудителя необходим для выяснения роли животных белков в развитии COVID-19.

Цель. Выявить диетический фактор, влияющий критически на развитие заболевания COVID-19. Сравнить аминокислотный состав животных и растительных белков с неструктурными полипротеинами вируса SARS-CoV-2. Проанализировать влияние незаменимых аминокислот (ЕАА) на развитие инфекционного заболевания COVID-19.

Материалы и методы. Данные и информация, необходимые для этого анализа, были найдены в публикациях и СМИ, доступных в Интернете, а также взяты из статистических баз данных. Статистические выборки формировались из источников и фактов, доступных в Интернете. Аминокислотные последовательности белков были получены из баз данных (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>, <https://www.uniprot.org/uniprot/>).

Результаты и обсуждение. Анализ статистических данных и оценка факторов питания в период развития 22-месячной пандемии в 20 странах, с наибольшим числом инфицированных пациентов, показали, что исход заболевания COVID-19 усугублялся избыточным потреблением белков животного происхождения. Количество зарегистрированных случаев заражения вирусом SARS-CoV-2 (RPr) и смертности (IFR) от болезни COVID-19 на тысячу жителей было значительно ниже в регионах, где потреблялась преимущественно растительная пища с минимальным содержанием ЕАА. Выявлена положительная связь между патогенностью SARS-CoV-2 и количеством поступающих в организм животных белков с коэффициентами корреляции $r = 0,83$ для RPr и $r = 0,61$ для IFR. Коронавирусы человека содержат гораздо больше ЕАА, чем клеточные организмы. Съедобные растительные белки содержат в 2-3 раза меньше лейцина, лизина и особенно треонина и валина (LKTV), чем полипептиды SARS-CoV-2. Для оптимального синтеза полипротеинов Pp1a и Pp1ab вируса SARS-CoV-2 требуется своевременное поступление большого количества этих четырех ЕАА.

Выводы. Дефицит ЕАА, особенно свободного валина и треонина, может подавлять раннюю трансляцию белков Pp1a и Pp1ab вируса SARS-CoV-2. Предполагается, что диета с низким содержанием ЕАА и особенно LKTV может предотвратить быструю, высокопродуктивную репликацию вируса и патогенное развитие COVID-19.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

животные белки; коронавирус SARS-CoV-2; COVID-19; диета; незаменимые аминокислоты; инфекционное заболевание; пандемия; патогенез; полипротеин; синтез белка; фактор риска



Для цитирования: Пономаренко, С. В. (2023). Влияние незаменимых аминокислот на синтез полипротеинов вируса SARS-CoV-2 в патогенезе COVID-19. *Health, Food & Biotechnology*, 5(1), СТРАНИЦЫ. <https://doi.org/10.36107/hfb.2023.il.s162>

ABBREVIATIONS: AAs — Amino Acids, ACE2 — membrane bound Angiotensin-Converting Enzyme 2, BCAA — Branched-Chain Amino Acid, β CoV- Betacoronavirus, EAAs — Essential Amino Acids, FAAs — Free Amino acids, gRNA — genomic RNA, HCoV — Human Coronaviruses, IFR — Infection Fatality Rate, Km — Michaelis-Menten coefficient, LAAs — Limited Amino Acids, LKTV — Leucine+Lysine+Threonine+Valine, NTP — nucleoside triphosphate, Pp1a and Pp1ab — Polyproteins, PT2 — Pneumocytes Type 2, rER — rough Endoplasmic Reticulum, RPr — Rate of Prevalence, SARS — Severe Acute Respiratory Syndrome, cSME — Spike, Membrane and Envelope proteins-lipid complex, WHO — World Health Organization.

INTRODUCTION

Coronavirus SARS-CoV-2 was discovered three years ago, and the COVID-19 pandemic caused by it hindered almost all aspects of human activity¹(CDC, 2022). Unfortunately, there is no etiotropic or highly effective drug blocking the replication cycle of the SARS-CoV-2 virus yet, and a radical decrease in infection dynamics has not been observed globally (Worldometers, 2022; Mei & Tan, 2021; Yapasert et al., 2021). Humanity will fight the SARS-CoV-2 virus infection and the consequences of the pandemic for another year or more in various ways. Numerous studies have shown that social isolation, sanitary measures, and vaccination help fight the virus. Comorbidities, advanced age, obesity, or severe malnutrition are risk factors for the severity of COVID-19² (CDC, 2022).

The importance of nutrition in the outcome of SARS-CoV-2 infections has been explored in dozens of research programs across countries and populations. Numerous studies on the effect of diet on COVID-19 outcomes have been published, which allowed data to be processed and analyzed in systematic reviews (Allard et al., 2020; Bedock et al., 2021; Clemente-Suarez et al., 2021; James et al., 2021; Mentella et al., 2021; Mechanick et al., 2021; Morais et al., 2021; Mortaz et al., 2021). Diet type has also been shown to be the critical socioeconomic factor for the virus's pathogenic development. It was demonstrated that the consumption of excess fat, sugar, and protein linearly correlated with the severity of COVID-19 disease and mortality (Ponomarenko, 2022; Ponomarenko, 2023). It has been shown that adequate consumption of total and plant proteins correlated with a low incidence of negative manifestations of the pathogenesis of the SARS-CoV-2 virus (Ponomarenko, 2022; Kim et al., 2021). Excessive consumption of animal proteins is a serious factor in many health problems (Wu, 2016) and a risk of severe development of SARS-CoV-2 as well (Ponomarenko, 2022).

Optimal interaction with its host is fundamental for a successful viral replication cycle. The development of COVID-19 infection depends on the level of biochemical interactions between the virus and the host. The pathogen has been

shown to destabilize proteostasis and amino acid homeostasis (Aller et al., 2018; Bojkova et al., 2020; Delattre et al., 2020; Mussap & Fanos, 2021; Paez-Franco et al., 2021; Wu et al., 2021). Viruses use intracellular mechanisms and building resources for productive replication. If the body is not able to supply sufficient nutrients to synthesize the necessary viral proteins, pathogen replication should slow down or be interrupted. The amount of the synthesized viral proteins after the invasion of the pathogen into the cell increases successively passing through the lag phase, the rapid growth phase, and the exponential phase (Bojkova et al., 2020; Wu et al., 2021; Cheemarla et al., 2021; Pyke et al., 2021). In the rapid growth phase and especially in the exponential phase, viral replication requires high availability of substrates for biosynthetic reactions. The consequence of EAA availability for the synthesis of SARS-CoV-2 proteins has not been studied previously. For a practical understanding of the significance of limiting EAAs in the pathogenesis of COVID-19, it should be compared the biochemical characteristics of the virus and the host.

MATERIAL AND METHODS

For the study, required information was systematically searched on the Internet using single keywords and combination thereof. Data from 20 countries with the highest reported number of cases were analyzed. AA sequences of virus proteins were acquired from databases (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>, <https://www.uniprot.org/uniprot/>). Most of the statistics were obtained from the following well known and reliable databases: <https://www.who.int/>; <https://www.worldometers.info/>; <http://www.fao.org/>; <https://our-worldindata.org/>; <https://databank.worldbank.org/>; <https://www.imf.org/>. The rate of prevalence (RPr) or infection fatality rate (IFR) of the virus were calculated as a ratio between quantities of total cases and population. Case fatality rate (CFR) was the ratio between total COVID-19 deaths and total registered infection cases in percentage. The relationship between statistical data was estimated as a Pearson correlation coefficient (r).

¹ World Health Organization. <https://www.who.int>

² там же

RESULTS AND DISCUSSION

Characteristics of the development of the COVID-19 pandemic over two years

The pathogenic SARS-CoV-2 virus was discovered three years ago. In around 700 days (Monday, January 31, 2022), after the announcement of the COVID-19 pandemic by WHO, there were about 380 million patients globally infected with the SARS-CoV-2 virus: approximately 5 % of the world's population. To date, the current COVID-19 pandemic has entered its sixth wave of infections and deaths (Worldometers, 2022). WHO experts have identified three main groups of patients infected with the virus, depending on the development of the disease³(CDC, 2022). The largest group of patients had the infection with mild or no symptoms; the next group included patients with severe disease, and 5 % of COVID-19 patients developed to a critical phase with a high mortality rate. To date, about 300 Mio people (79 % of infected people) have recovered from the disease and approximately 5.7 Mio COVID-patients (1.5 %) died (Worldometers, 2022).

Data on the consequences of the infectious disease COVID-19 vary significantly between different continents, states, and even distinct regions in the same country⁴ (CDC, 2022; Worldometers, 2022; Ponomarenko, 2022, Ponomarenko, 2023). Three countries: the United States of America (USA), India, and Brazil, have recorded the most infections and deaths from COVID-19. These three countries were home to 38 % of the globally infected and 37 % of all deaths. With 22.8 %, the USA had the highest number of registered infections per capita (RPr) of these three countries, and the USA also had the highest mortality (IFR): 0.27 %. On the other hand, in some European countries, RPr exceeded 35 %, which was 6–7 times higher than the global average (Worldometers). In Peru, the IFR was roughly an order of magnitude higher than the global average (0.6 % compared to 0.07 %). The emergence of new variants of the virus poses a risk for the further development of the epidemic; an increase in COVID-19 cases and deaths is possible in the coming months if drastic measures would not be taken to combat the SARS-CoV-2 virus.

Related molecular biological characteristics of the SARS-CoV-2 virus

The SARS-CoV-2 virus belongs to the Betacoronavirus (β CoV) genus. β CoV are the largest and most developed RNA viruses; their genome type is designated NSs+RNA since they have a non-segmented single-stranded positive-sense RNA. Coronaviruses that cause disease in humans are re-

ferred to as HCoV. The linear genomic RNA (gRNA) of β CoV is about 30 kb in size and protected by a developed spiral capsid (Abdelrahman & Wang, 2020; Hu et al., 2021; To et al., 2021; V'kovski et al., 2021).

The genetics, structure, and function of SARS-CoV-2 proteins have been well studied and discussed in many publications, as well as detailed in several reviews (Abdelrahman & Wang, 2020; Hu et al., 2021; To et al., 2021; V'kovski et al., 2021; Yadav et al., 2021; Yoshimoto, 2020). Large databases of the sequence, structure, and function of β CoV proteins have been created (NCBI, 2022; UniProt, 2022). It was believed that few of the viral proteins can be the subject of vaccines or targeted inhibitors (Yapasert et al., 2021; Yadav et al., 2021; Yoshimoto, 2020).

The virus has no storage proteins, so all proteins are needed for its rapid reproduction. The genome of Coronaviruses encodes the synthesis of structural and functional polypeptides (Hu et al., 2021; To et al., 2021; V'kovski et al., 2021; Yadav et al., 2021; Yoshimoto, 2020). The functional open reading frame ORF1ab is located in the 5'-genomic region from 268 to 21555 nucleotides of the SARS-CoV-2 virus (V'kovski et al., 2021; Yadav et al., 2021; Yoshimoto, 2020) and contains 16 nsp genes encoding the same amount of non-structural proteins (NSPs). The ORF1ab makes up approximately two-thirds of the viral genome. It encodes the production of two, primarily translated, polyproteins Pp1a and Pp1ab (V'kovski et al., 2021; Yadav et al., 2021; Yoshimoto, 2020; NCBI, 2022; UniProt, 2022; Finkel et al., 2021). These two polypeptides are synthesized directly upon invasion by using gRNA as a template. The Pp1a polypeptide is expressed 1.4–2.2 times faster than Pp1ab (V'kovski et al., 2021; Yadav et al., 2021). This is a co-translational result of a programmed -1 ribosome frameshift common to Coronaviruses (Bhatt et al., 2021). Eleven NSPs, from the nsp1 to nsp11 genes, are released from the Pp1a polyprotein, and fifteen protein types: nsp1–10 plus nsp12–16 are released from Pp1ab after post-translational proteolytic cleavage (V'kovski et al., 2021; Yoshimoto 2020).

As in other HCoVs, four genes encoding structural proteins: spike (S), envelope (E), membrane (M), and nucleocapsid (N) are located in the 5' to 3' direction of the remaining third of the SARS-CoV-2 genome. These genes border on a variable number of accessory proteins (Hu et al., 2021; To et al., 2021; V'kovski et al., 2021; Yadav et al., 2021; Yoshimoto 2020). The intensively studied spike protein is the largest structural polypeptide containing 1273 amino acid residues (Yadav et al., 2021; Yoshimoto 2020; NCBI, 2022; UniProt, 2022). Spike polypeptides are synthesized at a higher rate than other structural proteins (Finkel et al., 2021) and form glycosylated trimers after folding. They, in combination with the M and E proteins, are released from rER and then form a specific protein-lipid complex (cSME) with the membranes of the Golgi apparatus (Yadav et al., 2021; Yoshimoto, 2020). N-proteins

³ World Health Organization. <https://www.who.int>

⁴ там же

associate with newly synthesized gRNAs in the cytoplasm forming many densely condensed nucleocapsids (protovirions). Protovirions bind to membrane cSME secreted from the Golgi apparatus to form self-organized virion progeny (Hu et al., 2021; To et al., 2021; V'kovski et al., 2021). Mature progeny virions attach to the cell membrane and are released during exocytosis, their number can reach 10^3 per cell (Bar-On et al., 2020).

The complete productive cycle of a virus consists of the main phases: infection, replication, release, and transmission of virions. Viral gRNA should primarily translate the non-structural polypeptides Pp1a and Pp1ab using cellular ribosomes. Since these polypeptides produce the enzymes necessary for replication and transcription of the genomic and subgenomic RNA of the β CoV (Yadav et al., 2021; Yoshimoto 2020). The total length of Pp1ab in the SARS-CoV2 virus is 7073 amino acid residues, and the Pp1a polypeptide consists of 4405 amino acid residues (NCBI, 2022; UniProt, 2022). About 85 % of the virus gRNA nucleotides encode Pp1ab and the spike protein.

As an obligatory parasite, the virus uses an intracellular apparatus for the synthesis and post-translational modifications of all the necessary polypeptides, as well as RNA molecules. The remaining components that make up the structure of pathogenic virions are taken from the host cell (Abdelrahman & Wang, 2020; Hu et al., 2021; To et al., 2021; V'kovski et al., 2021).

Type of diet influences the development of COVID-19 disease

Animals need essential macronutrients (proteins, carbohydrates, and lipids) to sustain their life, health, and reproduction. The WHO has long promoted recommendations for healthy eating. Human food must contain the required quantity and quality of basic products and additional nutrients⁵ (Wu, 2016; Joint, 2007). The most commonly used staples are rice, wheat, corn, and beans. However, plants are incomplete sources of protein due to their low content of some essential amino acids (EAAs). Vegans are advised to consume additional sources of protein, to achieve the optimal EAAs combination. The diet of many people in some countries or regions is low in calories, uniform, and does not contain the recommended complete protein⁶ (Our World in Data, 2022; New Food Balances, 2021).

WHO or the Food and Agriculture Organization (FAO) of the UNO have recommended the optimal amount of dietary protein and the correct ratio of EAAs to maintain quality of life

and good health. Protein bioavailability is a criterion for determining the nutritional value of foods (Joint, 2007).

As noted above, diet can significantly influence the development of COVID-19 (Allard et al., 2020; Bedock et al., 2021; Clemente-Suarez et al., 2021; James et al., 2021; Mentella et al., 2021; Mechanick et al., 2021; Morais et al., 2021; Mortaz et al., 2021). In large statistical samples, it has been shown that the severity of COVID-19 was worsened by the consumption of animal proteins in excess of the WHO recommendations (Ponomarenko, 2022; Ponomarenko, 2023). In contrast, a plant-based diet correlated directly with a mild SARS-CoV-2 infection process (Ponomarenko 2022; Kim et al., 2021).

These data were confirmed when comparing the statistical sample for the top 20 countries in terms of the number of infected people (Table S1). The correlation coefficients between animal protein intake and pathogenicity of SARS-CoV-2 varied between 0.83 for infection rate and 0.61 for specific mortality (Table S2). The correlation coefficients between the development of COVID-19 and the consumption of plant foods were lower (-0.30 for RPr and -0.24 for IFR) than in studies conducted before the fifth global wave of the pandemic (Ponomarenko, 2022; Ponomarenko, 2023), which analyzed epidemiological data from a different type of statistical samples. The resulting correlation coefficients (Table S2) confirm that the overconsumption of animal proteins correlates with the severity of COVID-19. It can be assumed that some components of dietary animal proteins were critical factors in the development and outcome of COVID-19 disease.

Comparison of the amino acid composition of proteins from animals, plants, and viruses

Proteins and their AAs are essential for the structure and function of living cells and viruses.

The building blocks of proteins are amino acid residues. Therefore, it is logical to study the dependence of the severity of COVID-19 on the AAs amount and composition of proteins consumed. The significance of viruses' amino acid profile is analyzed here.

Biochemists divide the 20 standard proteinogenic AAs into two groups depending on the ability of the human body to synthesize them: non-essential (NEAAs) and EAAs. The nine EAAs must come from food; the NEAAs are synthesized in various cells of the body.

Edible products differ in the ratio of NEAAs and EAAs. Animal proteins contain more EAAs than plants (Gardner et al., 2019; Gorissen et al., 2018; Kang, 2020). Fish and eggs contain an average of 44 % EAAs, milk, and meat about 43 % (Table 1,

⁵ World Health Organization. <https://www.who.int>

⁶ там же

Table 1

Ratio of total EAAs and LKTU of animal or vegetable based proteins in staple food

Amino acid	Food						
	Meat	Egg-milk	Salmon	Wheat	Rice	Potato	Soybeans
Leucine	8,0–8,2	8,5–8,8	8,6	6,7	8,28	6	7,7
Lysine	8,8–9,1	7,2–7,8	9,4	2,2	3,66	6	6,2
Threonine	4,2–4,6	4,0–4,8	4,4	3	3,59	3,6	4,2
Valine	5,2–5,4	6,0	5,2	4,4	6,14	5,5	4,6
Sum LKTU	31,0–33,0	30,5–32,8	32,4	19,8	25,97	25,3	27,3
Total EAAs	41,8–44,3	42,9–43,7	43,8	30,2	37	35	38,5

Amount of total EAAs and LKTU in % in meat (from beef, chicken, and pork), egg-milk products, and diet plants (Gardner et al., 2019).

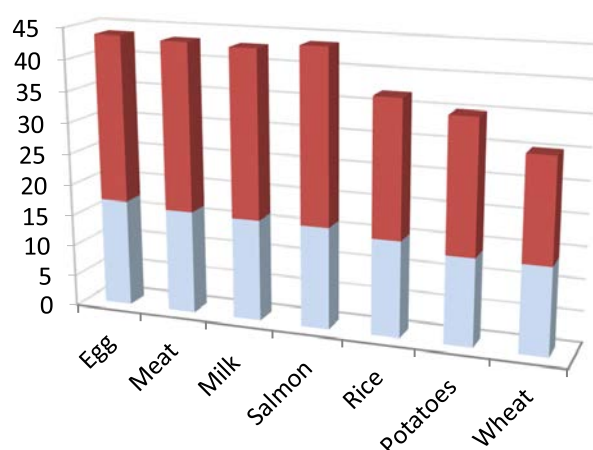
Fig. 1). In the proteins of the main products produced from plants: rice, wheat, potatoes and soybeans; the proportion of EAAs is 37 %, 30 %, 35 %, and 38 %, respectively (Fig. 1, Table 1). An adult should consume 0.8–1 g of protein per kg of body weight (BW) daily (WHO; Joint, 2007) and 0.2 g/kg BW/day EAAs (Verzola et al., 2021). In Europe and America, people consume more total and animal protein (Western diet) (Table 2, Fig. 2) than the WHO recommends⁷ (Our World in Data, 2022; New Food Balances, 2021).

More than a half of the EAAs consumed are represented by four amino acids: leucine, lysine, threonine, and valine (LKTU). Their content in food varies greatly depend-

ing on the diet. Plant proteins have a low content of EAAs (Fig. 1–3, Tables 1–2) and have a particularly low content of lysine (Gardner et al., 2019; Gorissen et al., 2018; Kang, 2020). Therefore, vegan diets contain less EAAs and LKTU than the diet of meat eaters or the USA standard diet (Paul et al., 2019) (Table 2., Fig. 2). The proteins of the Standard American diet contain almost twice as many LKTU amino acids (Paul et al., 2019; Schmidt et al., 2015; Mariotti & Gardner, 2019) as in the vegan diet (Table 2.). Children generally require more dietary protein per kg of body weight than adults. WHO recommends the amount of total protein and AAs required per day (Table 2, Fig. 2) for optimal body functioning in children and adults⁸ (Joint, 2007). However, residents of many countries in Africa and Asia consume much less total protein, and especially less animal protein⁹ (Ponomarenko, 2022; Ponomarenko, 2023; Our World in Data, 2022; New Food Balances, 2021).

Fig. 1

Content of total EAAs and LKTU in animal or vegetable dietary proteins



Ratio of total EAAs and LKTU (red), % of total protein, in egg, meat (mean from beef, chicken, and pork), milk products, rice, potato, and wheat (Gardner et al., 2019). On the ordinate axis indicated amount of AAs as percentage of the total protein.

The concentration of amino acids in the blood

AAs from hydrolyzed dietary proteins are absorbed in the intestine and transported into the bloodstream (Bröer & Bröer, 2017; Groen et al., 2015; Horstman et al., 2020; Trommelen et al., 2021). The concentration of each AA in the blood plasma varies widely both under normal conditions (Table 3) and in various pathologies (Verzola et al., 2021; Schmidt et al., 2016; Bröer & Bröer, 2017; Atila et al., 2021; Ansone et al., 2021; Holecek, 2021; Ren et al., 2018). Their concentration in the blood and other tissues may depend on many factors but is successfully regulated in a healthy body (Joint, 2007). The content of free AAs in the bloodstream changes during the day and can significantly increase after a meal (Joint, 2007; Groen et al., 2015; Horstman et al., 2020; Trommelen et al., 2021). Free amino acid (FAA) homeostasis is maintained through the synthe-

⁷ World Health Organization. <https://www.who.int>

⁸ World Health Organization. <https://www.who.int>

⁹ Там же

Table 2

Four EAAs content (g) in 100 g of total protein from different diets compared with recommended dietary allowance by WHO

Amino acid	WHO	Human milk	Meat-eaters	Vegans	AD*
Leucine	5,9	9,6	6,13	4,33	7,75
Lysine	4,5	6,9	5,01	2,82	6,69
Threonine	2,3	4,4	2,99	2,19	3,84
Valine	3,9	5,5	4,14	2,95	5,07
Sum LKTV	16,6	26,4	18,27	12,29	23,35
Ref.	(Joint 2007)	(Joint 2007)	(Schmidt et al., 2016)	(Schmidt et al., 2016)	(Paul et al., 2019)

AD* =Standard American Diet,

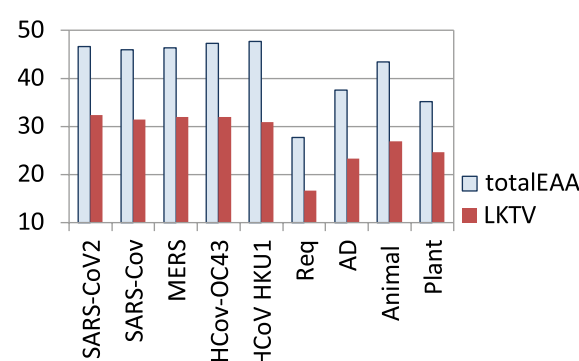
sis/degradation of polypeptides and amino acids, protein proteolysis, AAs uptake from the gut into the bloodstream, and their utilization in various tissues (Joint, 2007; Bröer & Bröer, 2017; Ansone et al., 2021; 2021; Ren et al., 2018; Purpura et al., 2014; Sans et al., 2020). Baseline (fasting) plasma concentrations of some FAAs are lower in vegans (Schmidt et al., 2016; Purpura et al., 2014) than in those who consume animal products (Table 3). The content of EAAs in human muscles is lower than in the proteins of other mammals (Fig. 3). The level of all FAAs and especially EAAs in plasma increases up to 2–3 times after a meal (Paul et al., 2019; Groen et al., 2015; Horstman et al., 2020; Trommelen et al., 2021; Purpura et al., 2014; Wilkinson et al., 2018; Yang et al., 2012), therefore their transport to organs and tissues rises (Groen et al., 2015; Yang et al., 2012). This leads to an intensification in the rate of protein synthesis (Groen et al., 2015; Horstman et al., 2020; Wilkinson et al., 2018; Bohe et al., 2003) and is used by athletes to build muscle mass.

The SARS-CoV-2 virus modifies the consumption profile and distribution of proteins and AAs in host cells and leads to an imbalance in the metabolism of AAs in the body (Mussap & Fanos, 2021; Wu et al., 2021; Verzola et al., 2021; Ansone et al., 2021; Ren et al., 2018). The pathogen alters central cellular pathways such as translation, splicing, carbon metabolism, protein homeostasis (proteostasis), and nucleic acid metabolism (Bojkova et al., 2020; Banerjee et al., 2020). The serum metabolome of COVID-19 patients is distinctive and has important value in investigating pathogenesis, determining a diagnosis, predicting severe cases, and improving treatment (Shi et al., 2021).

The composition of AAs in patients' plasma can vary significantly depending on the severity of COVID-19 (Delattre et al., 2020; Mussap & Fanos, 2021; Paez-Franco et al., 2021; Wu et al., 2021; Atila et al., 2021; Ansone et al., 2021; Rees et al., 2021). About 70 % of the three BCAAs: leucine, isoleucine, and valine are transported from the bloodstream to peripheral tissues (Holecek, 2021) and their metabolism is regulated coordinately. BCAAs are essential for the regulation of anabolic process; their transport is interdependent

Fig. 2

Amount of EAAs in proteins from HCoV, animal and plants



Red: LKTV, light blue: total EAAs. AD: standard American Diet (Paul et al., 2019). Animal: mean from meat, milk and egg products (Gardner et al., 2019). Plant: mean from rice, wheat, potato, and soya (Gardner et al., 2019). Req: amount of EAAs required per day (WHO; Joint 2007). For HCoV protein sequences used means of Pp1ab+Spike which UniProtKB-ID listed in Table S2 (uniprot). On the ordinate axis indicated amount of EAAs as percentage of the total protein.

with other AAs (Paez-Franco et al., 2021). Leucine rapidly accelerates protein synthesis (Groen et al., 2015; Wilkinson et al., 2018; Yang et al., 2012; van Sloun et al., 2020).

The peculiarity of AAs composition of virus polypeptides

Virus polypeptides are very different from human proteins, other animals, or plants in terms of the amount of EAAs and their proportion in the total protein. The proportion of EAAs in HCoV proteins is much higher than in mammalian tissues (Fig. 1–3). The proteins of the HCoV-HKU1 Coronavirus contain the highest amount of EAAs, and the SARS-CoV2 virus contains more of the LKTV compared to other HCoVs (Fig. 2–3). Nutrient plant proteins contain much less of both

Table 3

Content of selected EAAs in blood plasma, human tissues and diet proteins

Amino acid	Plasma AAs [$\mu\text{mol/L}$]			% of total protein			
	Reference intervals	Meat-eaters	Vegan	Human body	Human muscle	Meat	Plant
Leucine	66–170	205	191	7,5	7,6	8,1	7,2
Lysine	150–220	241	210	7,3	7,8	9,0	4,5
Threonine	92–240	164	165	4,2	3,4	4,4	3,6
Valine	150–310	230	217	4,9	5,1	5,3	5,2
Ref.	*	(Schmidt et al., 2016)		(Joint, 2007)	(Gorissen et al., 2018; 0 et al., 2019)		

Meat and Plant: average composition (%) of EAAs in ingested 100 g dietary meat and plant products (from Table 1).

*<https://www.ucsfhealth.org/>

EAAs and LKTV than Coronaviruses or human and animal proteins (Table 1, Fig. 2–3).

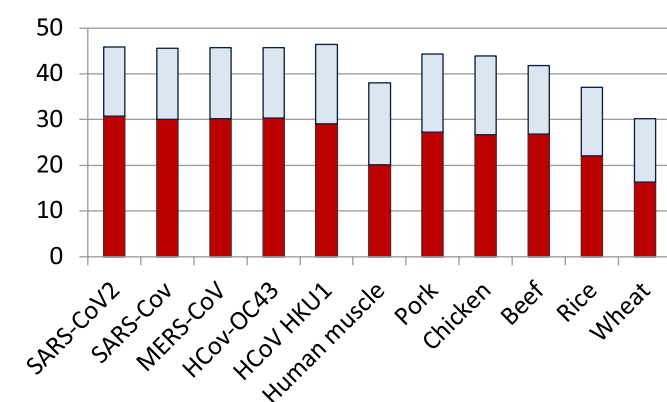
The spike protein and other structural polypeptides of Coronaviruses have a high content of leucine, threonine, and valine (Renz et al., 2021). Polyproteins of Coronaviruses are synthesized just after entry into the cell (V'kovski et al., 2021; Yadav et al., 2021) and have an EAAs content of more than 45 % (Fig. 4). The Pp1a polyprotein of the HCoV-HKU1 virus is almost half composed of EAAs residues. Another feature of the proteins of HCoV viruses is the high content of four LKTV amino acid residues, almost 1/3 of all AAs (Fig. 2–3). SARS-CoV-2 Coronavirus proteins contain more valine and threonine than alveolar cells (Renz et al., 2020) and diet

proteins (Fig. 5). The content of EAAs is highest in the Pp1a polyprotein (Fig. 4).

Vegans consume only half as much lysine as meat eaters. The SARS-CoV-2 polyprotein Pp1a contains 2–3 times more threonine or valine than consumed proteins (Fig. 5). The Pp1a proteins of HCoV-OC43 and HCoV-HKU1 contain twice as much valine as mammalian tissues. The highest content of threonine is in Pp1a of the SARS-CoV-2 virus. A significant amount of leucine (more than 9 %) is found in all five pathogenic HCoV viruses. It is not clear; can leucine increase protein synthesis of the virus as has been noted for cell proteins translation (Groen et al., 2015; Sans et al., 2021; Cantwell et al., 2021). The SARS-CoV-2 virus causes metabolic reprogramming of the AAs profile, and competition between host and pathogen for EAAs is not excluded (Paez-Franco et al., 2021; Wu et al., 2021; Rees et al., 2021; Lapointe et al., 2021). AAs deficiency can reduce translation (Sans et al., 2021), and leucine deficiency inhibits the formation of intracellular polysomes (Mazor et al., 2018).

Fig. 3

Amount of EAAs in proteins from human beta-coronaviruses, animal and plants



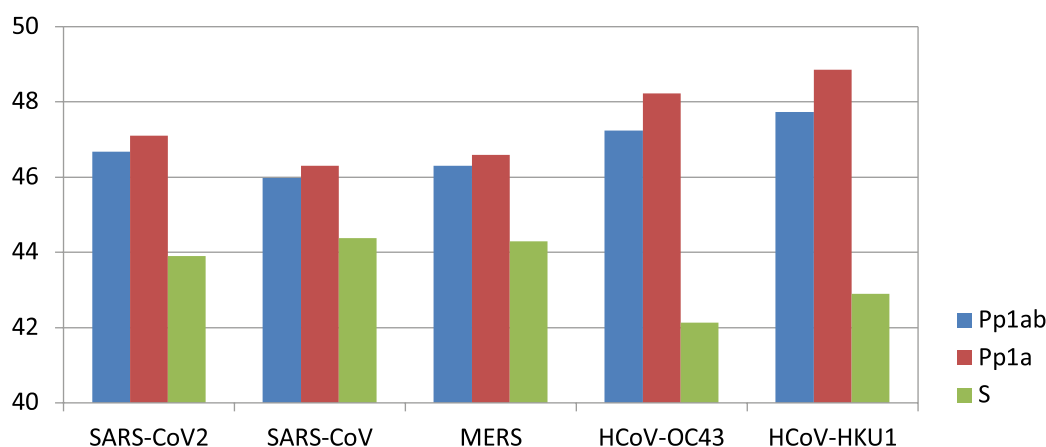
Red: LKTV, light blue: the rest EAAs of total protein. For HCoV proteins used means of Pp1ab+Spike which UniProtKB-ID listed in Table S2 (uniprot). Human muscle: ratio EAAs, % of total protein in human muscle, in animal and plant food (Gorissen et al., 2018). On the ordinate axis indicated amount of AAs as percentage of the total protein.

SARS-CoV-2 reproduction and translation kinetics

The kinetics of reproduction of viruses, as well as other microorganisms, obeys the Monod equation, which is similar to the dependence of Michaelis-Menten on the concentration of the substrate for the enzymatic reaction (Cheemarla et al., 2021; Pyke et al., 2021). These equations describe the reaction rate as a function of substrate concentration. At a concentration of translation substrates sufficient for the optimal rate of pathogen protein synthesis, virion replication passes through the lag phase and the fast phase into the exponential growth phase (Cheemarla et al., 2021; Pyke et al., 2021). The doubling time of the SARS-CoV-2 virus is 6–10 hours (Cheemarla et al., 2021; Bar-On et al., 2020). Each pneumocyte type2 (PT2) can produce about a thousand new virions (Bar-On et al., 2020). At the peak of pathogenesis in the

Fig. 4

Ratio of total EAAs in five HCoVs proteins



Total amount of EAAs in proteins (%) of Pp1a, Pp1ab and Spike protein of HCoVs, which UniProtKB-ID listed in Table S2 (uniprot). On the ordinate axis indicated amount of AAs as percentage of the total protein.

body of an infected patient, the total number of viral particles reaches 10^9 – 10^{11} with a mass greater than 100 g (Bar-On et al., 2020). As a result of the successful reproduction of the SARS-CoV-2 virus, lung weight increases, but the total body weight of animals (Cantwell et al., 2021) or humans (Bedock et al., 2021) decreases.

The expression rate of viral polypeptides rapidly increases after the lag phase (Aller et al., 2018; Cheemarla et al., 2021; Pyke et al., 2021). The polypeptides of the SARS-CoV-2 virus are elongated by 6 AA residues per second (Bar-On et al., 2020). Some NSPs mediate cellular RNAs destabilization but stimulate robust translation of viral gRNAs and subgenomic RNAs (Lapointe et al., 2021; Zhang et al., 2022). More than 60 mutations were found in Omicron variant B.1.1.529 (GSAI ID: R40B60_BHP_3321001247/2021) of the SARS-CoV-2 virus, as a result of which the content of EAAs changed. This led to an alteration in the development dynamics of this pathogen (He et al., 2021). For the log phase of protein synthesis, it is necessary that the concentration of free and transportable AAs significantly exceed K_m (Bergström et al., 1974; Hoffmann & Lambert, 1983).

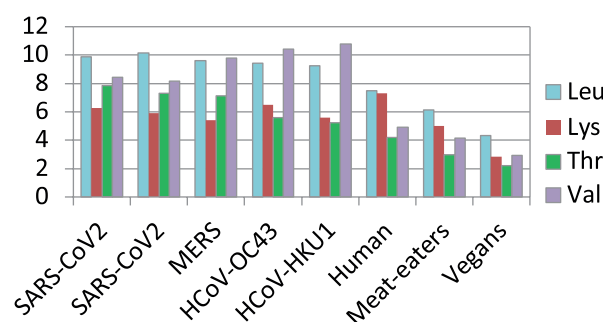
The large difference between the need and availability of LKTV makes them the first limiting substrates in the polymerization reaction of HCoV polypeptides. A reasonably high concentration of LAAs is required to enter the exponential phase of the synthetic reaction. A lack of even one AA can slow down or interrupt the translation of Coronavirus polypeptides (Verzola et al., 2021) and, therefore, a low concentration of LAAs can block the synthesis of NSPs.

Factors affecting the rate of translation of SARS-CoV-2 polypeptides

The HCoV-HKU1 virus contains more EAAs than the three SARS-causing pathogens and has more than 10 % valine in its Pp1ab polypeptide (Fig. 2–3, 5). The deficiency of EAAs will interrupt the Pp1a translation, which is known as the first synthesized in HCoV. Inhibition of translation of functional Pp1a and Pp1ab polypeptides can consequently lead to a radical decrease in the rate of synthesis of Coronavirus gRNA and subgenomic RNAs and the polypeptides they encode. Such a decrease in the synthesis rate of Pp1a molecules or abortive translation can prevent the development of the log phase of replication, reduce the pathogenic effect of the virus, and prevent cytokine storms in COVID-19 patients.

Fig. 5

Content of selected EAAs in HCoV, in human and in food as percentage of total protein



Human: % of EAAs in whole body (Joint, 2007). Meat-eaters and Vegans: composition (%) of EAA in ingested 100 g food proteins by meat-eaters or vegans (Schmidt et al., 2016). For HCoVs used sequence of polyprotein Pp1a which UniProtKB-ID listed in Table S2 (uniprot). On the ordinate axis indicated amount of AAs as percentage of the total protein.

The high concentration of EAAs in the polyproteins Pp1a or Pp1ab, especially valine, may explain the less severe outcomes of the two human coronaviruses HCoV-OC43 and HCoV-HKU1 infection compared to COVID-19.

Table 4 structures the data, showing that optimal conditions in PT2 for the protein synthesis of the SARS-CoV-2 virus were created. In the alveoli cells were observed a high level of protein expression. The interaction of the synthesizing systems of the cell and the virus can provide high-speed trans-

lation on host ribosomes (Zhang et al., 2022). A high rate of viral protein synthesis is necessary for a short replication cycle and efficient production of a large population of progeny virions. The amount of LKTV may be the primary limiting factor in the rate of polypeptide translation, and hence the replication of the SARS-CoV-2 virus. The high requirement of Pp1a and proteins for EAAs makes their replication very sensitive, especially to the shortage of LKTV. Such lack of LAAs can lead to inhibition of SARS-CoV-2 virus replication or even unproductive infection.

Table 4

Conditions for fast replication of SARS-CoV-2 virus in pneumocytes

Drivers of translation and replication	Factors promoting viral protein synthesis
Intracellular structures and mechanisms provide a high rate of viral protein synthesis.	The ability of PT2 to form transcriptional-translational complexes inside membrane vesicles supplies a high rate of synthesis of gRNA and subgenomic RNAs of the SARS-CoV-2 virus (Bar-On et al., 2020; Fehrenbach, 2001; Knudsen & Ochs, 2018). The ability of PT2 to a high rate of protein synthesis provides a highly developed rER and amino acid transport ATPases (Fehrenbach, 2001; Knudsen & Ochs, 2018; Mason, 2006; Weibel, 2015). A large number of mitochondria and a saturated oxygen concentration in PT2 create good conditions for enhanced oxidative phosphorylation and ensure high production of nucleoside triphosphates (NTP) and other energy-rich molecules required for the high-speed synthesis of RNA and polypeptides, and virus titer (Bedock et al., 2020; Lapointe et al., 2021; Zhang et al., 2022).
SARS-CoV-2 virus alters and suppresses host protein synthesis	Viral proteins inhibit the synthesis of host cell polypeptides, and induce changes the properties of the synthesized host proteins. This leads to an alteration in the cell cycle and RNA splicing (Finkel et al., 2021; Banerjee et al., 2020; Lapointe et al., 2021).
Timely sufficient concentrations of necessary FAAs in cells. Prolonged high concentration of EAAs in plasma and their active transport into the cell.	Deficiency of AAs in contrast to their excess amount causes inhibition of intracellular translation and decreases in protein synthesis (Bröer & Bröer, 2017). In the cytosol of cells, the concentration of AAs is higher than in plasma (Bröer & Bröer, 2017; Holecek, 2021; Bergström et al., 1974; Hoffmann & Lambert, 1983). The content of threonine and valine in lung cells is lower than in SARS-CoV-2 proteins (Renz et al., 2020).
Metabolic mechanisms capable of accelerating translation on the ribosomes of the cell	It is known that leucine induces intracellular translation (Sans et al., 2021; Mazor et al., 2018). A high concentration of FAAs in plasma activates the activity of anabolic hormones. Animal proteins are more anabolic than ones of plant origin (Verzola et al., 2021).
The intake of AAs from the intestine and from the breakdown products of host own proteins. Anabolic hormones inhibit the breakdown of proteins in the body; therefore, in the postprandial period, the role of ingested proteins for the transport of AAs to the tissue increases.	AAs are accumulated in plasma and most of FAAs are transported to tissues (Groen et al., 2015; Trommelen et al., 2021). The postprandial plasma concentration of AAs, including leucine, is increased for 2–5 hours (Groen et al., 2015; Horstman et al., 2020), depending on the composition of the food. After a peak, they decrease back to base levels (Schmidt et al., 2016; Bröer & Bröer, 2017). Anabolic hormones not only stimulate protein synthesis, but they also inhibit protein breakdown as well (Bohe et al., 2003; van Sloun et al., 2020).
Consumption of a large amount of highly bioavailable foods with a high content of proteinogenic AAs.	In the process of enzymatic digestion, a pool of FAAs is formed in the bloodstream, and the concentration of EAAs increases significantly with a sufficient level of nutrition. A high concentration of FAAs is required for the accelerated synthesis of viral proteins (Ren et al., 2018).
The basic concentration of FAAs is regulated by complex systems, both at the level of the cell and total organism	The bioavailability of AAs from animal proteins is higher than that from plant proteins. Consumption of large amounts of animal proteins provides a high content of EAAs, which leads to a high rate of polypeptide synthesis in animal tissues. Plant-based food contains a minor amount of EAAs and gives a less postprandial increase of FAAs (Schmidt et al., 2016; Purpura et al., 2014).

CONCLUSIONS

SARS-CoV-2 coronavirus causes COVID-19 disease in humans. The pandemic of this infectious disease has been depressing the vital activity of mankind for more than three years. Effective methods were urgently needed to combat COVID-19.

So far, no reliable data have been obtained on the effective use of an etiological drug that suppresses the early translation of the proteins of this pathogenic virus.

The relationship between diet type and the impact of the COVID-19 pandemic in the top 20 countries by the number of infections has been explored using numerous available statistics. A positive correlation between the severity of COVID-19 outcome and protein intake has been identified previously for many regions and confirmed by this analysis.

The SARS-CoV-2 virus interacts with human ACE2 receptors, multiplies rapidly in affected cells, and critically alters proteostasis and AAs homeostasis in the host organism.

Coronaviruses, after invasion into the cell, must translate the polyproteins Pp1a and Pp1ab. These polypeptides of Coronaviruses, unlike the proteins of the human body, other animals, and plants, contain a very high amount of EAAs. The proportion of EAAs is the highest in the Pp1a polyprotein, namely 47 % of the total protein in the SARS-CoV-2 virus. Almost one-third of the total amino acid composition of Pp1a

is represented by four EAAs: leucine; lysine; threonine and valine. The limited availability of one of these substrates can lead to a disruption in the polymerization rate of the Pp1a and Pp1ab polypeptide chains and, subsequently, to inhibition of SARS-CoV-2 early stage of replication.

EAAs are not synthesized *de novo* in the human body. Most of EAAs enter all tissues of the body from food. With a low-calorie diet, and a predominantly plant-based diet, a small amount of EAAs enters the bloodstream. It should be noted that protein intake below the WHO recommendation does not protect against the spread or invasion of viral particles. In regions where diets are predominantly low in these LAAs, infected patients may have asymptomatic or mild COVID-19 disease, without the post-COVID syndrome.

This study has analyzed the relationship between COVID-19 outcomes and the amount of animal protein consumption. Comparison of the AAs composition of the SARS-CoV-2 pathogen and the host let to propose that the limit of LKTV can be a critical factor for the rapid synthesis of Pp1a and Pp1ab polyproteins. More detailed biochemical investigations need after that understanding of the EAAs responsibility in the relationship between virus and host.

ACKNOWLEDGEMENT

I am grateful to Dr. Stefan Hermann for critical reading of the manuscript.

REFERENCES

- Abdelrahman, Z., Li, M., & Wang, X. (2020). Comparative Review of SARS-CoV-2, SARS-CoV, MERS-CoV, and Influenza A Respiratory Viruses. *Frontiers in Immunology*, 11, 552909. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2020.552909>
- Allard, L., Ouedraogo, E., Molleville, J., Bihan, H., Giroux-Leprieur, B., Sutton, A., Baudry, C., Josse, C., Didier, M., Deutsch, D., Bouchaud, O., & Cosson, E. (2020). Malnutrition: Percentage and Association with Prognosis in Patients Hospitalized for Coronavirus Disease 2019. *Nutrients*, 12(12), 3679. <https://doi.org/10.3390/nu12123679>
- Aller, S., Scott, A., Sarkar-Tyson, M., & Soyer, O. S. (2018). Integrated human-virus metabolic stoichiometric modelling predicts host-based antiviral targets against Chikungunya, Dengue and Zika viruses. *Journal of the Royal Society, Interface*, 15(146), 20180125. <https://doi.org/10.1098/rsif.2018.0125>
- Atila, A., Alay, H., Yaman, M. E., Akman, T. C., Cadirci, E., Bayrak, B., Celik, S., Atila, N. E., Yaganoglu, A. M., Kadioğlu, Y., Halıcı, Z., Parlak, E., & Bayraktutan, Z. (2021). The serum amino acid profile in COVID-19. *Amino Acids*, 53(10), 1569–1588. <https://doi.org/10.1007/s00726-021-03081-w>
- Banerjee, A. K., Blanco, M. R., Bruce, E. A., Honson, D. D., Chen, L. M., Chow, A., Bhat, P., Ollikainen, N., Quinodoz, S. A., Loney, C., Thai, J., Miller, Z. D., Lin, A. E., Schmidt, M. M., Stewart, D. G., Goldfarb, D., De Lorenzo, G., Rihn, S. J., Voorhees, R. M., Botten, J. W., ... Guttman, M. (2020). SARS-CoV-2 Disrupts Splicing, Translation, and Protein Trafficking to Suppress Host Defenses. *Cell*, 183(5), 1325–1339.e21. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2020.10.004>
- Bar-On, Y. M., Flamholz, A., Phillips, R., & Milo, R. (2020). SARS-CoV-2 (COVID-19) by the numbers. *eLife*, 9, e57309. <https://doi.org/10.7554/eLife.57309>
- Bedock, D., Couffignal, J., Bel Lassen, P., Soares, L., Mathian, A., Fadlallah, J. P., Amoura, Z., Oppert, J. M., & Faucher, P. (2021). Evolution of Nutritional Status after Early Nutritional Management in COVID-19 Hospitalized Patients. *Nutrients*, 13(7), 2276. <https://doi.org/10.3390/nu13072276>

- Bergström, J., Fürst, P., Norée, L. O., & Vinnars, E. (1974). Intracellular free amino acid concentration in human muscle tissue. *Journal of Applied Physiology*, 36(6), 693–697. <https://doi.org/10.1152/jappl.1974.36.6.693>
- Bhatt, P. R., Scaiola, A., Loughran, G., Leibundgut, M., Kratzel, A., Meurs, R., Dreos, R., O'Connor, K. M., McMillan, A., Bode, J. W., Thiel, V., Gatfield, D., Atkins, J. F., & Ban, N. (2021). Structural basis of ribosomal frameshifting during translation of the SARS-CoV-2 RNA genome. *Science (New York, N.Y.)*, 372(6548), 1306–1313. <https://doi.org/10.1126/science.abf3546>
- Billinger, E., Zuo, S., & Johansson, G. (2019). Characterization of Serine Protease Inhibitor from *Solanum tuberosum* Conjugated to Soluble Dextran and Particle Carriers. *ACS Omega*, 4(19), 18456–18464. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b02815>
- Bohé, J., Low, A., Wolfe, R. R., & Rennie, M. J. (2003). Human muscle protein synthesis is modulated by extracellular, not intramuscular amino acid availability: a dose-response study. *The Journal of Physiology*, 552(Pt 1), 315–324. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2003.050674>
- Bojkova, D., Klann, K., Koch, B., Widera, M., Krause, D., Ciesek, S., Cinatl, J., & Münch, C. (2020). Proteomics of SARS-CoV-2-infected host cells reveals therapy targets. *Nature*, 583(7816), 469–472. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2332-7>
- Bröer, S., & Bröer, A. (2017). Amino acid homeostasis and signalling in mammalian cells and organisms. *The Biochemical Journal*, 474(12), 1935–1963. <https://doi.org/10.1042/BCJ20160822>
- Cantwell, A. M., Singh, H., Platt, M., Yu, Y., Lin, Y. H., Ikeno, Y., Hubbard, G., Xiang, Y., Gonzalez-Juarbe, N., & Dube, P. H. (2021). Kinetic Multi-omic Analysis of Responses to SARS-CoV-2 Infection in a Model of Severe COVID-19. *Journal of Virology*, 95(20), e0101021. <https://doi.org/10.1128/JVI.01010-21>
- CDC. Centers for Disease Control and Prevention. (2022). COVID-19.Cases & data [Data set]. <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/>
- Cheemarla, N. R., Watkins, T. A., Mihaylova, V. T., Wang, B., Zhao, D., Wang, G., Landry, M. L., & Foxman, E. F. (2021). Dynamic innate immune response determines susceptibility to SARS-CoV-2 infection and early replication kinetics. *The Journal of Experimental Medicine*, 218(8), e20210583. <https://doi.org/10.1084/jem.20210583>
- Clemente-Suárez, V. J., Ramos-Campo, D. J., Mielgo-Ayuso, J., Dalamitros, A. A., Nikolaidis, P. A., Hormeño-Holgado, A., & Tornero-Aguilera, J. F. (2021). Nutrition in the Actual COVID-19 Pandemic. A Narrative Review. *Nutrients*, 13(6), 1924. <https://doi.org/10.3390/nu13061924>
- Delattre, H., Sasidharan, K., & Soyer, O. S. (2020). Inhibiting the reproduction of SARS-CoV-2 through perturbations in human lung cell metabolic network. *Life Science Alliance*, 4(1), e202000869. <https://doi.org/10.26508/lsa.202000869>
- Fehrenbach, H. (2001). Alveolar epithelial type II cell: defender of the alveolus revisited. *Respiratory Research*, 2, 33. <https://doi.org/10.1186/rr36>
- Finkel, Y., Gluck, A., Nachshon, A., Winkler, R., Fisher, T., Rozman, B., Mizrahi, O., Lubelsky, Y., Zuckerman, B., Slobodin, B., Yahalom-Ronen, Y., Tamir, H., Ulitsky, I., Israely, T., Paran, N., Schwartz, M., & Stern-Ginossar, N. (2021). SARS-CoV-2 uses a multipronged strategy to impede host protein synthesis. *Nature*, 594(7862), 240–245. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03610-3>
- Gardner, C. D., Hartle, J. C., Garrett, R. D., Offringa, L. C., & Wasserman, A. S. (2019). Maximizing the intersection of human health and the health of the environment with regard to the amount and type of protein produced and consumed in the United States. *Nutrition Reviews*, 77(4), 197–215. <https://doi.org/10.1093/nutrit/nuy073>
- Gorissen, S. H. M., Crombag, J. J. R., Senden, J. M. G., Waterval, W. A. H., Bierau, J., Verdijk, L. B., & van Loon, L. J. C. (2018). Protein content and amino acid composition of commercially available plant-based protein isolates. *Amino acids*, 50(12), 1685–1695. <https://doi.org/10.1007/s00726-018-2640-5>
- Groen, B. B., Horstman, A. M., Hamer, H. M., de Haan, M., van Kranenburg, J., Bierau, J., Poeze, M., Wodzig, W. K., Rasmussen, B. B., & van Loon, L. J. (2015). Post-Prandial Protein Handling: You Are What You Just Ate. *PLoS one*, 10(11), e0141582. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0141582>
- He, X., Hong, W., Pan, X., Lu, G., & Wei, X. (2021). SARS-CoV-2 Omicron variant: Characteristics and prevention. *MedComm*, 2(4), 838–845. <https://doi.org/10.1002/mco2.110>
- Hoffmann, E. K., & Lambert, I. H. (1983). Amino acid transport and cell volume regulation in Ehrlich ascites tumour cells. *The Journal of Physiology*, 338, 613–625. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1983.sp014692>
- Holeček M. (2021). The role of skeletal muscle in the pathogenesis of altered concentrations of branched-chain amino acids (valine, leucine, and isoleucine) in liver cirrhosis, diabetes, and other diseases. *Physiological Research*, 70(3), 293–305. <https://doi.org/10.33549/physiolres.934648>
- Horstman, A. M. H., Ganzevles, R. A., Kudla, U., Kardinaal, A. F. M., van den Borne, J. J. G. C., & Huppertz, T. (2021). Postprandial blood amino acid concentrations in older adults after consumption of dairy products: The role of the dairy matrix. *International Dairy Journal*, 113. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2020.104890>
- Hu, B., Guo, H., Zhou, P., & Shi, Z. L. (2021). Characteristics of SARS-CoV-2 and COVID-19. *Nature reviews. Microbi-*

- ology, 19(3), 141–154. <https://doi.org/10.1038/s41579-020-00459-7>
- James, P. T., Ali, Z., Armitage, A. E., Bonell, A., Cerami, C., Drakesmith, H., Jobe, M., Jones, K. S., Liew, Z., Moore, S. E., Morales-Berstein, F., Nabwera, H. M., Nadjm, B., Pasricha, S. R., Scheelbeek, P., Silver, M. J., Teh, M. R., & Prentice, A. M. (2021). The Role of Nutrition in COVID-19 Susceptibility and Severity of Disease: A Systematic Review. *The Journal of Nutrition*, 151(7), 1854–1878. <https://doi.org/10.1093/jn/nxab059>
- Joint WHO/FAO/UNU Expert Consultation (2007). Protein and amino acid requirements in human nutrition. *World Health Organization technical report series*, (935).
- Kang J. S. (2020). Dietary restriction of amino acids for Cancer therapy. *Nutrition & Metabolism*, 17, 20. <https://doi.org/10.1186/s12986-020-00439-x>
- Kim, H., Rebholz, C. M., Hegde, S., LaFiura, C., Raghavan, M., Lloyd, J. F., Cheng, S., & Seidemann, S. B. (2021). Plant-based diets, pescatarian diets and COVID-19 severity: a population-based case-control study in six countries. *BMJ Nutrition, Prevention & Health*. <https://doi.org/10.1136/bmjnp-2021-000272>
- Komarnytsky, S., Cook, A., & Raskin, I. (2011). Potato protease inhibitors inhibit food intake and increase circulating cholecystokinin levels by a trypsin-dependent mechanism. *International Journal of Obesity* (2005), 35(2), 236–243. <https://doi.org/10.1038/ijo.2010.192>
- Knudsen, L., & Ochs, M. (2018). The micromechanics of lung alveoli: structure and function of surfactant and tissue components. *Histochemistry and cell biology*, 150(6), 661–676. <https://doi.org/10.1007/s00418-018-1747-9>
- Lapointe, C. P., Grosely, R., Johnson, A. G., Wang, J., Fernández, I. S., & Puglisi, J. D. (2021). Dynamic competition between SARS-CoV-2 NSP1 and mRNA on the human ribosome inhibits translation initiation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118(6), e2017715118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2017715118>
- Mason, R. J. (2006). Biology of alveolar type II cells. *Respirology*, (11), S12–S15. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1440-1843.2006.00800.x>
- Mariotti, F., & Gardner, C. D. (2019). Dietary Protein and Amino Acids in Vegetarian Diets-A Review. *Nutrients*, 11(11), 2661. <https://doi.org/10.3390/nu11112661>
- Mazor, K. M., Dong, L., Mao, Y., Swanda, R. V., Qian, S. B., & Stipanuk, M. H. (2018). Effects of single amino acid deficiency on mRNA translation are markedly different for methionine versus leucine. *Scientific Reports*, 8(1), 8076. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-26254-2>
- Mechanick, J. I., Carbone, S., Dickerson, R. N., Hernandez, B. J. D., Hurt, R. T., Irving, S. Y., Li, D. Y., McCarthy, M. S., Mogensen, K. M., Gautier, J. B. O., Patel, J. J., Prewitt, T. E., Rosenthal, M., Warren, M., Winkler, M. F., McKeever, L., & ASPEN COVID-19 Task Force on Nutrition Research (2021). Clinical Nutrition Research and the COVID-19 Pandemic: A Scoping Review of the ASPEN COVID-19 Task Force on Nutrition Research. *JPEN. Journal of Parenteral and Enteral Nutrition*, 45(1), 13–31. <https://doi.org/10.1002/jpen.2036>
- Mei, M., & Tan, X. (2021). Current Strategies of Antiviral Drug Discovery for COVID-19. *Frontiers in Molecular Biosciences*, 8, 671263. <https://doi.org/10.3389/fmolb.2021.671263>
- Mentella, M. C., Scaldaferrri, F., Gasbarrini, A., & Migliano, G. A. D. (2021). The role of nutrition in the COVID-19 pandemic. *Nutrients*, 13(4), 1093. <https://doi.org/10.3390/nu13041093>
- Morais, A. H. A., Aquino, J. S., da Silva-Maia, J. K., Vale, S. H. L., Maciel, B. L. L., & Passos, T. S. (2021). Nutritional status, diet and viral respiratory infections: perspectives for severe acute respiratory syndrome coronavirus 2. *The British Journal of Nutrition*, 125(8), 851–862. <https://doi.org/10.1017/S0007114520003311>
- Mortaz, E., Bezemer, G., Alipoor, S. D., Varahram, M., Mumby, S., Folkerts, G., Garssen, J., & Adcock, I. M. (2021). Nutritional impact and its potential consequences on COVID-19 severity. *Frontiers in Nutrition*, 8, 698617. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.698617>
- Mussap, M., & Fanos, V. (2021). Could metabolomics drive the fate of COVID-19 pandemic? A narrative review on lights and shadows. *Clinical Chemistry and Laboratory Medicine*, 59(12), 1891–1905. <https://doi.org/10.1515/cclm-2021-0414>
- NCBI. (2022). National Center for Biotechnology Information [Data set] <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>
- New Food Balances. (2021). FAOSTAT. Food and agriculture data [Data set]. <https://www.fao.org/faostat/en/#home>
- Our World in Data. (2022). Research and data to make progress against the world's largest problems [Data set]. <https://ourworldindata.org>
- Páez-Franco, J. C., Torres-Ruiz, J., Sosa-Hernández, V. A., Cervantes-Díaz, R., Romero-Ramírez, S., Pérez-Fragoso, A., Meza-Sánchez, D. E., Germán-Acacio, J. M., Maravillas-Montero, J. L., Mejía-Domínguez, N. R., Ponce-de-León, A., Ulloa-Aguirre, A., Gómez-Martín, D., & Llorente, L. (2021). Metabolomics analysis reveals a modified amino acid metabolism that correlates with altered oxygen homeostasis in COVID-19 patients. *Scientific Reports*, 11(1), 6350. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85788-0>
- Paul, C., Leser, S., & Oesser, S. (2019). Significant amounts of functional collagen peptides can be incorporated in the diet while maintaining indispensable amino acid balance. *Nutrients*, 11(5), 1079. <https://doi.org/10.3390/nu11051079>
- Ponomarenko, S. V. (2022). Dietary factors influencing the COVID-19 epidemic process. *Farmakoekonomika. Mod-*

- ern Pharmacoeconomics and Pharmacoepidemiology*, 15(4), 463–471. <https://doi.org/10.17749/2070-4909/farmakoekonomika.2022.135>
- Ponomarenko, S. V. (2023). Statistical analysis of critical socioeconomic factors in the development of COVID-19 disease. *Voprosy statistiki*, 30(1), 90–100. <https://doi.org/10.34023/2313-6383-2023-30-1-90-100>
- Purpura M., Lowery R. P., Joy J. M., De Souza, E. O., Kalman, D. S., Jäger, R. & Wilson, J. M. (2014). A comparison of blood amino acid concentrations following ingestion of rice and whey protein isolate: A double-blind crossover study. *Journal of Nutrition and Health Sciences*, 1(3), 306.
- Pyke, A. T., Nair, N., van den Hurk, A. F., Burtonclay, P., Nguyen, S., Barcelon, J., Kistler, C., Schlebusch, S., McMahon, J., & Moore, F. (2021). Replication kinetics of B.1.351 and B.1.1.7 SARS-CoV-2 variants of concern including assessment of a B.1.1.7 mutant carrying a defective ORF7a gene. *Viruses*, 13(6), 1087. <https://doi.org/10.3390/v13061087>
- Rees, C. A., Rostad, C. A., Mantus, G., Anderson, E. J., Chahroudi, A., Jaggi, P., Wrammert, J., Ochoa, J. B., Ochoa, A., Basu, R. K., Heilman, S., Harris, F., Lapp, S. A., Hussaini, L., Vos, M. B., Brown, L. A., & Morris, C. R. (2021). Altered amino acid profile in patients with SARS-CoV-2 infection. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118(25), e2101708118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2101708118>
- Ren, W., Rajendran, R., Zhao, Y., Tan, B., Wu, G., Bazer, F. W., Zhu, G., Peng, Y., Huang, X., Deng, J., & Yin, Y. (2018). Amino acids as mediators of metabolic cross talk between host and pathogen. *Frontiers in Immunology*, 9, 319. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2018.00319>
- Renz, A., Widerspick, L., & Dräger, A. (2020). FBA reveals guanylate kinase as a potential target for antiviral therapies against SARS-CoV-2. *Bioinformatics (Oxford, England)*, 36(Suppl 2), i813–i821. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btaa813>
- Renz, A., Widerspick, L., & Dräger, A. (2021). Genome-scale metabolic model of infection with SARS-CoV-2 mutants confirms guanylate kinase as robust potential antiviral target. *Genes*, 12(6), 796. <https://doi.org/10.3390/genes12060796>
- Sans, M. D., Crozier, S. J., Vogel, N. L., D'Alecy, L. G., & Williams, J. A. (2021). Dietary protein and amino acid deficiency inhibit pancreatic digestive enzyme mRNA translation by multiple mechanisms. *Cellular and Molecular Gastroenterology And Hepatology*, 11(1), 99–115. <https://doi.org/10.1016/j.jcmgh.2020.07.008>
- Schmidt, J. A., Rinaldi, S., Scalbert, A., Ferrari, P., Achaintre, D., Gunter, M. J., Appleby, P. N., Key, T. J., & Travis, R. C. (2016). Plasma concentrations and intakes of amino acids in male meat-eaters, fish-eaters, vegetarians and vegans: a cross-sectional analysis in the EPIC-Oxford cohort. *European Journal of Clinical Nutrition*, 70(3), 306–312. <https://doi.org/10.1038/ejcn.2015.144>
- Shi, D., Yan, R., Lv, L., Jiang, H., Lu, Y., Sheng, J., Xie, J., Wu, W., Xia, J., Xu, K., Gu, S., Chen, Y., Huang, C., Guo, J., Du, Y., & Li, L. (2021). The serum metabolome of COVID-19 patients is distinctive and predictive. *Metabolism: Clinical and Experimental*, 118, 154739. <https://doi.org/10.1016/j.metabol.2021.154739>
- Sloun, B. V., Goossens, G. H., Erdos, B., Lenz, M., Riel, N. V., & Arts, I. C. W. (2020). The impact of amino acids on postprandial glucose and insulin kinetics in humans: A quantitative overview. *Nutrients*, 12(10), 3211. <https://doi.org/10.3390/nu12103211>
- Srikanth, S., & Chen, Z. (2016). Plant protease inhibitors in therapeutics-focus on cancer therapy. *Frontiers in pharmacology*, 7, 470. <https://doi.org/10.3389/fphar.2016.00470>
- To, K. K., Sridhar, S., Chiu, K. H., Hung, D. L., Li, X., Hung, I. F., Tam, A. R., Chung, T. W., Chan, J. F., Zhang, A. J., Cheng, V. C., & Yuen, K. Y. (2021). Lessons learned 1 year after SARS-CoV-2 emergence leading to COVID-19 pandemic. *Emerging Microbes & Infections*, 10(1), 507–535. <https://doi.org/10.1080/22221751.2021.1898291>
- Trommelen J., Tome D., & van Loon L. C. (2021). Gut amino acid absorption in humans: Concepts and relevance for postprandial metabolism. *Clinical Nutrition Open Science*, 36, 43e55 <https://doi.org/10.1016/j.nutos.2020.12.006>
- Uchiyama, T., Fujita, T., Gukasyan, H. J., Kim, K. J., Borok, Z., Crandall, E. D., & Lee, V. H. (2008). Functional characterization and cloning of amino acid transporter B(0,+)(ATB(0,+)) in primary cultured rat pneumocytes. *Journal of cellular physiology*, 214(3), 645–654. <https://doi.org/10.1002/jcp.21254>
- UniProt. (2022). UniProt Knowledgebase [Data set]. <https://www.uniprot.org/uniprot/>
- Verzola, D., Picciotto, D., Saio, M., Aimasso, F., Bruzzone, F., Sukkar, S. G., Massarino, F., Esposito, P., Viazzi, F., & Garibotto, G. (2020). Low Protein Diets and Plant-Based Low Protein Diets: Do They Meet Protein Requirements of Patients with Chronic Kidney Disease?. *Nutrients*, 13(1), 83. <https://doi.org/10.3390/nu13010083>
- V'kovski, P., Kratzel, A., Steiner, S., Stalder, H., & Thiel, V. (2021). Coronavirus biology and replication: implications for SARS-CoV-2. *Nature Reviews. Microbiology*, 19(3), 155–170. <https://doi.org/10.1038/s41579-020-00468-6>
- Wamai, R. G., Hirsch, J. L., Van Damme, W., Alnwick, D., Bailey, R. C., Hodgins, S., Alam, U., & Anyona, M. (2021). What could explain the lower COVID-19 burden in Africa despite considerable circulation of the SARS-CoV-2 virus? *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(16), 8638. <https://doi.org/10.3390/ijerph18168638>

- Weibel E. R. (2015). On the tricks alveolar epithelial cells play to make a good lung. *American journal of respiratory and critical care medicine*, 191(5), 504–513. <https://doi.org/10.1164/rccm.201409-1663OE>
- Wilkinson, D. J., Bukhari, S. S. I., Phillips, B. E., Limb, M. C., Cegielski, J., Brook, M. S., Rankin, D., Mitchell, W. K., Kobayashi, H., Williams, J. P., Lund, J., Greenhaff, P. L., Smith, K., & Atherton, P. J. (2018). Effects of leucine-enriched essential amino acid and whey protein bolus dosing upon skeletal muscle protein synthesis at rest and after exercise in older women. *Clinical Nutrition (Edinburgh, Scotland)*, 37(6 Pt A), 2011–2021. <https://doi.org/10.1016/j.clnu.2017.09.008>
- Worldometers. (2022). COVID-19 Coronavirus pandemic [Data set]. <https://www.worldometers.info>
- Wu, G. (2016). Dietary protein intake and human health. *Food & Function*, (7), 1251–1265.
- Wu, J., Zhao, M., Li, C., Zhang, Y., & Wang, D. W. (2021). The SARS-CoV-2 induced targeted amino acid profiling in patients at hospitalized and convalescent stage. *Bioscience Reports*, 41(3), BSR20204201. <https://doi.org/10.1042/BSR20204201>
- Yadav, R., Chaudhary, J. K., Jain, N., Chaudhary, P. K., Khanra, S., Dhamija, P., Sharma, A., Kumar, A., & Handu, S. (2021). Role of Structural and Non-Structural Proteins and Therapeutic Targets of SARS-CoV-2 for COVID-19. *Cells*, 10(4), 821. <https://doi.org/10.3390/cells10040821>
- Yamamoto, H., Kondo, K., Tanaka, T., Muramatsu, T., Yoshida, H., Imaizumi, A., Nagao, K., Noguchi, Y., & Miyano, H. (2016). Reference intervals for plasma-free amino acid in a Japanese population. *Annals of Clinical Biochemistry*, 53(Pt 3), 357–364. <https://doi.org/10.1177/0004563215583360>
- Yang, Y., Churchward-Venne, T. A., Burd, N. A., Breen, L., Tar-nopolsky, M. A., & Phillips, S. M. (2012). Myofibrillar protein synthesis following ingestion of soy protein isolate at rest and after resistance exercise in elderly men. *Nutrition & Metabolism*, 9(1), 57. <https://doi.org/10.1186/1743-7075-9-57>
- Yapasert, R., Khaw-On, P., & Banjerdpongchai, R. (2021). Coronavirus infection-associated cell death signaling and potential therapeutic targets. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 26(24), 7459. <https://doi.org/10.3390/molecules26247459>
- Yoshimoto, F. K. (2020). The Proteins of Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus-2 (SARS CoV-2 or n-COV19), the Cause of COVID-19. *The Protein Journal*, 39(3), 198–216. <https://doi.org/10.1007/s10930-020-09901-4>

SUPPLEMENT MATERIAL

Table S1

Relation between outcomes of COVID-19 and diet factors in countries Top-20 infection cases from different continents, January 31, 2022

Country	Cases			Consumed protein g/ person/day		
	Total Cases (mln)	Cases/ 1T population (RPr)	Deaths/1T population (IFR)	TP	AP	PP
World	378,903	48,6	0,73	81,2	32,1	49,1
USA	76,222	228,1	2,72	113,7	73,9	39,9
India	41,469	29,6	0,35	65,3	14,7	50,6
Brazil	25,454	118,4	2,92	90,9	52,8	38,1
France	19,140	292,2	2,00	112,1	69,7	42,4
UK	17,315	253,0	2,28	104,0	58,5	45,6
Russia	11,861	81,2	2,27	101,9	55,8	46,1
Turkey	11,619	135,5	1,02	101,2	35,8	65,4
Italy	10,983	182,1	2,43	106,8	57,0	49,7
Spain	9,961	212,9	2,00	107,1	66,5	40,6
Germany	9,896	117,5	1,41	104,2	63,1	41,1
Argentina	8,378	182,7	2,64	106,1	65,7	40,4
Iran	6,373	74,4	1,55	87,6	25,3	62,3
Colombia	5,887	113,8	2,60	72,4	37,2	35,2
Mexico	4,930	37,6	2,33	93,4	43,8	49,6
Poland	4,886	129,3	2,78	103,1	55,4	47,7
Netherlands	4,432	257,8	1,24	104,6	68,4	36,2
Indonesia	4,353	15,7	0,52	68,6	22,2	46,4
Ukraine	4,064	93,8	2,31	86,2	37,4	48,8
South Africa	3,605	59,6	1,57	83,4	34,9	48,8
Philippines	3,560	31,8	0,48	62,7	25,7	37,0

Correlation between rate of prevalence (RPr) or infection fatality rate (IFR) of the SARS-CoV-2 infection and amount of consumed animal protein (AP), plant protein (PP), total protein (TP). AP, PP, TP in g/day/person [38–39].

RPr = amount registered infected persons/1000 population (31.01.2022) [3], IFR= amount registered COVID-19 deaths/1000 population (31.01.2022).

Table S2

Correlation coefficients (r)

	RPr	IFR
IFR	0,41	
TP	0,79	0,57
AP	0,83	0,61
PP	-0,30	-0,24

Variation of correlation coefficients (r) between COVID-19 outcomes and consumed diet proteins. Pearson coefficients were calculated from data in Table 1.

Table S3

ID of HCoV Proteins from UniProtKB data base

Virus	Proteins		
	Pp1a	Pp1ab	Spike
SARS-CoV-2	P0DTC1	P0DTD1	P0DTC2
SARS-CoV	P0C6U2	P0C6X7-1	P59594
MERS-CoV	K9N638-1	K9N7C7	R9UQ53
HCoV-OC43	P0C6U7	P0C6X6	P36334
HCoV-HKU1	P0C6U3	A0A3G2KXK3	Q0ZME7

Концепция легкого рациона питания военнослужащих РФ – ЛРП. Минимизация массогабаритных показателей

Е.Н. Юматов

Индивидуальный предприниматель

Корреспонденция:

Юматов Евгений Николаевич

443122, г. Самара, ул. Московское шоссе,
дом, 294, кв. 32

E-mail: trast1207@mail.ru

Конфликт интересов:

автор сообщает об отсутствии
конфликта интересов

Поступила: 22.03.2023

**Поступила после
рецензирования:** 05.05.2023

Принята: 31.05.2023

Copyright: © 2023 Авторы

АННОТАЦИЯ

Введение. Условия использования индивидуальных рационов питания (ИРП) военнослужащими, во время боевых действий, предъявляют специфические требования к их разработке и продуктам для комплектования. Комплексное воздействие различных факторов стресса, приводящих к нарушению обменных процессов в организме и, прежде всего, к белково-энергетической недостаточности, характеризует условия питания и функционирования организма человека как экстремальные. Затруднение или невозможность своевременного обеспечения питанием, ставящих под угрозу выполнение поставленных перед военнослужащими задач, требуют достижения минимальных массогабаритных параметров рациона для увеличения их автономности при одновременной задаче обеспечения необходимыми питательными веществами и энергией.

Цель исследования обосновать возможности применения альтернативных традиционным продуктов для формирования пищевой матрицы рациона питания. В контексте статьи это продукты глубокой технической конверсии или структурной модификации (производные продукты), в первую очередь, белков также углеводов и жиров из различных источников сырья.

Материалы и методы. Для анализа использовались отечественные и зарубежные исследования и рекомендации по продовольствию и питанию человека в экстремальных условиях и чрезвычайных ситуациях, а также по питанию военнослужащих.

Результаты. Сравнительный анализ содержания питательных веществ, энергетической ценности и объёмной плотности продуктов ИРП и порошкообразных форм производных продуктов выявляет преимущества последних, которое способно обеспечить: минимизацию массогабаритных показателей, адекватное удовлетворение потребности в основных макро и микронутриентах, метаболизируемой энергии, улучшение функциональных параметров военнослужащих. Предполагаемый экономический эффект от использования нетрадиционных продуктов оценивается как экономия денежных средств от снижения: логистических затрат и закупочной цены.

Выводы. Представленный концептуальный задел показывают перспективность и целесообразность дальнейшей практической разработки и создания на основе нетрадиционных продуктов легкого рациона питания – ЛРП. Кроме того, данный подход способствует решению одной из основных задач Военной доктрины РФ – совершенствование военно-экономического обеспечения военной организации на основе рационального использования финансовых, материальных и иных ресурсов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

рационы питания военнослужащих, адекватное питание, производные белков, углеводов, жиров, объёмная плотность питательных веществ, массогабаритные параметры, экономическая целесообразность



Для цитирования: Юматов, Е. Н. (2023). Концепция легкого рациона питания военнослужащих РФ – ЛРП. Минимизация массогабаритных показателей. *Health, Food & Biotechnology*, 5(1), 35–50. <https://doi.org/10.36107/hfb.2023.i1.s164>

<https://doi.org/10.36107/hfb.2023.il.s164>

The Concept of Light Food Ration for Military Personnel of the Russian Federation or LFR. Minimization of Weight and Size Indicators

Evgeny N. Yumatov

Correspondence:

Evgeny N. Yumatov,
32, 294, Moscow highway, Samara, Russia,
443122, Russia

Declaration of competing interest:
none declared.

Received: 22.03.2023

Received in revised form: 05.05.2023

Accepted: 31.05.2023

Copyright: © 2023 The Authors

ABSTRACT

Introduction. The conditions for the use of individual food rations (IFR) by military personnel during hostilities impose specific requirements on IFR development and the products chosen for the rations. The complex effect of various stress factors which lead to metabolic disorders in the body and protein-energy deficiency characterizes the conditions of nutrition and functioning of the human body as extreme. The difficulty or impossibility of timely food provision jeopardizes the fulfillment of military personnel's tasks and requires the achievement of minimum weight and size parameters of the diet to increase personnels' autonomy while simultaneously providing the necessary nutrients and energy.

Purpose. The study substantiates the possibility of using alternative traditional products to form the diet food matrix. In the context of the article, these are the products of deep technical conversion or structural modification (derivative products), primarily proteins, carbohydrates and fats from various sources of raw materials.

Materials and Methods. Analysis of information published in domestic and foreign literature concerning the basic scientific foundations of the theories of balanced and adequate nutrition, functional human nutrition under extreme conditions, research papers of US National Academies divisions including Committee on Optimization of Nutrient Composition of Military Rations for Short-Term, High-Stress Situations, Committee on Military Nutrition Research, Food and Nutrition Board, National Academy of Medicine, requirements for the diet of military personnel of the Armed Forces of the Russian Federation and NATO countries, concept of a nutritious food, emergency nutrient norms and standards was used to determine the required adequate amount of macronutrients and micronutrients in the formation of the LFR food matrix.

Results. A comparative analysis of the nutrient content, energy value, and bulk density of the IFR products and powdered forms of derivative products reveals the advantages of the latter, which provide minimization of weight and size indicators, adequate satisfaction of the need for basic macro and micronutrients, metabolizable energy, improvement of the functional parameters of military personnel. The expected economic effect from non-traditional products is estimated as savings from reduced logistics costs and purchase price. The presented conceptual groundwork shows the prospects and expediency of further practical development and creation of a light diet based on non-traditional products in light food rations. In addition, this approach contributes to the solution of one of the main tasks in Military Doctrine of the Russian Federation which is improvement of the military-economic support of the military organization based on the rational use of financial, material and other resources.

KEYWORDS

food rations for military personnel, adequate nutrition, derivatives of proteins, carbohydrates, fats, bulk density of nutrients, weight and size parameters, economic feasibility



To cite: Yumatov, E. N. (2023). The concept of light food ration for military personnel of the Russian Federation or LFR. Minimization of weight and size indicators. *Health, Food & Biotechnology*, 5(1), 35–50. <https://doi.org/10.36107/hfb.2023.il.s164>

ВВЕДЕНИЕ

Ключевое звено, обеспечивающие бесперебойное функционирование всей системы военной организации, основой которой является человек, – продовольственное обеспечение. Индивидуальные рационы питания военнослужащих необходимы в наиболее важные моменты и от их качества и наличия у военнослужащих критически зависит вся система функционирования военной организации.

Изучение опыта иностранных армий в интересах ВС РФ – важная аналитическая составляющая для выработки дальнейших решений. Представляемые отечественными исследователями данные анализа продовольственного обеспечения военнослужащих и продовольственных пайков, используемых в армии США и других иностранных государствах, сообщают о том, что совершенствование пайков предусматривается программой развития сил специальных операций – ASPIP (Шаронов и соавт., 2018; Шаронов и соавт., 2020). Выделяют основные недостатки существующих ИРП, используемых военнослужащими ВС РФ: неоптимальные массогабаритные параметры (масса свыше 2,0 кг), нерациональная потребительская упаковка продуктов, приводящая к ограничениям в обеспечении подразделений разведки и спецназа в ходе выполнения специальных задач (рационы просто разукрупняются, отбираются необходимые продукты, а остальное выбрасывается) и другие. Существующие методы нормирования, которые используются для составления рационов, основаны на базисных положениях теории сбалансированного питания, экспертных методах, корреляционно-регрессионном анализе, энергетрии, калориметрии, диагностике и некоторых других, которые не в полной мере учитывают множество новых факторов, оказывающих непосредственное влияние на нормирование питания и укрепление здоровья военнослужащих, и прежде всего, на положениях теории адекватного питания (Бурмистров & Давыденко, 2021).

Рационы питания ВС РФ и США

Базовыми рационами питания военнослужащих РФ и США вне мест постоянной дислокации и отсутствия возможности приготовления и обеспечения пищей с использованием технических средств являются: ИРП (норма № 7) и рацион общего назначения (MRE), соответственно. Другие рационы питания в ВС РФ являются производными вариантами основного ИРП с уменьшением или увеличением содержимого (состава), в зависимости от конкретных задач использования. Важным отличием общей номенклатуры рационов питания в ВС США, помимо большего количества вариантов меню, является наличие рациона первого удара (FSR). Концепция рациона, который можно есть на ходу и не требует подготовки, изначально названного штурмовым рационом, была представлена в 2006 году (подробнее раздел «Зарубежные исследования военных технологий питания»). Позднее, рацион первого удара FSR стал доступен для заказа, а впоследствии был оптимизирован (вариант NOFSR). FSR – это компактный рацион, который можно есть на ходу и предназначен для употребления во время краткосрочных высокоинтенсивных миссий, компоненты которого включают продукты, являющимися легкими, простыми в употреблении и требуют минимальной подготовки или вообще не требуют ее. Кроме того, США и Канада стали первыми странами, которые на основании рекомендаций 2006 года, ввели дополнительно к индивидуальным рационам питания углеводную добавку (CarboPack), выдаваемую в периоды напряженной работы, порошковый состав которой содержит: протеин – 4 г, углеводы – 75 г, жир – 9 г, натрий – 215 мг, железо – 0,9 мг, кальций – 40 мг, энергетическая ценность – 380 ккал (Treaty, 2010).

В номенклатуре индивидуальных рационов питания ВС РФ нет вариантов аналогичных FSR. Основу всех рационов составляют различные варианты консервированных продуктов.

В Таблице 1 представлены сравнительные данные распределения основных макронутриентов, энергетической ценности и массогабаритных параметров рационов питания.

Таблица 1
Сравнительные данные основных параметров рационов питания ВС РФ и США

Наименование рациона питания	Основные макронутриенты, %			ЭЦ	Масса	Объем
	Белки	Жиры	Углеводы	ккал	г	см³
Норма № 7	17,6	32,0	50,4	4257	2100	4394
Норма № 11	15,5	22,8	61,7	3222	1470	3610
MRE	13	35	53	1300	2000	6976
FSR	12	39	52	2844	1130	2832

Состав основных макронутриентов ИРП (количество на 1 человека в сутки, норма № 7), рассчитан на основании данных о химическом составе продуктов (Скурихин & Волгарев, 1987; Тутельян, 2012), входящих в рацион: вода (в составе продуктов) – 771,8 г, белки – 132,5 г, жиры – 241,1 г, углеводы – 380,2 г и энергетическая ценность (ЭЦ) – 4257 ккал. Общая масса нетто (вся пища без упаковки) – 1658 г, масса брутто – 2100 г. Дополнительно к данной норме выдаётся 1500 мл бутилированной питьевой воды на 1 человека в сутки.¹ Малогабаритный рацион питания (МРП, норма № 11) – уменьшенный вариант ИРП. Рационы ВС США: общего назначения (MRE) и рацион первого удара (FSR) (Ibid, E-4, E-12).

В целом, для комплектования рационов используются традиционные варианты продуктов, соответствующие уровню техники второй половины прошлого века, а единственное исключение – вышеописанная углеводная добавка CarboPack. В тоже время, существуют сегменты производных продуктов: белков, углеводов и жиров из различных источников сырья животного, растительного происхождения и альтернативных источников сырья, широко распространённые во многих потребительских сегментах: детского, лечебно-профилактического, диетического, спортивного питания и др. Эти альтернативные традиционным продукты возможно использовать для формирования пищевой матрицы ИРП. Обоснованием возможности могут быть комплексные научно-исследовательские данные и экономическая эффективность – необходимые составляющие для определения целесообразности комплектования рациона данными продуктами.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для анализа использовались данные, опубликованные в отечественной и зарубежной литературе, касающейся: (1) базовых научных основ теорий сбалансированного и адекватного питания; (2) функционального питания человека при экстремальных условиях. Анализ опирался на исследовательские материалы: Комитета по оптимизации пищевого состава воинских пайков для краткосрочных, стрессовых ситуаций, Комитета по исследованиям военного питания, Совета по продовольствию и питанию, Института Медицины Национальных Академий США. Также во внимание принимались требования, предъявляемые к рационам питания военнослужащих ВС РФ и стран НАТО. Концепции полноценного питания; нормы и стандарты питательных веществ для чрезвычайных ситуаций, использовались для определения необходимого адекватного количества макронутриентов и микронутриентов при формировании пищевой матрицы ЛРП.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Отечественные научно-исследовательские данные

Теория адекватного питания

Базовая научная основа, по мнению автора, – теория адекватного питания, одним из основателей которой являлся Академик АН СССР А. М. Уголев. Им и его коллегами было обнаружено, что стресс приводит к ослаблению ассимиляции углеводов и главным образом белков, а возникающий отрицательный азотный баланс обусловлен не только разрушением, но и недостаточным поступлением аминокислот во внутреннюю среду организма. Следовательно, Уголев (1991) полагает, что при различных видах стресса существует эффективный путь коррекции белкового обмена за счет введения в рацион вместо белков, которые не усваиваются, имитирующих эти белки аминокислотных смесей. Использование подобных смесей целесообразно также в аварийных ситуациях, при чрезмерных физических нагрузках (например, в условиях экспедиций), при спортивных соревнованиях, при хирургических вмешательствах, а также в пред- и послеоперационные периоды, в условиях недостатка белка, при голоде, при высокой или низкой температуре окружающей среды, при ряде заболеваний и т.д., т.е. в случаях, которые сопровождаются возникновением стресса – общей для всех организмов реакции, являющейся неспецифической и рассматриваемой как обязательный компонент реакции на экстремальные воздействия (Уголев, 1991, с. 89) Кроме того, пептидные гидролизаты могут быть рекомендованы для питания ослабленных организмов, при краткосрочных диетах, при больших физических нагрузках и т. д (Уголев, 1991, с. 104–105).

Функциональное питание человека при экстремальных воздействиях

Эргогенное функциональное питание, предназначенное для повышения работоспособности и выносливости, в основном рассматривается как компонент спортивного питания, но может также активно использоваться работниками, занятыми тяжелым физическим трудом (например, шахтерами), спасателями в очагах ликвидации катастроф и стихийных бедствий, а также военнослужащими для повышения физической выносливости в ходе учений и выполнения боевых задач. На основании анализа индивидуальных рационов питания военнослужащих (в том числе массогабаритных размеров) выделяют еще одну область применения специализированного функционального питания – рейдовые раз-

¹ Приложение № 3. Рационы питания. ГАРАНТ. <https://base.garant.ru/55172034/59024ce80075e0ec41e6a94e1d33ae69/>

ведывательно-диверсионные группы подразделений специального назначения, для которых предлагается концепция специализированного функционального питания, которая основывается на возможности создания функциональных резервов, необходимых для интенсивных и длительных нагрузок нутриентами, возможности мобилизации этих резервов в стартовом периоде, а также минимальном уровне поддержки в ходе боевой деятельности (Новиков, Каркищенко, & Шустов, 2017).

Рассматривая функциональное питание человека при экстремальных воздействиях, выделяют анализ М. Н. Логаткина (Логаткин, 1973), разработки которого возможно рассматривать как теоретическую основу для действующих в настоящее время компактных субкалорийных рационов. Задачу создания таких рационов возможно решить, удаляя из пищевых продуктов воду и несъедобные части, таким образом возможно уменьшить дневной рацион человека, выполняющего работу средней тяжести, в лучшем случае до 1 кг (105 г белков, около 100 г жиров, 700 г углеводов, 20–30 г минеральных веществ, некоторое количество воды). Дальнейшее снижение веса и габаритов возможно только за счёт некоторого ограничения рационов питания на определённом, сравнительно коротком отрезке времени или использованием субкалорийных рационов. При первой степени ограничения калорийности рациона (уменьшение приблизительно на 25% от обычной) возникает состояние компенсированного энергетического дефицита с кратковременным снижением веса тела и последующей его стабилизацией. Такие рационы предназначены для использования в течение относительно большого отрезка времени (Новиков, Сороко, & Шустов, 2017).

Зарубежные исследования военных технологий питания

Требования предъявляемые к рационам питания: минимальная нагрузка на военную систему тыла всех уровней, а абсолютный приоритет – минимальные масса и объём, которые предоставляют возможность оперативной доставки военно-транспортной авиацией (Barrett & Cardello, 2012).

В сводном исследовательском отчёте: Комитета по оптимизации пищевого состава воинских пайков для краткосрочных, стрессовых ситуаций, Комитета по исследованиям военного питания, Совета по продовольствию и питанию, Института Медицины Национальных Академий США, отмечается, что соответствующее питание во время штурмовых миссий является постоянной проблемой, в основном из-за снижения аппетита у людей, находящихся в состоянии стресса. Солдаты обычно потребляют около половины необходимых калорий, находясь при этом состоянии отрицательного энерге-

тического баланса. Ожидаемые суточные энерготраты составляют 4000–4500 ккал / сутки, при этом периоды прерывистого повышенного расхода энергии сочетаются с более длительными периодами малоинтенсивных движений (до 20 часов в день). Неофициальные данные показали, что в попытке облегчить нагрузки, солдаты выборочно выбрасывают продукты питания. Эта практика стала широко распространённой проблемой и может привести к несбалансированному питанию, которое может поставить под угрозу здоровье или работоспособность солдата или и то, и другое одновременно во время штурмовой операции.

Представленная концепция легкого рациона, который можно есть на ходу и не требует подготовки – рацион с калорийностью 2400 ккал, если он составлен с достаточным содержанием макро- и микроэлементов и употребляется полностью, и в течение коротких периодов времени, например, от трех до семи дней и до месяца, не будет представлять какие-либо риски для здоровья. При ожидаемых расходах энергии в 4500 ккал / день во время миссий возможно, что некоторые солдаты могут потерять до 10 процентов массы тела до конца месяца, даже с повторным питанием между миссиями; такая степень потери веса может привести к неблагоприятным, но незначительным дефектам производительности. Типичный, 50 процентный дефицит энергии, наблюдаемый в боевых действиях, приводит к отрицательному балансу азота, что может привести к потере мышечной массы, усталости и снижению работоспособности. Чтобы свести к минимуму эти потенциальные последствия, комитет рекомендует уровень белка 1,2–1,5 г/кг массы тела в день. Комитет пришел к выводу, что среди макронутриентов приоритетными являются адекватные уровни белков и углеводов, а остальные макронутриенты (до уровня энергии 2400 ккал) должны быть обеспечены в виде жиров (Erdman et al., 2006).

Исследования взаимосвязи между режимом питания, потреблением питательных веществ и производительностью в течение нескольких дней тяжёлого физического труда, в котором качестве источников пищи использовались рационы MRE и FSR показало, что добровольное потребление энергии, углеводов, белков и кофеина было выше, когда испытуемые использовали FSR (83 % от общего содержания энергии), чем при употреблении MRE (78 % общего содержания энергии) (Montain et al., 2008).

В рамках программы «Партнерство ради мира» рекомендации Комитета использовались в качестве научно-исследовательской основы при разработке стандартов питания и упаковки боевых пайков сил быстрого реагирования НАТО для экспедиционных операций (NRF). Изучались существующие пайки и возможность создания стандартного индивидуального боевого рациона питания, который возможно применять при быстром развер-

тивании для выполнения задач наземных, воздушных, морских и специальных операций, включая эвакуацию, борьбу со стихийными бедствиями, борьбу с терроризмом и традиционные боевые действия, и мог бы быть источником питания на срок до 30 дней (Treaty, 2010).

Военно-медицинский комитет НАТО в 2019 году обобщил технические условия и минимальные требования к военным пайкам, которые должны соблюдаться при закупках в тендерах на приобретение (данные по содержанию макронутриентов и микронутриентов представлены в таблице 2)².

Концепция полноценного питания

В 2005 году был представлен подход, основанный на плотности питательных веществ, содержащихся в продуктах и учитывающий соотношение полезного питательного вещества к энергетической ценности пищи (Drewnowski, 2005). Стандарт плотности питательных веществ, как определено FDA (Управление по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов США), представляет собой отношение количества полезных питательных веществ к содержанию энергии в пище на обычно потребляемое эталонное количество. Более богатые питательными веществами продукты — это те, которые вносят в общий рацион больше полезных питательных веществ, чем калорий. Основываясь на наборе эталонных стандартов (Hansen et al., 1979), были представлены три набора стандартов, каждый из которых разработан для разных целей (Таблица 2).

Нормы FAO (Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций) на питательные вещества с соответствующими последствиями для об-

щественного здравоохранения предусматривают диапазон значений питательных веществ для рациона с калорийностью 2000 ккал/сутки в зависимости от возраста, пола и особых потребностей³. Набор стандартов ERFП (пищевой продукт для чрезвычайных ситуаций), определяющий минимальную необходимую плотность питательных веществ на 2000 ккал, был разработан Комитетом по исследованиям военного питания Института медицины (IOM) для совершенно другой цели — предназначен для оказания помощи в чрезвычайной ситуации, способного удовлетворить все потребности в питательных веществах населения (возраст >6 месяцев), которое могло быть единственным источником существования на срок до 15 дней (Institute of Medicine (U.S.), 2002). Нормы потребления с пищей (DRI), основанные на отчете Совета по пищевым продуктам и питанию (MOM). DRI — это количественные оценки потребления питательных веществ, которые можно использовать для планирования и оценки рациона здоровых людей (Trumbo et al., 2001; Trumbo et al., 2002). В рекомендуемые суточные нормы (DV) входят 14 питательных веществ, формирующих показатель естественного обогащения питательными веществами, позднее были добавлены клетчатка и витамин B-5 (пантотеновая кислота), что в общей сложности составило 16 питательных веществ. Процентные DV были рассчитаны на основе 2000 ккал пищи. Контрольные количества были верхними пределами рекомендуемого потребления для отдельных лиц, установленными Советом по пищевым продуктам и питанию. В соответствии с подходом FDA, продукты оценивались на предмет содержания питательных веществ, содержащихся в них, по отношению к энергетической ценности пищи, которую они обеспечивали (Drewnowski, 2005). В таблице 2 представлены сводные данные по содержанию основных макронутриентов и микронутриентов рекомендованных норм потребления.

Таблица 2

Сравнение стандартов плотности питательных веществ

Нутриент	FAO	ERFP	DRI	DV	AMedP
Белок, г	40–50	64	46–56	65	118
Углеводы, г					404
Витамин А, мкг	700–1000	1000	700–900	5000 ME	900
Витамин С, мг	50–60	200	75–90	75	45
Кальций, мг	500–800	1536	1000–1200	1300	1000
Железо, мг	7–40	32	8–18	18	8
Цинк, мг	12–20	21	8–11	11	11
Фолат, мкг	300–400	620	400	400	400

² Standard, N. A. T. O. (2019). AMedP–1.11. *Requirements of Individual Operational Rations for Military Use. Edition B. Version, 1.*

³ Joint, F. A. O., & World Health Organization. (1998). *Preparation and use of food-based dietary guidelines. World Health Organization.*

Окончание Таблицы 2

Нутриент	FAO	ERFP	DRI	DV	AMedP
Тиамин, мг	1,0–1,6	2,4	1,1–1,2	1,2	1,2
Рибофлавин, мг	1,2–1,8	2,4	1,1–1,3	1,3	1,3
Витамин В–12, мкг	1,0–2,0	24	2,4	2,4	2,4
Витамин Д, мкг	5,0–10,0	10,4	5–15	10	5,0
Витамин Е, мг	7,0–10,0	32	15	15	10,0
Ниацин, мг	12–20	22,4	14–16	–	16,0
Витамин К, мкг	40–80	120	90–120	–	70
Витамин В–6, мг	1,2–2,0	2,4	1,3–1,9	–	1,3
Волокно, г	16–40	–	21–38	–	–
Мононенасыщенные жирные кислоты	–	–	–	20 г	*
Калий, г	–	3,4 г	4,7 г (AI)	3,5	3,8
Магний, мг	–	–	–	–	410
Натрий, мг	–	–	–	–	2300
Фосфор, мг	–	–	–	–	700
Йод, мг	–	–	–	–	150
Селен, мкг	–	–	–	–	55
Фтор, мг	–	–	–	–	4
Пантотеновая кислота, мг	–	–	–	–	6

Примечание. * Баланс содержания энергии в рационе должен обеспечиваться за счёт пищевого жира, однако не более 35 % от общего содержания энергии в рационе.

«Игнорирование» в некоторых стандартах жира, как одного из основных макронутриентов, обусловлено кратковременным периодом использования – только во время чрезвычайных ситуаций. При обильном углеводном питании и отсутствии жиров в пище синтез жира в организме может происходить из углеводов. В норме у человека 25–30 % углеводов пищи превращается в жиры; нейтральные жиры в энергетическом отношении могут быть заменены углеводами. Длительное исключение жиров из пищевого рациона может явиться причиной возникновения целого ряда тяжелых метаболических нарушений, основная причина которых кроется в возникновении в организме дефицита незаменимых жирных кислот. Линолевая, линоленовая и арахидоновая в организме человека не образуются из других жирных кислот и поэтому являются незаменимыми. Основными пищевыми источниками полиненасыщенных жирных кислот, в том числе линолевой, являются растительные масла⁴ (Бояринцев & Евсеев, 2017, с. 23).

Новые продукты рациона

Нетрадиционные продукты для комплектования рациона питания должны обеспечить решение двуединой

задачи: максимальную плотность питательных веществ для достижения минимальных массогабаритных параметров рациона, а сочетание основных макронутриентов и микронутриентов в рационе соответствует адекватному количеству питательных веществ и энергии. Требуемые параметры плотности питательных веществ и метаболизируемой энергии способны обеспечить производные продукты белков, углеводов и жиров. Белок, являющийся ключевым макроэлементом, помимо этого, наиболее дорогой компонент, цена которого имеет наибольшую долю в общей стоимости всего рациона.

Производные белков

При получении белковых производных используется широко применяемый во многих областях науки, техники, производства, управленческой деятельности и многих других, подход «сверху-вниз» («top-down») или нисходящий процесс. Применительно к технологии белковых производных подход «сверху-вниз» подразумевает уменьшение физических размеров исходных источников сырья для получения целевых продуктов с новыми функциональными свойствами и обладающи-

⁴ Бояринцев, В. В., & Евсеев, М. А. (2017). *Метаболизм и нутритивная поддержка хирургического пациента: Руководство для врачей*. Онли-Пресс.

ми биологической активностью, которая не свойственна исходному сырью.

Структурная модификация различных источников белков — это процесс изменения химических групп или молекулярной структуры белка с помощью специальных методов для улучшения биологической активности и функциональности белков. Получаемые в процессе структурной модификации пептиды и полипептиды классифицируются в нанодиапазоне от 5 до 100 нм. Получаемые фрагменты белковых частиц наноразмерного масштаба обладают свойствами, которые напрямую зависят от их размера и атомарной структуры поверхности. При проведении структурной модификации белков возможно применение широкого набора биотехнологических, химических и физических методов воздействия, а также методов выделения, очистки и концентрирования, позволяющих получать вещества с заданными характеристиками как в смесевых системах, так в виде субстанций с необходимым уровнем чистоты (Доморощенкова и соавт., 2014).

Биоактивность малых пептидов, которые в основном высвобождаются в результате ферментативного гидролиза различными протеазами, такими как пепсин, трипсин, химотрипсин, алкалаза, папаин, панкреатин, термоллизин и флейворзим, присутствует в различных белках. Эти пептиды обладают различной биологической активностью, такой как антиоксидантная, противогрибковая, противоопухолевая, ингибирующая и многие другие, а также используются для различных целей, таких как пищевые добавки, функциональные пищевые ингредиенты и нутрицевтики (Langan et al., 2021).

Гидролизаты белков — это смеси олигопептидов, полипептидов и свободных аминокислот. Короткоцепочные пептиды из гидролизованных белков обладают более высокой питательной ценностью и могут использоваться более эффективно, что повышает их востребованность в спортивном питании⁵.

Качественные характеристики белковых производных

Качество белка описывают как содержание аминокислот в пищевом источнике белка, с учётом их биодоступности. С 2013 года ФАО предложила новый метод оценки качества белка — индекс усваиваемости незаменимых аминокислот (DIAAS), пришедший на замену методу

PDCAAS, который действовал в качестве официального стандарта с 1993 года. DIAAS представляет собой отношение перевариваемых аминокислот в пище (мг/г белка) к той же аминокислоте в эталонном образце, основанном на возрастных потребностях в аминокислотах. При производстве гидролизатов, аминокислотный скор возможно скорректировать, для этих целей используется комбинаторный метод. Профиль аминокислот некоторых вариантов белковых производных: гидролизатов соевых белков и пептидного комплекса гидролизата дрожжей, для возможного использования в пищевой матрице ЛРП и данные профиля незаменимых аминокислот, рекомендуемых ФАО/ВОЗ, представлены в Таблице 3.

Таблица 3

Примерные данные профиля аминокислот в гидролизатах белков

Аминокислоты	Гидролизат соевых белков	Пептидный комплекс гидролизата дрожжей	ФАО / ВОЗ
	мг/г протеина		
Заменимые аминокислоты (Nonessential amino acids)			
Аспарагиновая кислота (Asp)	66,0–90,0	50,1–50,3	
Серин (Ser)	29,0–46,0	21,0–24,0	
Глутаминовая кислота (Glu)	112,0–170,0	70,0–80,2	
Глицин (Gly)	24,0–35,0	25,0–28,0	
Аланин (Ala)	25,0–30,0	40,0–45,0	
Пролин (Pro)	27,0–39,0	17,0–23,0	
Аргинин (Arg)	37,0–65,0	14,0–21,0	
Незаменимые аминокислоты (Essential amino acids)			
Треонин (Thr)	22,0–27,0	24,0–27,0	23,00
Валин (Val)	24,0–75,0	9,0–20,0	39,00
Метионин (Met) + Цистин (Cys)	7,0–11,0	10,0–15,0	22,0
Изолейцин (Ile)	22,0–25,0	29,0–31,0	30,00
Лейцин (Leu)	38,0–50,0	34,0–38,0	59,00
Фенилаланин (Phe) + Тирозин (Tyr)	44,0–59,0	24,0–36,0	38,0
Лизин (Lys)	32,0–106,0	38,0–41,0	45,00
Гистидин (His)	13,0–17,0	10,0–11,0	15,00
Триптофан (Trp)		5,0–6,0	6,0

Примечание. * Источники: Kerry Sheffield BioScience;6 Chevreau Consulting LLC⁷.

⁵ Объем рынка белковых гидролизатов, доля отрасли, прогноз до 2030 г. (2023, March 21). <https://www.fortunebusinessinsights.com/protein-hydrolysates-market-102287>

⁶ Technical Manual Supplements for cell culture, fermentation, and diagnostic media. Sheffield Bioscience. <https://pdfcoffee.com/technical-manual-sheffield-bioscience-pdf-free.htm>

⁷ Hydrolysate Peptide Complex. <https://www.fda.gov/media/157970/download>

Сравнительная масса и плотность продуктов ИРП и ЛРП

Наиболее важный показатель ИРП, помимо содержания питательных веществ и энергетической ценности, — массогабаритные показатели: масса нетто / брутто рациона и его объём, являющийся суммарным показателем массы и объёмной плотности продуктов, используемых для его комплектования.

Плотность порошкообразных форм производных: белков, углеводов и жиров

Насыпная плотность — важная физическая характеристика порошкообразных продуктов, это масса, деленная на весь занимаемый объём, с учетом межчастичных

и внутричастичных пустот в порошке. Есть две распространенные объёмные плотности, а именно рыхлая (свободная) насыпная плотность в насыпном состоянии, ρ_{LB} , и насыпная плотность в состоянии после утряски, ρ_{tap} . Свободная насыпная плотность — это плотность порошка, который насыпают в ёмкость. Насыпная плотность после утряски — это плотность, полученная после уплотнения рыхлого слоя порошка под воздействием внешней силы для достижения более высокой упаковки частиц (отношение ρ_{tap}/ρ_{LB} известно как отношение Хауснера) (Saw et al., 2013).

Содержание основных макронутриентов и средние значения объёмной плотности для порошкообразных форм производных продуктов и продуктов, входящих в состав ИРП и обеспечивающих более 88 % содержания белка в рационе (норма № 7) представлены в Таблице 4.

Таблица 4
Примерные сравнительные данные состава и плотности питательных веществ (основные макронутриенты) белоксодержащих продуктов ИРП и производных: белков, жиров и углеводов

Наименование продукта	Содержание пищевых веществ, 100 г					Объёмная плотность белка	Общая объёмная плотность питательных веществ
	вода	Белок	Жир	Углеводы	Энергетическая ценность		
	г	г	г	г	ккал	г / см³	г / см³
ИРП							
Хлебцы (галеты)	11,0	11,0	1,6	69,5	345	0,053	0,395
Консервы мясорастительные	60,6	6,5	12,9	17,8	213	0,065	0,372
Консервы мясоовощные	70,3	8,73	10,2	9,3	164	0,087	0,282
Консервы мясные	64,3	16,8	17,0	—	220	0,168	0,338
Консервы фаршевые	62,0	13,2	18,9	2,8	234	0,132	0,349
Консервы овощные	72,0	2,0	9,0	8,5	122	0,02	0,195
Среднее значение							0,321
Белковые производные							
Гидролизаты белков	<5	90,0	—	≤5	385	0,636	0,67
Углеводные производные							
Декстроза	—	—	—	99,0	402	—	0,815
Жировые производные							
Растительных масел	≤4,8	≤4,3	80,4	≤16,2	794	—	0,755

Примечание. * Источники: ГОСТ 5981–88⁸; ГОСТ 14032–68⁹; Syll et al., 2013; Chen et al., 2015; Petrov et al., 2017; Zhang et al., 2022; Merck¹⁰; Vehgro¹¹.

⁸ ГОСТ 5981–88. Банки металлические для консервов. Технические условия (с Изменениями № 1–3). (1990)

⁹ ГОСТ 14032–68. Галеты. Технические условия (с Изменениями № 1–5). (1969)

¹⁰ Casein hydrolysate CAS 65072–00-6 | 102245. (2023, March 18). https://www.merckmillipore.com/RU/ru/product/Casein-hydrolysate,MDA_CHEM-102245?ReferrerURL=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F

¹¹ Glucose DE 97 Dextrose Powder Fine Organic. Wholesale. Vehgro. (2023, March 18). <https://www.vehgroshop.com/glucose-de-97-dextrose-powder-fine-organic.html>

Предполагаемый состав нового ЛРП

Используя в качестве основных макронутриентов порошкообразные формы производных продуктов и исходя из предполагаемого периода использования ЛРП от 3 до 7 дней, представляется целесообразным предложить следующие варианты состава:

Вариант ЛРП № 1. Белковые производные 30–35 % (226,1–263,8 г) и углеводные производные 65–70 % (489,97–527,7 г). Приемлемый диапазон распределения макронутриентов: для углеводов 45–65 % энергии, белков 10–35 % энергии и жиров 20–35 % энергии (Мапоре, 2005).

Вариант ЛРП № 2. Производные: белков 30 % (226,1 г), жиров 6–10 % (45,2–75,4 г) и углеводов 60–64 % (452,3–482,4 г). Включение дополнительного жирового компонента для обеспечения поступления незаменимых жирных кислот. Потребность в полиненасыщенных жирных кислотах (ПНЖК) оценивается для взрослых в 6–10 % от калорийности суточного рациона¹². В то же время существуют мнения, что даже для пациентов с тяжёлыми травмами жиры следует давать только по мере необходимости, чтобы избежать дефицита жирных кислот, примерно 2 % от ежедневного потребления калорий (Institute of Medicine (US), 1999). Жировой компонент уменьшает потенциальный срок хранения рациона, так как является наименее стабильным из макронутриентов. Возможно использование лецитина из источников сырья растительного происхождения. При отсутствии установленной суточной нормы потребления, существует достаточно широкий диапазон рекомендаций от 1–4 до 20–30 г для перорального приёма в день.

Вариант ЛРП № 3. Предполагаемый вариант 10 % минимального прогнозируемого снижения общей потребности в макронутриентах, обоснованный качественными (физико-химическими) характеристиками белковых производных: производные белков 30–35 % (204–237 г), производные углеводов 65–70 % (441–475 г).

Вариант ЛРП № 4 – добавление 6–10 % жиров в матрицу рациона варианта № 3.

Микронутриенты дополнительно добавляются в состав рациона до рекомендованного значения (данные Таблицы 2), исходя из их содержания в производных компонентах белков, углеводов и жиров или аналогично варианту добавки в ИРП (поливитамины, драже – норма № 7)¹³.

Органолептические показатели, в частности вкусовые, при необходимости корректируются и разнообразятся различными вариантами вкусовых ингредиентов (от 2 до 5 % от общего состава рациона).

Дополнительно к рациону, аналогично варианту ИРП, выдаётся 1500 мл бутилированной питьевой воды на 1 человека в сутки.

При отсутствии фактических данных по упаковке производных продуктов принято расчётное допущение: процентное соотношение массы и объёма нетто ~85 % к массе и объёму брутто ЛРП. В Таблице 5 представлены средние показатели вариантов замены основных макронутриентов нетрадиционными производными белков, жиров и углеводов.

Таблица 5

Основные характеристики рационов питания: FSR, ИРП и перспективный ЛРП (примерные варианты)

Наименование рациона питания	Основные макронутриенты, %			ЭЦ	Масса нетто / брутто	Объём нетто / брутто
	Белки	Жиры	Углеводы	ккал	г	см ³
FSR	12	39	52	2844	1130	2832
Норма № 7	17,6	32,0	50,4	4257	1658 / 2100	4394
Вариант ЛРП № 1	30–35	–	65–70	2982	784 / 902	1020 / 1173
Вариант ЛРП № 2	30	6–10	60–64	3168	776 / 892	1007 / 1158
Вариант ЛРП № 3	30–35	–	65–70	2694	698 / 803	934 / 1074

¹² МР 2.3.1.2432–08. Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации. (2009).

¹³ Приложение № 3. Рационы питания. ГАРАНТ. <https://base.garant.ru/55172034/59024ce80075e0ec41e6a94e1d33ae69/>

Экономическая целесообразность

Стоимость белковых производных

С точки зрения цены для комплектования ЛРП очевидным выбором будут белковые производные из источников сырья растительного происхождения. Оценивая функциональность и цены белковых продуктов выделяют «новый потенциал» источников белков, таких как: трава, листья свеклы, бобовые (горох, люцерна), злаки (амарант, лебеда), водная биомасса (морские водоросли и микроводоросли), насекомые (мучной червь) и единичные клеточные белки или белки одноклеточных организмов (грибы, бактерии, дрожжи) (Voudouris et al., 2017). Данная оценка, представленная специалистами Вагенингенского университета (Wageningen University & Research), касается источников сырья для производства белковых продуктов, а объективную оценку их перспектив возможно будет получить при последующих сравнительных исследованиях LCA (оценка жизненного цикла) получаемых из них продуктов.

В рамках данной статьи возможно представить данные предварительной оценки стоимости конечных продуктов на примере гидролизатов соевых белков. Прогнозируемая отпускная цена (планируемая производственная себестоимость продукции, основанная на методе калькуляции) предприятия-производителя рассчитана, исходя из показателя доли затрат на сырьё в общих затратах на производство (стоимость сырья и основных материалов за вычетом отходов, стоимость вспомогательных материалов) определялась на основании рыночных цен сырья для производства, количество – на основании массового баланса при производстве аналогичных продуктов (гидролизаты соевого белка) (Gupta, 2015). Доля основных затрат на сырьё для предприятий пищевой промышленности ~47–48 %, использовались для расчёта производственной себестоимости (Wilting & Napemaaijer, 2014). Таким образом, расчётная прогнозируемая цена белковых производных составит приблизительно 2350 руб./кг. Аналогичные по качественным характеристикам продукты представлены на рынке Китая по цене приблизительно от 15 \$/кг¹⁴.

В контексте вопроса стоимости белковых производных важной представляется методология, которая включает качество и количество белка с использованием показателя DIAAS, при проведении сравнений на основе результатов LCA для наиболее распространенных источников белка. Новый способ оценки пищевых продуктов

показал, что протеиновые порошки обеспечивают наилучшую эффективность (Berardy et al., 2019).

Сравнительная стоимость белка

При значительной разнице в содержании белка в традиционных и нетрадиционных продуктах, цена 1 кг белка является более информативным показателем для стоимостного сравнения. Цена белковых производных – предполагаемая цена поставки в рамках оборонного заказа. Цена традиционных консервированных продуктов, входящих в состав ИРП, – минимальная цена предложения от поставщиков (обоснование начальных цен единиц товара), на условиях тендеров на поставку продовольственного обеспечения в рамках государственного оборонного заказа. В Таблице 6 представлены сравнительные ценовые параметры белокосодержащих продуктов и белковых производных.

Таблица 6
Сравнительная стоимость белка в основных белокосодержащих продуктах ИРП и белковых производных

Продукты	Содержание белка, г/кг	Цена, руб./кг	
		Продукта	Белка
ИРП — консервы:			
«Говядина тушеная», высший сорт	168,0	498,28	2966,0
«Говядина в бульоне» (и др. варианты)	168,0	316,67	1885,0
Мясоовощные «Говя- дина с картофелем»	87,3	152,63	1748,3
Мясные фаршевые из свинины «Фарш»	132,0	184,80	1400,0
Средняя цена по группе			2000,0
Рыбные натуральные «Скумбрия»	177,0	316,54	1788,0
Рыбные натуральные «Горбуша»	205,0	600,81	2874,7
Новый вариант — ЛРП:			
Белковые произво- дные	900,0	2350,0	2500,0

Примечание. * Источники: Тендер на продовольствие в ассортименте¹⁵

¹⁴ Соевый Пептид — Buy Soy Peptide, Soybean Peptide Powder, Health And Beauty Collagen Product on Alibaba.com. (2023, March 18). <https://russian.alibaba.com/p-detail/Soy-1600085030849.html?s=p>

¹⁵ Тендер на продовольствие в ассортименте Продовольственное обеспечение. 63121398. Ростендер. (2023, March 18). <https://rostender.info/tender/63121398>

Предполагаемый экономический эффект

Снижение логистических затрат

Затраты на логистику могут составлять от 25 % до 45 % в общих затратах, а в цене на продукцию до 20 %, в зависимости от отрасли и вида деятельности (Andrejić et al., 2018). Затраты на логистику – сумма всех затрат, предпринятых для того, чтобы сделать продукцию доступной для конечного потребителя: транспортные расходы – 58 %, затраты на хранение запасов – 23 %, складские расходы – 11 %, административные расходы – 8 % (Comtois & Slack, 2009). Масштабы РФ значительным образом влияют на стоимость логистических затрат. Россия входит в число стран с высоким уровнем логистических издержек, в валовом внутреннем продукте РФ доля логистических издержек достигает до 19 % при среднемировом показателе в 11,7 %¹⁶. Сокращение или оптимизация затрат на содержание запасов – прямая прибыль.

Экономическую выгоду от их использования возможно оценить, как экономию денежных средств от снижения логистических затрат. Предварительную оценку снижения логистических затрат от использования ЛРП возможно провести, опираясь на данные закупочной цены ИРП. На основании проведенного анализа рынка и расчётов НМЦК (начальная максимальная цена контракта) для ИРП (норма № 7) на 04.2022 года составляла 939,5 руб.¹⁷. Возможно спрогнозировать, что последующие логистические издержки составят дополнительно от 11,7 % до 19 % к закупочной стоимости ИРП или от 109,9 руб до 178,5 руб. При установленной штатной численности военнослужащих (Указ Президента РФ от 25.08.2022 года № 575) – 1 150 628 человек, логистические издержки, только на однодневный комплект (одну сутодачу) ИРП, составят от 126 454 017 до 205 387 098 руб. Использование варианта ЛРП на основе производных белков и углеводов приведёт к минимальному снижению затрат (данные таблицы 9) в 2 раза, а экономия составит от 63 227 008 до 102 693 549 руб.

Снижение закупочной цены

Экономическую выгоду от использования ЛРП возможно оценить и как экономию денежных средств от снижения закупочной цены ЛРП по отношению к закупочной цене ИРП. Предполагаемая стоимость различных вариантов ЛРП (стоимость макронутриентов, без стоимости

упаковки и стоимости витаминов) составит приблизительно 700–800 руб, что также возможно будет способствовать получению дополнительной экономической выгоды.

ОБСУЖДЕНИЕ

Представленные в таблице 5 предполагаемые варианты формирования пищевой матрицы ЛРП на основе порошковых форм гидролизатов белков, углеводов и жиров, безусловно, требуют подтверждения последующими научно-практическими исследованиями, которые позволят определить конкретные параметры рациона с учётом оценки статуса питания военнослужащих.

Прогнозный вариант минимального снижения, как и возможное ещё большее снижение необходимого количества порошковых форм макронутриентов, обосновываются, прежде всего, качественными различиями между нативными, интактными и гидролизованнами белками. Синергетический эффект от использования белковых производных, в сравнении с традиционными продуктами заключается: в более высокой скорости переваривания и всасывания, что приводит к большей доступности аминокислот в плазме и большей реакции синтеза мышечного белка (MPS, стимуляция MPS являются ключом к ослаблению физической нагрузки); реакцией на потребление обработанной пищи и связанным с этим снижением расхода энергии, необходимой на различные этапы переработки питательных веществ (переваривания, всасывания, транспорта, метаболизма и накопления) или, так называемым, термическим эффектом пищи (DIT); возможностью рассматривать эти продукты в качестве источника энергии так же как углеводы и жиры; многофункциональной биологической активностью.

Одним из потребительских сегментов, в котором широко применяются белковые производные, спортивное питание. Часть различных факторов стресса и физические нагрузки в спорте сопоставимы или коррелируют с таковыми у военнослужащих. Известны эффекты снижения усталости, боли в суставах, ускорения процессов реабилитации, улучшения функциональных параметров спортсменов, подтверждающихся биохимическими маркерами крови, и другие положительные результаты.

¹⁶ Доля логистических издержек в ВВП РФ достигает до 19 % при среднемировом показателе в 11,7 % – мнение. (2023, March 18). <https://www.rzd-partner.ru/logistics/news/dolia-logisticheskikh-izderzhek-v-vvp-rf-dokhodit-do-19--pri-srednemirovom-pokazatele-v-11-7---mnenie/>

¹⁷ Тендер на поставку сухих пайков, г.о. Звенигород, Московская область. 59730350. Ростендер. (2023, March 18). <https://rostender.info/region/moskovskaya-oblast/zvenigorod/59730350-tender-postavka-suhih-pajkov>

Использование в пищевой матрице верхнего рекомендованного диапазона белка, направленного на нивелирование изменения метаболизма белков, вызываемого факторами стресса, имеет ещё один важный аспект. Гипотеза белкового рычага (Simpson & Raubenheimer, 2005), авторы которой выдвинули логичное предположение, что потребление белка оказывает значительно большее влияние, чем потребление энергии, позднее была подтверждена исследовательскими данными. Результаты 12-ти дневного рандомизированного перекрестного исследования использования диет, содержащих 5 % (низкое), 15 % (нормальное) и 30 % (высокое) энергии из белка (использовались два различных изолята белка: сывороточного и соевого) показали, что общее потребление энергии было значительно ниже в условиях использования диеты с высоким содержанием белка ($7,21 \pm 3,08$ МДж/день), чем в условиях с низким содержанием белка ($9,33 \pm 3,08$ МДж/день) и нормальным содержанием белка ($9,62 \pm 3,51$ МДж/день) и, хотя средний энергетический баланс отличался, потеря массы тела существенно не различалась (Martens et al., 2013). Значительное снижение потребляемой энергии при увеличении доли белка по отношению к другим макронутриентам, показанная в данном исследовании, находит подтверждение и в популяционных условиях (Grech et al., 2022).

Представленные варианты примерного состава основных макронутриентов ЛРП на основе производных белков, углеводов и жиров в части показателя энергетической ценности, основаны на рекомендациях ФАО (2003) по использованию показателя метаболизируемой энергии (МЕ)¹⁸. Но, как и показанные в рекомендациях концептуальные различия между МЕ и чистой метаболизируемой энергией (NME), так и исследовательские данные других авторов (не представлены в тексте статьи), дают основания для прогнозирования снижения необходимого количества МЕ рациона питания при использовании производных продуктов, обусловленных, прежде всего, физико-химическими и структурными характеристиками белковых гидролизатов.

Существующие технические характеристики и дополнительные возможности (опции) технологического оборудования, используемого при наполнении и упаковке порошкообразных продуктов, способны привести к улучшению показателей насыпной плотности и, как следствие, потенциальному снижению общего объёма рациона.

Гидролизаты белков относятся к продуктам с низким содержанием влаги и других веществ, которые оказывает значительное влияние на стабильность при хранении. Использование специальной герметичной упаковки позволяет хранить продукцию не менее 5 лет¹⁹.

Использование БПЛА в ходе ведения боевых действий увеличивает зону эффективного артиллерийского поражения до 40–60 км. Приготовление пищи с использованием технических средств продовольственной службы (полевые кухни и др.) и последующая её доставка в подразделения, и ранее являющееся демаскирующим фактором, в настоящее время становятся ещё более затруднительными. Западные авторы, анализируя СВО, отмечают значительный урон, наносимый в том числе подразделениям МТО (материально-технического обеспечения) за счёт корректировки огня от БПЛА. Но, БПЛА так же возможно использовать и для доставки ЛРП и боеприпасов. Таким образом, необходимость варианта ЛРП в общей номенклатуре ИРП, предоставляющего большие возможности для автономности и мобильности военнослужащим, становится крайне важной задачей в части продовольственного обеспечения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Задачи минимизации массогабаритных размеров и обеспечения адекватного количества питательных веществ, необходимых военнослужащим, возможно решить наиболее эффективно, используя нетрадиционные продукты. ЛРП, сформированный из них, способен обеспечить новый уровень автономности и мобильности военнослужащих и, практически, не имеет альтернативных вариантов при существующем уровне технических решений. Одновременно решается задача развития военной организации по совершенствованию военно-экономического обеспечения военной организации на основе рационального использования финансовых, материальных и иных ресурсов²⁰.

Продукция, используемая в целях обеспечения безопасности страны, должна производиться в данной стране. Представленный концептуальный задел – одно из оснований необходимости создания в Российской Федерации отечественного инновационного производства высококачественных белковых производных из источников сырья различного происхождения. Очевидно, что производственный потенциал и продукция предпри-

¹⁸ Food, F. F. (2003). Nutrition Paper 77: Food Energy—Methods of Analysis and Conversion Factors. FAO: Rome, Italy.

¹⁹ Proyield® Soy SE50MAF-UF. <https://www.frieslandcampinaingredients.com/segment/cell-nutrition/ingredients/proyield-soy-se50maf-uf/>

²⁰ Российская газета. (2023, March 18). Военная доктрина Российской Федерации — Российская газета. <https://rg.ru/documents/2014/12/30/doktrina-dok.html>

ятия будут востребованы: в других структурах, обеспечивающих безопасность страны, в системе Росрезерва (Федеральное агентство по государственным резервам) для создания мобилизационных резервов. Широкие возможности предоставляются для создания новых вариантов отечественных продуктов специализированно-

го питания: спортивного, диетического лечебного и профилактического, энтерального, диабетического и др., что в целом способствует достижению главных национальных приоритетов России по укреплению здоровья и улучшению качества жизни граждан²¹.

ЛИТЕРАТУРА

- Бурмистров, Г. П., & Давыденко С. И. (2021). Совершенствование питания военнослужащих в условиях Арктики и жаркого климата, когда приготовление горячей пищи не представляется возможным. *Материально-техническое обеспечение Вооружённых сил Российской Федерации*, (8), 13–17.
- Доморощенкова, М. Л., Хайес, Д., & Шушкевич, А. Ю. (2014). Структурная модификация белков сои как перспективная био-и нанотехнология. *Вестник Всероссийского научно-исследовательского института жиров*, (2), 30–35.
- Логаткин, М. Н. (1973). Субкалорийные пищевые рационы. *Военно-медицинский журнал*, 294(11), 52–55.
- Новиков, В. С., Каркищенко, В. Н., & Шустов, Е. Б. (2017). *Функциональное питание человека при экстремальных воздействиях*. Политехника-принт.
- Новиков, В. С., Сороко, С. И., & Шустов, Е. Б. (2017). Функциональное питание человека для повышения переносимости экстремальных климатических воздействий. *Вестник образования и развития науки Российской академии естественных наук*, (2), 106–117.
- Уголев, А. М. (1991). *Теория адекватного питания и трофология*. Наука технический прогресс.
- Шаронов, А. Н., Сиваков, А. С., & Луконин, В. А. (2018). Некоторые аспекты продовольственного обеспечения военнослужащих армии США. *Научные проблемы материально-технического обеспечения Вооружённых Сил Российской Федерации*, (2), 128–143.
- Шаронов, А. Н., Лопатин, С. А., Шаронов, Е. А., & Квашнина, Е. Б. (2020). Продовольственные пайки военнослужащих армий иностранных государств. *Научный вестник Вольского военного института материального обеспечения: военно-научный журнал*, (2), 27–37.
- Andrejić, M., Bojović, N., Kilibarda, M., & Nikolić, S. (2018). A framework for assessing logistics costs. *The International Journal of Logistics Management*, 27, 770–794.
- Barrett, A. H., & Cardello, A. V. (2012). *Military food engineering and ration technology*. DEStech Publications, Inc.
- Berardy, A., Johnston, C. S., Plukis, A., Vizcaino, M., & Wharton, C. (2019). Integrating protein quality and quantity with environmental impacts in life cycle assessment. *Sustainability*, 11(10), 2747. <https://doi.org/10.3390/su11102747>
- Comtois, C., & Slack, B. (2009). *The geography of transport systems*. Routledge.
- Chen, G., Wang, L., Zhang, F., Li, C., & Kan, J. (2015). Effect of superfine grinding on physicochemical properties of mulberry leaf powder. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 31(24), 307–314. <https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2015.24.046>
- Drewnowski, A. (2005). Concept of a nutritious food: toward a nutrient density score. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 82(4), 721–732.
- Erdman J. W., Bistrian, B., Clarkson, P., Dwyer, J., Klein, B., Lane, H., Manore, M., O'Neil, P., Russel, R., Tepper, B., Tipton, K., & Yates, A. (2006). *Nutrient composition of rations for short-term, high-intensity combat operations*. The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/11325>
- Grech, A., Sui, Z., Rangan, A., Simpson, S. J., Coogan, S. C. P., & Raubenheimer, D. (2022). Macronutrient (im)balance drives energy intake in an obesogenic food environment: An ecological analysis. *Obesity*, 30(11), 2156–2166. <https://doi.org/10.1002/oby.23578>
- Gupta, A. J. (2015). *Correlating composition and functionality of soy protein hydrolysates used in animal cell cultures* [Doctoral dissertation, Wageningen University and Research]. Wageningen, Netherlands.
- Hansen, R. G., Wyse, B. W., & Sorenson, A. W. (1979). *Nutritional quality index of foods*. AVI Publishing Co. Inc.
- Institute of Medicine (US) Committee on Military Nutrition Research. (1999). *The Role of Protein and Amino Acids in Sustaining and Enhancing Performance*. National Academies Press (US).

²¹ Герейханова, А. (1970, January 20). «Повышение качества жизни россиян — первоочередная забота власти». О чем Владимир Путин говорил парламентариям в Таврическом дворце. *Российская Газета*. <https://rg.ru/2023/04/28/o-chem-vladimir-putin-govoril-parlamentariam-v-tavricheskom-dvorce.html>

- Langyan, S., Yadava, P., Khan, F. N., Dar, Z. A., Singh, R., & Kumar, A. (2022). Sustaining protein nutrition through plant-based foods. *Frontiers in Nutrition*, 8, 1237. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.772>
- Manore, M. M. (2005). Exercise and the Institute of Medicine recommendations for nutrition. *Current Sports Medicine Reports*, 4(4), 193-198. <https://doi.org/10.1007/s11932-005-0034-4>
- Martens, E. A., Lemmens, S. G., & Westerterp-Plantenga, M. S. (2013). Protein leverage affects energy intake of high-protein diets in humans. *The American journal of clinical nutrition*, 97(1), 86-93. <https://doi.org/10.3945/ajcn.112.046540>
- Montain, S. J., Baker-Fulco, C. J., Niro, P. J., Reinert, A. R., Cuddy, J. S., & Ruby, B. C. (2008). Efficacy of eat-on-move ration for sustaining physical activity, reaction time, and mood. *Medicine and science in sports and exercise*, 40(11), 1970-1976. <http://dx.doi.org/10.1249/MSS.0b013e31817f4d58>
- Petrov, A. N., Galstyan, A. G., Radaeva, I. A., Turovskaya, S. N., Illarionova, E. E., Semipyatniy, V. K., Khurshudyan, S. A., DuBuske, L. M., & Krikunova, L. N. (2017). Indicators of quality of canned milk: Russian and international priorities. *Foods and Raw Materials*, 5(2), 151-161. <http://dx.doi.org/10.21603/2308-4057-2017-2-151-161>
- Saw, H. Y., Davies, C. E., Paterson, A. H., & Jones, J. R. (2013). The influence of particle size distribution and tapping on the bulk density of milled lactose powders. *Chemeca: Challenging Tomorrow*, 299
- Simpson, S. J., & Raubenheimer, D. (2005). Obesity: the protein leverage hypothesis. *obesity reviews*, 6(2), 133-142
- Syll, O., Khalloufi, S., & Schuck, P. (2013). Dispersibility and morphology of spray-dried soy powders depending on the spraying system. *Dairy Science & Technology*, 93, 431-442. <http://dx.doi.org/10.1007/s13594-013-0112-y>
- Treaty, N. A. (2010). Nutrition Science and Food Standards for Military Operations. *Environment*, 5, 2.
- Trumbo, P., Yates, A. A., Schlicker, S., & Poos, M. (2001). Dietary reference intakes. *Journal of the American Dietetic Association*, 101(3), 294-294. [https://doi.org/10.1016/S0002-8223\(01\)00078-5](https://doi.org/10.1016/S0002-8223(01)00078-5)
- Trumbo, P., Schlicker, S., Yates, A. A., & Poos, M. (2002). Dietary reference intakes for energy, carbohydrate, fiber, fat, fatty acids, cholesterol, protein and amino acids. *Journal of the American Dietetic Association*, 102(11), 1621-1630. [https://doi.org/10.1016/S0002-8223\(02\)90346-9](https://doi.org/10.1016/S0002-8223(02)90346-9)
- Voudouris, P., Tenorio, A. T., Lesschen, J. P., Kyriakopoulou, K., Sanders, J. P., van der Goot, A. J., & Bruins, M. E. (2017). *Sustainable protein technology: An evaluation on the STW Protein programme and an outlook for the future* (No. 1786). Wageningen Food & Biobased Research.
- Wiltling, H., & Hanemaaijer, A. (2014). *Share of raw material costs in total production costs*. PBL publication number 1506, PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. <https://www.researchgate.net/publication/268791925>
- Zhang, X., Li, Y., Li, J., Liang, H., Chen, Y., Li, B., Luo, X., Pei, Y., & Liu, S. (2022). Edible oil powders based on spray-dried Pickering emulsion stabilized by soy protein/cellulose nanofibrils. *LWT*, 154, 112605. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112605>

REFERENCES

- Burmistrov, G. P., & Davydenko, S. I. (2021). Nutrition improvement of military personnel in the Arctic and hot climates, when cooking hot food is not possible. *Material'no-tekhnicheskoye obespecheniye Vooruzhennykh sil Rossiyskoy Federatsii* [Logistics of the Armed Forces of the Russian Federation], (8), 13-17.
- Domoroschenkova, M. L., Hayes, D., & Shushkevich, A. Yu. (2014). Structural modification of soybean proteins as a promising bio- and nanotechnology. *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zhirov* [Bulletin of the All-Russian Research Institute of Fats], (2), 30-35.
- Logatkin, M. N. (1973). Subcaloric diets. *Voyenno-meditsinskiy zhurnal* [Military medical journal], 294(11), 52-55.
- Novikov, V. S., Soroko, S. I., & Shustov, E. B. (2017). Functional human nutrition to increase tolerance to extreme climate impacts. *Vestnik obrazovaniya i razvitiya nauki Rossiyskoy akademii yestestvennykh nauk* [Bulletin of Education and Science Development of the Russian Academy of Natural Sciences], (2), 106-117.
- Sharonov, A. N., Sivakov, A. S., & Lukonin, V. A. (2018). Some aspects food supply for the US Army. *Nauchnyye problemy material'no-tekhnicheskoye obespecheniya Vooruzhennykh Sil Rossiyskoy Federatsii* [Scientific problems of logistics of the Armed Forces of the Russian Federation], (2), 128-143.
- Sharonov, A. N., Lopatin, S. A., Sharonov, E. A., & Kvashnina, E. B. (2020). Food rations for military personnel of the armies of foreign states. *Nauchnyy vestnik Vol'skogo voyennogo instituta material'nogo obespecheniya: voyenno-nauchnyy zhurnal* [Scientific Bulletin of the Volsk Military Institute of Logistics: Military Scientific Journal], (2), 27-37.

- Andrejić, M., Bojović, N., Kilibarda, M., & Nikoličić, S. (2018). A framework for assessing logistics costs. *The International Journal of Logistics Management*, 27, 770-794.
- Berardy, A., Johnston, C. S., Plukis, A., Vizcaino, M., & Whar-ton, C. (2019). Integrating protein quality and quantity with environmental impacts in life cycle assessment. *Sustainability*, 11(10), 2747. <https://doi.org/10.3390/su11102747>
- Chen GuangJing, Wang LiSha, Zhang FuSheng, Li CuiLing, & Kan JianQuan (2015). Effect of superfine grinding on physicochemical properties of mulberry leaf powder. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 31(24), 307-314. <http://dx.doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2015.24.046>
- Drewnowski, A. (2005). Concept of a nutritious food: toward a nutrient density score. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 82(4), 721-732.
- Grech, A., Sui, Z., Rangan, A., Simpson, S. J., Coogan, S. C. P., & Raubenheimer, D. (2022). Macronutrient (im)balance drives energy intake in an obesogenic food environment: An ecological analysis. *Obesity*, 30(11), 2156-2166. <https://doi.org/10.1002/oby.23578>
- Langyan, S., Yadava, P., Khan, F. N., Dar, Z. A., Singh, R., & Kumar, A. (2022). Sustaining protein nutrition through plant-based foods. *Frontiers in Nutrition*, 8, 1237. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.772>
- Manore, M. M. (2005). Exercise and the Institute of Medicine recommendations for nutrition. *Current sports medicine reports*, 4(4), 193-198. <https://doi.org/10.1007/s11932-005-0034-4>
- Martens, E. A., Lemmens, S. G., & Westerterp-Plantenga, M. S. (2013). Protein leverage affects energy intake of high-protein diets in humans. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 97(1), 86-93. <https://doi.org/10.3945/ajcn.112.046540>
- Montain, S. J., Baker-Fulco, C. J., Niro, P. J., Reinert, A. R., Cuddy, J. S., & Ruby, B. C. (2008). Efficacy of eat-on-move ration for sustaining physical activity, reaction time, and mood. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 40(11), 1970-1976. <http://dx.doi.org/10.1249/MSS.0b013e31817f4d58>
- Petrov, A. N., Galstyan, A. G., Radaeva, I. A., Turovskaya, S. N., Illarionova, E. E., Semipyatniy, V. K., Khurshudyan, S. A., DuBuske, L. M., & Krikunova, L. N. (2017). Indicators of quality of canned milk: Russian and international priorities. *Foods and Raw Materials*, 5(2), 151-161. <http://dx.doi.org/10.21603/2308-4057-2017-2-151-161>
- Saw, H. Y., Davies, C. E., Paterson, A. H., & Jones, J. R. (2013). The influence of particle size distribution and tapping on the bulk density of milled lactose powders. *Chemeca: Challenging Tomorrow*, 299.
- Simpson, S. J., & Raubenheimer, D. (2005). Obesity: the protein leverage hypothesis. *Obesity Reviews*, 6(2), 133-142.
- Syll, O., Khalloufi, S., & Schuck, P. (2013). Dispersibility and morphology of spray-dried soy powders depending on the spraying system. *Dairy Science & Technology*, 93, 431-442. <http://dx.doi.org/10.1007/s13594-013-0112-y>
- Trumbo, P., Yates, A. A., Schlicker, S., & Poos, M. (2001). Dietary reference intakes. *Journal of the American Dietetic Association*, 101(3), 294-294. [https://doi.org/10.1016/S0002-8223\(01\)00078-5](https://doi.org/10.1016/S0002-8223(01)00078-5)
- Trumbo, P., Schlicker, S., Yates, A. A., & Poos, M. (2002). Dietary reference intakes for energy, carbohydrate, fiber, fat, fatty acids, cholesterol, protein and amino acids. *Journal of the American Dietetic Association*, 102(11), 1621-1630. [https://doi.org/10.1016/S0002-8223\(02\)90346-9](https://doi.org/10.1016/S0002-8223(02)90346-9)
- Wilting, H., & Hanemaaijer, A. (2014). *Share of raw material costs in total production costs*. PBL publication number 1506, PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. <https://www.researchgate.net/publication/268791925>
- Zhang, X., Li, Y., Li, J., Liang, H., Chen, Y., Li, B., Luo, X., Pei, Y., & Liu, S. (2022). Edible oil powders based on spray-dried Pickering emulsion stabilized by soy protein/cellulose nanofibrils. *LWT*, 154, 112605. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112605>

Интеллектуальная упаковка для овощей и фруктов, классификация и перспективы использования: Обзор предметного поля

Л.Ч. Бурак, А.Н. Сапач, М.И. Писарик

ООО «БЕЛПРОСАКВА»,
Республика Беларусь

Корреспонденция:

Бурак Леонид Чеславович
ООО «Белпросаква»,
220015, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Пономаренко, 35а
E-mail: leonidburak@gmail.com

Конфликт интересов:

авторы сообщают об отсутствии
конфликта интересов

Поступила: 07.04.2023

Поступила после

рецензирования: 30.05.2023

Принята: 31.05.2023

Copyright: © 2023 Авторы

АННОТАЦИЯ

Введение. Упаковка пищевых продуктов имеет важное значение для предотвращения загрязнения пищевых продуктов химическими веществами, физического повреждения, пыли, воздействия температуры, света, влажности и микроорганизмов.

Цель статьи выполнить обзор интеллектуальных методов упаковки фруктов и овощей, анализ последних достижений в области целевых метаболитов, которые применяют для обнаружения в интеллектуальной упаковке.

Материалы и методы. В обзор включены зарубежные статьи опубликованные на английском языке за период 2010–2022 год. Поиск зарубежной научной литературы проводили в библиографических базах Google Scholar, Scopus, Web of Science, Elsevier, ResearchGate. При отборе публикаций для обзора приоритет отдавали высокоцитируемым источникам.

Результаты. Установлено, что интеллектуальные упаковочные системы применяются для мониторинга в режиме реального времени фруктов и овощей, мясных и молочных продуктов в цепочке поставок, посредством взаимодействия между небольшими компонентами внутри упаковки, такими как колориметрические индикаторные этикетки, датчики и целевые ответчики для предоставления информации о качестве продукта и параметрах окружающей среды.

Выводы. Несмотря на преимущества инновационной упаковки, включающей в себя повышение эффективности использования продуктов и пищевого сырья и минимизацию отходов, существуют проблемы, препятствующие широкому промышленному внедрению данной упаковки для фруктов и овощей. В первую очередь необходимо учитывать безопасность интеллектуальных компонентов упаковки, включая миграцию химических красителей в колориметрических индикаторных этикетках и химических датчиках, а также возможность химического взаимодействия между интеллектуальными упаковочными материалами и пищевыми компонентами. В настоящее время производство интеллектуальной упаковки для фруктов и овощей сосредоточено в основном в небольших лабораториях и не учитывает производственные затраты. Для снижения стоимости интеллектуальных упаковочных материалов и обработки необходимы дальнейшие научные изыскания и более глубокие исследования. Кроме того, в дальнейшем необходимо решать вопросы, связанные с оценкой безопасности, правовым регулированием, управлением затратами и другими факторами, с целью максимального использования интеллектуальной упаковки в условиях промышленного производства и реализации продуктов потребителю.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

упаковка, интеллектуальная упаковка, индикаторные этикетки, пленки, датчики, биосенсоры, наночастицы



Для цитирования: Бурак, Л. Ч., Сапач, А. Н., & Писарик, М. И. (2023). Интеллектуальная упаковка для овощей и фруктов, классификация и перспективы использования. *Health, Food & Biotechnology*, 5(1), 51–80. <https://doi.org/10.36107/hfb.2023.i1.s165>

<https://doi.org/10.36107/hfb.2023.il.s165>

Intelligent Packaging For Vegetables And Fruits, Classification And Use Prospects: Scoping Review

Leonid Ch. Burak , Aleksandr N. Sapach , Maksim I. Pisarik

LLC "BELROSAKVA", Republic of Belarus

Correspondence:

Leonid Ch. Burak,
Belrosakva LLC, 35a, Ponomarevko St.,
Minsk, 220015, Republic of Belarus
E-mail: leonidburak@gmail.com

Declaration of competing interest:
none declared.

Received: 07.04.2023

Received in revised form: 30.05.2023

Accepted: 31.05.2023

Copyright: © 2023 The Authors

ABSTRACT

Introduction. Vegetables and fruits are subject to deterioration in quality due to their metabolism and adverse environmental influences. The physiological and compositional changes that occur during post-harvest storage create additional opportunities for microbial contamination, which is another key element of quality degradation. Therefore, the development of economical post-harvest technologies to reduce spoilage is of ongoing interest to researchers. Food packaging is essential to prevent food contamination by chemicals, physical damage, dust, temperature, light, humidity and microorganisms, which is an effective means of extending shelf life and reducing food loss and spoilage. The purpose of this article is to review recent advances in target metabolites for smart fruit and vegetable packaging.

Materials and Methods. The review includes foreign articles published in English from 2010 to 2022. Google Scholar, Scopus, Web of Science, ResearchGate were used for the search and further analysis. When selecting publications for review, priority was given to highly cited sources.

Results. Conventional packaging is designed to protect fruits and vegetables from the environmental impact. Intelligent packaging systems being a new field in food packaging are applied to real-time monitoring of products ranging from fruits and vegetables to meat and dairy products in the supply chain through the interaction between small components inside packaging (e.g. colorimetric indicator labels, sensors) and targeted transponders to provide suppliers and consumers with accurate information about product quality and the environment. Despite many benefits of such innovative food packaging, including increased efficiency in the use of products and food raw materials, reduced food safety concerns, and minimization of waste, there are many challenges to be overcome for the expansion and commercialization of smart fruit and vegetable packaging. First of all, the safety of smart packaging components must be considered, including the migration of chemical dyes in colorimetric indicator labels and chemical sensors, as well as the possibility of chemical interaction between smart packaging materials and food components. At present, the production of smart packaging for fruits and vegetables is predominantly concentrated in small laboratories without taking into account production costs. Industrial adoption has been problematic because the inclusion of smart meter components has made cost increases inevitable. Further deeper scientific research is needed to reduce the cost of smart packaging materials and processing.

Conclusion. Intelligent active packaging is designed and used to monitor fruit and vegetable quality, safety and environmental conditions in real time, both to quickly identify fruit and vegetable quality defects and to provide visual and up-to-date information. In future, active packaging can be incorporated into intelligent packaging systems to facilitate quality control while providing antibacterial, antioxidant and other protective properties. However, further research should be aimed at solving problems related to safety assessment, legal regulation, cost management and other factors in order to maximize use in industrial production.

KEYWORDS

packaging, smart packaging, indicator labels, films, sensors, biosensors, nanoparticles



To cite: Burak, L. Ch., Sapach, A. N., & Pisarik, M. I. (2023). Intelligent packaging for vegetables and fruits, classification and prospects for use. *Health, Food & Biotechnology*, 5(1), 51–80. <https://doi.org/10.36107/hfb.2023.il.s165>

ВВЕДЕНИЕ

Согласно результатам исследования ФАО, во всем мире теряется или выбрасывается примерно треть продуктов питания, производимых для потребления человеком, что соответствует примерно 1,3 млрд тонн в год. Так, например в 2019 году в мире, по данным ФАО с момента сбора до розничной реализации¹ потери продуктов питания составили около 14 %. Фрукты и овощи являются важным компонентом пищи, богатыми витаминами, минералами, пищевыми волокнами, полифенолами и другими питательными веществами, играющими жизненно важную роль в обеспечении потребителей во всем мире свежими, питательными и полезными продуктами (Alegbeleye et al., 2022). Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) рекомендует каждому человеку потреблять не менее 400 г фруктов и овощей каждый день (FAO, 2021). Между тем, свежие фрукты и овощи подвержены порче, вызывая образование отходов и экономические потери. 2021 год был объявлен Генеральной Ассамблеей Организации Объединенных Наций Международным годом фруктов и овощей, в целях содействия здоровому и устойчивому производству фруктов и овощей с помощью инноваций и технологий, а также сведения к минимуму потерь и отходов (FAO, 2021). Подсчитано, что примерно 40–50 % фруктов и овощей ежегодно используется неэффективно (Jung et al., 2020), преимущественно из-за послеуборочного физиологического метаболизма (дыхания и транспирации), неправильных условий хранения (например, газовая среда, температура и влажность) и порчи, вызванной размножением микробов (Perumal et al., 2022). В частности, нарушение температурного режима, влажность и загазованность могут изменить физиологический метаболизм самих овощей и фруктов, что, в свою очередь, может ускорить порчу (Gao et al., 2020; Liang et al., 2022). Кроме того, физиологические процессы, которые происходят во время послеуборочного хранения, создают дополнительные возможности для заражения микробами (особенно грибами), что является еще одним ключевым элементом ухудшения качества плодоовощного сырья. Таким образом, разработка экономичных послеуборочных технологий для уменьшения порчи овощей и фруктов за счет воздействия на эти факторы представляет постоянный интерес для исследователей (Shu et al., 2020; Zhang 2019; Jiang et al., 2020, 2021).

Следует отметить, что соответствующая технология упаковки для овощей и фруктов не только сводит к минимуму микробиологические и химические опасности для сохранения свежести и продления срока хранения, но также позволяет эффективно контролировать процесс во время транспортировки, хранения и продажи,

обеспечивая удобство как для бизнеса, так и для потребителей, тем самым повышая качество плодоовощного сырья и сокращая количество отходов. Упаковка имеет важное значение для предотвращения загрязнения пищевых продуктов химическими веществами, механического повреждения, пылью, температурой, светом, влажностью и микробами, что является эффективным средством продления срока хранения и сокращения пищевых потерь и порчи. В результате технологических инноваций и изменения потребительских предпочтений упаковка фруктов и овощей претерпела изменения, от обычной упаковки с газовым регулированием к повсеместно распространенной интеллектуальной упаковке. Обычная упаковка предназначена для защиты фруктов и овощей от внешней среды, тогда как интеллектуальная упаковка раскрывает информацию о качестве фруктов и овощей, включая свежесть, спелость и микробиологическую обсемененность, с использованием индикаторных этикеток, датчиков и других технологий (de Oliveira Filho et al., 2021; Flórez et al., 2022). Соответственно, такая упаковка отслеживает изменения во внешней среде, включая изменения температуры, влажности и содержания углекислого газа, что, в свою очередь, снижает потери и отходы и повышает ценность использования (Fernandez et al., 2022).

Процессы исследования интеллектуальной упаковки для овощей и фруктов все еще находятся на ранней стадии, по сравнению с более изученными упаковками для мясных и рыбных продуктов. Исследование последних разработок в области интеллектуальной упаковки для отслеживания качества фруктов, включая датчики свежести и зрелости, было недавно опубликовано в научном обзоре (Alam et al., 2021). Потенциал интеллектуальной упаковки овощей и фруктов, включая качество пищевых продуктов, мониторинг безопасности и индикацию свежести, также проиллюстрирован в другом обзоре (Fernandez et al., 2022). Вместе с тем, по сравнению с другими пищевыми продуктами, фрукты и овощи более подвержены загрязнению, имеют ограниченный срок хранения и большие объемы отходов. Поэтому исследования по разработке интеллектуальных упаковочных систем для овощей и фруктов, в последнее время вызывают значительный интерес (Jafarzadeh et al., 2021; Jung et al., 2020). Всестороннего обзора целевых метаболитов, которые могут быть применены в интеллектуальной упаковке плодоовощного сырья, а также достижения в области классификации и практического применения интеллектуальных систем упаковки на момент написания данной статьи не установлено. Поэтому цель нашей статьи — провести обзор интеллектуальных методов упаковки фруктов и овощей, проанализировать последние достижения в области целевых метаболитов,

¹ FAO (2019). The State of Food and Agriculture 2019. Moving forward on food loss and waste reduction. Rome. License: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. Retrieved from <https://www.fao.org/state-of-food-agriculture/2019/en/>. Accessed July 1, 2022.

которые будут использоваться для обнаружения в интеллектуальной упаковке. В статье дано краткое описание механизмов взаимодействия метаболитов с упаковочными материалами, представлена классификация интеллектуальных упаковочных систем для овощей и фруктов и их соответствующие практические применения.

Целевые метаболиты для интеллектуальной упаковки фруктов и овощей

Фрукты и овощи очень подвержены физиологическому разложению, микробной порче и механическим повреждениям, вызванным эндогенными ферментами и экзогенными микроорганизмами, а также кислородом, влагой и механическим воздействием при хранении, транспортировке и реализации. Следовательно, для разработки интеллектуальных систем упаковки, способных указывать на изменение качества необходимо определить основные метаболиты, указывающие на качество, также называемые целевыми метаболитами. Для фруктов и овощей основными метаболитами/соединениями, указывающими на качество, являются диоксид углерода, этилен, альдегиды, серосодержащие летучие вещества, летучие органические кислоты, этанол и хлорофилл. Один или несколько из этих метаболитов могут быть обнаружены индикаторными системами, включающими индикаторные метки и датчики, чтобы установить изменение качества (Ghaani et al., 2016).

При определении пороговых концентраций индикаторных соединений учитывают, что они отсутствуют или присутствуют в небольших количествах во фруктах и овощах, а их концентрация увеличивается при хранении, что напрямую связано с реальной свежестью и спелостью. В целом принято считать, что изменения свежести, зрелости, микробиологической безопасности в овощах и фруктах будут точно соответствовать повышению концентрации целевых метаболитов. Установлено, что при хранении фруктов и овощей происходит резкое изменение количества углекислого газа, альдегидов, серосодержащих соединений, этилена, летучих органических кислот, этанола и летучих газов. Поскольку эти соединения используются в качестве целевых метаболитов для «умной» упаковки и мониторинга изменений качества фруктов и овощей на них следует остановиться более подробно.

Углекислота

После сбора фруктов и овощей в организме продолжается дыхание, при этом выделяется значительное количество углекислого газа, преобладающего продукта микробного метаболизма. В то же время изменения

качества фруктов и овощей, возникающие в результате роста микроорганизмов, также сопровождаются образованием углекислого газа (Luo et al., 2022). Кроме того, в ходе хранения фруктов и овощей, которые были подвержены действию бактерий и в результате процесса дыхания, может происходить повышение уровня углекислого газа в составе свободного пространства над упаковкой. Поврежденная растительная ткань в упакованных пищевых продуктах, по-видимому, имеет повышенную частоту дыхания, что истощает кислород и вызывает накопление углекислого газа в свободном пространстве упаковки, изменяя pH окружающей среды и показывая, насколько свежими являются фрукты, овощи и другие продукты питания (Choi & Han, 2018). В большинстве научных исследований учитывалось использование чувствительных к pH химических веществ или натуральных красителей для отслеживания изменений pH и образования CO₂ в качестве показателей результатов того, как интенсивно у перца (Chen et al., 2018), драконьего фрукта (Warsiki & Rofifah, 2018), грибов (Liu, Wu et al., 2022) и дыни (Lu et al., 2018) происходит процесс дыхания. В ходе исследования использовали смесь 3: 2 обычных химических красителей метилового красного и бромтимолового синего в качестве меток-индикаторов для оценки сохранения качества свеженарезанного перца. В процессе эксперимента pH снизился с 7,1 до 4,4 с увеличением содержания CO₂, что привело к изменению цвета метки с желто-зеленого на оранжевый. Между тем, количество аэробных колоний, потеря веса, содержание хлорофилла, содержание малонового диальдегида, проницаемость мембран и органолептические показатели перца почти одновременно изменились с изменением качества, отражаемым индикаторными метками. Также, в другом исследовании использовалась индикаторная этикетка с красителем метиловым красным для отслеживания изменений содержания CO₂ в упаковках фруктов дракона (Warsiki & Rofifah, 2018). С изменением содержания CO₂ в упаковке, цвет этикетки менялся с желтого на красный, а изменение цвета становилось более выраженным по мере хранения драконьего фрукта, что показывало качество хранения.

Благодаря своим свойствам и простоте производства многие новые материалы, такие как гидрогели, также используются для интеллектуальной упаковки овощей и фруктов (Cao & Mezzenga, 2020; Liu, Zhang et al., 2022; Zhao et al., 2018). Недавно был разработан самонесущий целлюлозный гидрогель, чувствительный к CO₂, который можно использовать в качестве колориметрического индикатора порчи пищевых продуктов для интеллектуальной упаковки пищевых продуктов (Lu et al., 2018). Гидрогель считался подходящим материалом для датчика CO₂, поскольку он содержит большое количество воды и в ответ на CO₂, параметры окружающей среды быстро производит протонирование. Вышеуказанный гидрогель применяли для индикации свежести

свежесрезанной дыни, и по мере увеличения времени хранения было установлено заметное изменение цвета индикатора с темно-зеленого на оранжево-желтый, что свидетельствует о значительном образовании CO_2 , связанном с размножением микробов и соответствующую порчу пищевых продуктов. Кроме того, взаимодействия белок-полисахарид были использованы во многих исследованиях, и эти взаимодействия подробно охарактеризованы в исследованиях по разделению белков и разработке систем и сенсоров стимул-реакция (Joshi et al., 2018; Kayitmazer et al., 2013). Также был подготовлен CO_2 индикатор, основанный на реакции казеината натрия и пектина, чтобы наглядно показать его применение в качестве индикатора качества пищевых продуктов (Choi & Han, 2018).

При разработке интеллектуальной упаковки необходимо учитывать основную проблему, основанную на отслеживании изменений концентрации CO_2 . Было доказано, что идентификация микробного роста с помощью CO_2 может быть неправильно истолкована при использовании для сырья, упакованных в модифицированной среде, даже несмотря на то, что концентрация CO_2 увеличивается во время хранения, в первую очередь из-за высоких концентраций, CO_2 ($\geq 20\%$) уже присутствующих в пакетах MAP (Miller et al., 2021), что является основным ограничением для дальнейшего применения. Кроме того, для различных изменений качества фруктов и овощей достигаются разные пороговые значения CO_2 , что не обеспечивает однородности в использовании.

Летучие органические кислоты

Летучие органические кислоты представляют собой жирные кислоты с прямой цепью и низким содержанием углерода, такие как муравьиная кислота, уксусная кислота и масляная кислота, которые преобладают в различных фруктах и овощах. Вместе с дыханием ферментация производит метаболиты, включающие этанол, ацетальдегид и уксусную кислоту. Впоследствии в результате ферментативной реакции фермент этанолдегидрогеназа окисляет этанол до ацетальдегида, который затем окисляется до уксусной кислоты. Следовательно, изменения pH происходят в ответ на образование летучих органических кислот (например, уксусной кислоты). Было проведено исследование, в котором этот принцип использовался для изготовления индикаторных этикеток, указывающих на свежесть гуавы (Kuswandi et al., 2013). Новый индикатор цвета упаковки на основе бромфенолового синего был получен путем иммобилизации бромфенолового синего на мембране из бактериальной целлюлозы методом абсорбции (Kuswandi et al., 2013). Гуава является плодом длительного хранения, и во время хранения летучие органические соединения (например, уксусная кислота) постепенно накапливаются в свобод-

ном пространстве упаковки с течением времени, снижая pH окружающей среды верхушки, что, в свою очередь, вызывает изменение цвета плода, видимый невооруженным глазом, которые улавливает индикатор (от синего до зеленого). Соответственно, несколько параметров, часто используемых для характеристики свежести гуавы, в том числе содержание растворимых твердых веществ, текстура и органолептическая оценка, имеют тенденцию, сравнимую с показаниями индикатора. Следует отметить, что виноград, претерпевает изменения в составе летучих органических кислот (например, малеиновой и винной кислот) во время созревания, что может быть отражено на этикетках с индикаторами упаковки, произведенных на основе хлорфенолового красного (Kuswandi & Murdyaningsih, 2017). Заметное изменение цвета индикаторной этикетки стало возможным благодаря увеличению количества сахаров во время созревания винограда, неуклонному снижению содержания летучих органических кислот в свободном пространстве упаковки и одновременным изменениям pH. Результаты исследования показали, что цвет вышеупомянутой индикаторной этикетки имеет положительную линейную связь со зрелостью винограда, что может применяться в качестве индикаторной этикетки на упаковке для мониторинга сохранения винограда.

Альдегид

При дыхании фруктов и овощей во время созревания образуется множество органических соединений, включая альдегиды, сложные эфиры, спирты, кетоны и этилен. Эти соединения применялись для определения степени свежести, зрелости, качества и безопасности фруктов и овощей с использованием неразрушающих датчиков, включая электронный нос, флуоресцентные датчики (Betemps et al., 2012), колориметрические химические датчики (Lang & Hübert, 2012) многие другие. Было проведено исследование по разработке колориметрического индикатора для обнаружения глутарового альдегида в жидкой и газовой фазах. Нижнюю сторону покрыли двухсторонней пластиковой лентой, препятствующей утечке химического вещества, а верхняя сторона содержала чувствительный к pH реагент-краситель, который непосредственно взаимодействует с альдегидом, вызывая изменение цвета. В щелочной среде альдегиды вступают в реакцию нуклеофильного присоединения или диспропорционирования, в результате которой образуется карбоновая кислота или карбоксилат, вызывая изменение щелочности (Kim et al., 2018). Этот принцип можно использовать для создания цветных индикаторов, чувствительных к альдегидам, путем включения NaOH в красители, чувствительные к pH. Альдегидная колориметрическая сенсорная этикетка, основанная на реакции Канниццаро в сочетании с красителем метиловым красным и изготовленная с использованием

чернил для печати, использовалась для мониторинга в режиме реального времени в течение срока годности упакованных яблок (Kim et al., 2018). Результаты данного исследования также показали перспективы применения этикетки для контроля хранения яблок в сочетании с сенсорным тестированием и анализом параметров, включающих содержание растворимых сухих веществ и твердость.

Установлены некоторые научные публикации об изобретении колориметрических сенсоров, в которых амин-ПЭГ (полиэтиленгликоль) используется в качестве реагента для обнаружения альдегидов. Поли(этиленгликоль) бис(3-аминопропил) защищенный (амин-ПЭГ) представляет собой полимер амина с концевой аминогруппой, который может нуклеофильно реагировать на альдегидные группы, проявляя исключительные свойства адсорбции альдегидов. Shao et al. (2022) изготовили колориметрическую пленку для обнаружения выбросов альдегидов на основе этилцеллюлозы/поливинилового спирта в сочетании с полиэтиленгликолем, бис(3-аминопропил), закрытым (амин-ПЭГ) и метиловым красным, и применили ее для контроля свежести киви. Исследование показало, что колориметрический отклик на альдегид показал высокую чувствительность и эффективную влагостойкость. Тенденция изменения цвета колориметрической пленки была аналогична тенденции изменения параметров свежести киви, включая органолептические тесты, общее количество растворимых сухих веществ (СВ), твердость, потерю веса, титруемую кислотность, содержание аскорбиновой кислоты и малонового диальдегида (МДА). Полученные данные подтвердили заметный переход цвета на колориметрической пленке по мере созревания киви (от сине-фиолетового до темно-красного, а затем постепенно до красного).

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что, использование альдегидов для разработки интеллектуальных упаковочных систем для контроля свежести фруктов и овощей является перспективным, однако их влияние на качество и безопасность фруктов и овощей является ключевым вопросом, когда речь идет о практическом применении.

Этилен

Фитогормон этилен — газ, синтезируемый растениями, эндогенный регулятор роста растений. В сельском хозяйстве этилен можно считать индикатором степени зрелости для определения времени сбора урожая. Чтобы избежать порчи продукции, вызванной избытком этилена при хранении и транспортировке фруктов и овощей содержание этилена, можно регулировать. В настоящее время традиционные количественные измерения этилена состоят из хроматографического (Qi et al., 2020),

спектроскопического (Pathak et al., 2017) и электрохимического анализов, которые являются сложными и трудоемкими. Учитывая ограниченные химические свойства этилена, было разработано лишь небольшое количество датчиков, основанных на металлах и оксидах металлов. Изготовили чувствительную пленку, нанеся SiO_2 наночастицы на фильтровальной бумаге и индикаторный раствор, синтезированный из сульфата палладия и молибдата аммония. Цвет индикаторной пленки менялся от белого до синего при окислении этилена. В другом исследовании был разработан датчик, основанный на реакции между поли(диацетиленом) и реагентом Лоусона. Цвет датчика меняется с синего на красный, что было видно невооруженным глазом после воздействия этилена. Датчик имеет предел обнаружения 600 ppm для этилена и может применяться для отслеживания этилена, выделяемого во время созревания фруктов (Nguyen et al., 2020).

Несмотря на эти достижения, включение ионов металлов в эти виниловые датчики и их применение в пищевой упаковке весьма ограничено. В последние годы природные полимеры были всесторонне изучены для изготовления разлагаемых пленок для упаковки пищевых продуктов с учетом их безопасности, доступности и биосовместимости (da Silva Filipini et al., 2020; Ma & Wang, 2016). Авторы Pirsá and Chavoshizadeh (2018) изобрели новый датчик газа этилена на основе переносимых пленок из нановолокон из бактериальной целлюлозы, легированных KMnO_4 , который можно использовать в упаковке для бананов, с целью измерения температуры и уровня этилена во время хранения. Кроме того, киви, манго и груши входят в число фруктов, для упаковки которых уже широко используется технология маркировки Ripe Sense. Этот индикатор использует количество этилена для измерения степени созревания плодов. Цвет этикетки меняется с красного на желтый по мере созревания плода, что позволяет потребителю узнать, когда фрукт готов к употреблению.

Серосодержащие соединения

Небольшое количество летучих веществ, таких как сульфиды, претерпевает значительные изменения в течение периода созревания и хранения плодов, поэтому они могут также рассматриваться в качестве средств реагирования в интеллектуальной упаковке. Было установлено, что серосодержащие соединения, которые составляют большинство ароматических соединений фрукта дуриан, постоянно изменяются во время послеуборочного хранения и связаны с физико-химическими свойствами плодов (Niponsak et al., 2015). Спелый дуриан дает чрезвычайно низкую концентрацию летучих веществ, тогда как у перезрелого высокие уровни летучих веществ. Учитывая, что сульфиды могут вызывать колебания pH,

можно использовать индикатор pH на основе красителя, чтобы отслеживать их выделение и соответственно показывать зрелость плодов.

Колориметрическая пленка для мониторинга летучих веществ дуриана в режиме реального времени была изготовлена методом литья с включением природных полимеров (хитозан, карбоксиметилцеллюлоза и др.) и химических красителей pH (метиловый красный и бромтимоловый синий в качестве индикаторов) для определения их зрелости (Niponsak et al., 2016). В сочетании с ГХ-МС идентификацией летучих соединений в свободном пространстве свежесрезанного дуриана было обнаружено, что серосодержащие летучие вещества (диэтилдисульфид, диэтилтрисульфид, 3,5-диметил-1,2,4-трисилан и его изомеры 1 и 2) могут быть индикаторами степени созревания (Niponsak et al., 2015). Интересен факт, что изменение соединений серы в процессе созревания дуриана показала полное соответствие с изменением цвета индикаторных пленок (от красного к оранжевому и, наконец, к желтому). Впоследствии группа исследователей подготовила новый индикатор созревания для дуриана с комбинацией крахмала, хитозана и метилового красного, смешанного с бромтимоловым синим в качестве индикатора. По сравнению с предыдущими исследованиями в этой работе было проведено дополнительное исследование срока хранения вышеупомянутой этикетки индикатора зрелости и изучена возможность использования этого индикатора для мониторинга зрелости в различных условиях хранения (Niponsak et al., 2020). Однако возможность использования сульфидов в качестве мишени для мониторинга спелости фруктов и овощей изучалась только на дуриане, что, предположительно, связано с его особым вкусом. Вопрос о том, может ли сульфид быть респондентом для отслеживания изменений качества других фруктов и овощей с характерным вкусом, представляет интерес для дальнейшего изучения.

Другие показатели

В дополнение к упомянутым выше метаболитам ряд других соединений, которые коррелируют со свежестью и зрелостью фруктов и овощей, могут служить целевым респондентом для интеллектуальной упаковки и мониторинга фруктов и овощей. В результате микробной ферментации во фруктах и овощах образуется этанол, который при избыточном содержании может повлиять на вкус продуктов (особенно ферментированных продуктов из фруктов и овощей) и оказать негативное влияние на их пищевую ценность. В связи с этим был разработан и изготовлен колориметрический индикаторный куб для интеллектуальной упаковки с целью обнаружения этанола в сушеных плодах манго (Kaewnu et al., 2022). Индикатор состоит из пористой меламиновой

пены, содержащей индикаторный раствор дихромата калия и серной кислоты, который показывает заметное изменение цвета от желтого до коричневого, зеленого и синего в диапазоне концентраций этанола от 0,25 % до 5,0 %. Метод позволяет оперативно отслеживать изменения качества и безопасности пищевых продуктов, контролируя наличие этанола в интеллектуальных упаковках, содержащих подготовленные колориметрические индикаторные кубики. Кроме того, концентрация хлорофилла является чувствительным индикатором созревания и старения фруктов и заметно снижается в процессе созревания фруктов и овощей (Betemps et al., 2012).

Комбинированные показатели

Многие исследования посвящены изучению несколько метаболитов в качестве чувствительных интеллектуальных упаковочных систем, чтобы более точно и тщательно проанализировать потенциал интеллектуальной упаковки для фруктов и овощей в информировании об изменениях качества, связанных со свежестью и зрелостью. Отмечено, что эти метаболиты действуют вместе в качестве индикации и обычно оказывают интеллектуальное ответное воздействие при изменении pH. Например, в ходе исследования были разработаны коврики из нановолокон электропрядения для биосенсоров pH, сочетающие экстракты красной капусты (натуральные красители) с поливиниловым спиртом (Maftoonazad & Ramaswamy, 2019). Из-за механических повреждений свежие плоды фиников имеют повышенную скорость дыхания, что вызывает значительное образование метаболитов брожения, состоящих из этанола, органических кислот, кетонов, ароматических соединений и ацетальдегида. Вместе эти метаболиты вызывают изменение pH среды внутри упаковки. Кроме этого были созданы интеллектуальные индикаторные метки для обнаружения изменений pH во время созревания бананов и отслеживания его ухудшения с использованием бразильского экстракта в качестве возможного природного хромогенного агента pH (Ardiyansyah et al., 2020). В некоторых исследованиях колебания pH окружающей среды при упаковке фруктов и овощей были вызваны CO₂. Органические кислоты также использовались для оценки свежести других фруктов, таких как манго (Dirpan et al., 2018) и личи (Zhou et al., 2021).

Механизм химической реакции целевых метаболитов и упаковочных материалов

Физиологическая активность фруктов и овощей производит целевые метаболиты, поэтому интеллектуальная упаковка может реагировать на взаимодействие между метаболитами и упаковочными материалами. Для более

эффективного научного использования метаболитов, необходимо разработать механизм взаимодействия между метаболитами и упаковочными материалами. Химические взаимодействия вышеперечисленных метаболитов с красителями (частью упаковочного материала) можно разделить на три типа: структурные изменения pH-чувствительных красителей, химические реакции летучих альдегидов и окислительно-восстановительные реакции ионов металлов.

Структурные изменения pH-чувствительных красителей

Кислотно-щелочные условия среды упаковки могут быть изменены несколькими метаболитами, выделяемыми фруктами и овощами, такими как CO_2 , органические кислоты и сульфиды. Некоторые pH-чувствительные красители претерпевают изменения структурной формы в ответ на такие кислотно-щелочные процессы, изменяя цвет. Обычно используемые индикаторы pH в упаковочных материалах для фруктов и овощей содержат химические красители, такие как метиловый красный, бромкрезоловый фиолетовый и хлорфеноловый красный, а также красители природного происхождения, включая антоцианы, пигменты свеклы и куркумин. Метиловый красный является азокрасителем и содержит двойную связь азот-азот (Luo et al., 2022). Благодаря своему красному цвету в кислой среде и желтому цвету в щелочной он часто применяется в качестве хромогенного компонента интеллектуальной упаковки. Кроме того, антоцианы играют важнейшую роль в колориметрическом отклике интеллектуальной упаковки в качестве натуральных красителей, которые легкодоступны. Антоцианы преимущественно присутствуют в кислых средах в виде флавоноидных катионов (красноватого цвета). По мере увеличения pH происходит депротонирование гидроксильной группы, и катион флавоноида становится метанольным псевдооснованием и в конечном итоге ведет себя как синее анионное хиноновое основание в щелочной среде (Qin et al., 2019). Изменение цвета от красного (pH 2,0) до розового (pH 3,0–6,0), бледно-лилового (pH 7,0), сине-фиолетового (pH 8,0–10,0) и, наконец, желто-зеленого (pH 11,0–12,0) отражает окраску антоцианов при различных условиях pH (Guo, Xue et al., 2022; Liu, Wu et al., 2022).

Химические реакции летучих альдегидов

Альдегиды проходят процессы нуклеофильного присоединения, с образованием карбоновых кислот или карбоксилатов, что приводит к изменению кислотности и щелочности в щелочной среде (избыток гидроксид-ионов) (Kim et al., 2017). Альдегиды, которые включают водород в α -положении, обычно имеют

более высокую склонность к реакциям, называемым реакциями гидроксильдольной конденсации. С другой стороны, альдегиды без α -водорода, такие как бензальдегид, проявляют реакции, часто известные как реакции Канниццаро. Включение щелочных веществ и чувствительных к pH красителей (таких как метиловый красный и бромкрезоловый фиолетовый) в упаковочные материалы для фруктов и овощей может способствовать эффективному реагированию на летучие альдегиды. Например, цвет метилового красного меняется с желтого на красный при переходе из щелочного состояния в кислое. В результате собственной альдольной конденсации образуются олигомеры глутарового альдегида. Реакция протекает до тех пор, пока pH продукта реакции не изменится до нейтрального, после чего образуется азокомплекс. Азокомплексное соединение, содержащее делокализованный положительный заряд, меняет цвет индикатора с желтого на красный. На таких концепциях основан мониторинг альдегидов, выделяемых при созревании таких фруктов, как киви (Shao et al., 2022) и яблок (Kim et al., 2018).

Окислительно-восстановительная реакция ионов металлов

Хорошо известно, что многие ионы металлов в окисленном и восстановленном состояниях имеют различную окраску. Таким образом, включение солей металлов, способных вступать в окислительно-восстановительные реакции с целевыми аналитами, в упаковку фруктов и овощей (фрукты, не находящиеся в прямом контакте с мякотью) вызвало большой интерес у исследователей (Hu, Li et al., 2016; Iskandar et al., 2020). В частности, используя это свойство в сочетании с восстановительной природой этилена, было разработано множество интеллектуальных индикаторов/датчиков с добавлением ионов металлов для отслеживания изменений этилена во время созревания фруктов и овощей. Как отмечалось в разделе 2.4, этилен использовался для восстановления Mo(VI) до Mo(V) для изменения цвета с белого на синий (Iskandar et al., 2020; Lang & Hübner, 2012). Точно так же, в присутствии этилена ионы перманганата могут вызывать изменение цвета (Pirsa & Chavoshizadeh, 2018).

Классификация интеллектуальных систем упаковки фруктов и овощей

Фрукты и овощи признаны незаменимыми компонентами сбалансированной диеты, которая защищает от множества заболеваний, включая ожирение, диабет II типа и болезни сердца (Chen, Pu et al., 2022). Однако, поскольку плодоовощное сырье более подвержено порче и имеет ограниченный срок хранения, усилия ученых направле-

ны на создание интеллектуальных упаковочных систем, которые могут отслеживать изменения качества фруктов и овощей в режиме реального времени, включая колориметрические индикаторные этикетки, био/химические датчики, метки радиочастотной идентификации (RFID) и так далее. Как правило, эти интеллектуальные упаковочные системы прикрепляются в качестве этикеток к внутренней части или свободному пространству упаковки пищевых продуктов для определения качества пищевого продукта (Yong & Liu, 2020). Интеллектуальная

упаковка не только показывает различия в качестве в отношении свежести/зрелости пищи в зависимости от взаимодействия между продуктом и окружающей средой упаковки во время хранения, транспортировки и продажи (Shao et al., 2021), но также отслеживает историю продукта, от поставки сырья до производства продукции, упаковки продукции, логистики и дистрибуции, продаж и т. д. Перечень различных интеллектуальных упаковочных систем, применимых в настоящее время к фруктам и овощам, представлен в Таблице 1.

Таблица 1

Индикаторные этикетки, датчики, время-температурные индикаторы, RFID в интеллектуальных системах упаковки фруктов и овощей

Категория	Фрукты/овощи	Интеллектуальный ответ	Основные результаты	Действие	Источник
Индикаторные этикетки из гидрогелевой пленки	Банан	Гидрогели реагируют на изменения влажности Адсорбция этилена KMnO_4	гидрогелевая пленка CMC/NFC/ KMnO_4 ; модифицированный NFC и KMnO_4 (улучшенные механические свойства, термические свойства, чувствительность к этилену) и используемый в качестве поглотителя влаги/этилена в упаковке бананов при 0 и 25°C в течение 30 дней.	Интеллектуальный отклик и регулировка влажности в упаковке. Задержка созревания фруктов (срок хранения) в дополнение к контролю микробной порчи и окисления продуктов питания.	(Pirsa, et al 2021)
Этикетки с индикаторной пленкой	Манго, банан	Хитозановые пленочные носители для медленного высвобождения этилена	Спектроскопия времени жизни позитронной аннигиляции, атомно-силовая микроскопия и рамановская спектроскопия для исследования взаимосвязи между свойствами медленного высвобождения и микроструктурой пленок ETH/CS. Микроструктурные изменения в полостях оказывают существенное влияние на медленное выделение этилена.	Неразрушающий контроль и замедление выделения этилена. Высвобождение этилена из композитных пленок может обеспечить созревание манго и бананов в определенном диапазоне и контролировать созревание фруктов по требованию.	(Yao, et al 2022)
Индикаторные этикетки из гидрогелевой пленки	Свежесрезанная дыня	Реакция гидрогеля на изменения CO_2 Реакция красителя pH на изменение pH, вызванное CO_2	Гидрогелевые пленки меняют цвет с темно-зеленого на оранжевый, что свидетельствует о порче пищевых продуктов. Гидрогель богат водой и обеспечивает быстрое производство протонов в ответ на внешнюю стимуляцию CO_2 .	Гидрогелевые индикаторы для мониторинга свежести фруктов в режиме реального времени в умной упаковке.	(Lu et al., 2018)
Этикетки-индикаторы химических красителей	Кимчи (ферментированные овощи)	Красители pH реагируют на изменения pH, вызванные CO_2 , органическими кислотами (уксусная кислота, молочная кислота)	Изменение цвета индикаторной этикетки указывает на разные этапы брожения: синий — на начальный этап брожения, желтый — на оптимальную стадию брожения и красный — на конец брожения. Результаты миграционного теста подтверждают, что индикатор свежести не мигрирует в продукты, хранящиеся в контейнере.	Свежесть кимчи можно контролировать в режиме реального времени по концентрации CO_2 и уксусной кислоты в верхней части упаковки кимчи, не влияя на качество пищи.	(Baek et al . 2021)

Продолжение Таблицы 1

Категория	Фрукты/овощи	Интеллектуальный ответ	Основные результаты	Действие	Источник
Коаксиальные индикаторные этикетки, напечатанные на 3D-принтере	Личи	Натуральные пигменты реагируют на сдвиги pH, вызванные изменением массы.	Этикетки, обогащенные CS, CNF, 1-MCP и антоцианами черники, были изготовлены с использованием коаксиальной 3D-печати и ионного сшивания. Контролируемое высвобождение было достигнуто за счет захвата 1-MCP за счет электростатического эффекта ядра хитозана и оболочки CNF для устойчивого сохранения свежести. Парофазная газовая хроматография-ионная капельная спектрометрия Проверка точности индикаторной этикетки для отслеживания изменений свежести.	Интеллектуальные упаковочные этикетки с двойной функцией сохранения фруктов и контроля качества.	(Zhou et al., 2021)
Биосенсоры	Свежие финики	Натуральные пигменты реагируют на изменения pH из-за изменения свежести.	RCE, легированный в ПВС, для приготовления электростатически формованных матов из нановолокна, показывающих значения pH в диапазоне 2–12. Биосенсор pH PVA / RCE демонстрирует стабильность и обратимость.	Мониторинг в режиме реального времени связанных с pH (органические кислоты, CO ₂) массовых изменений в упаковке фруктов (свежесть). Может использоваться в качестве биоиндикатора, помещаемого в упаковку фруктов, или в качестве упаковочной пленки, контактирующей с фруктами.	(Maf-toonazad & Ramaswamy, 2019)
Биосенсоры	Нью-Мексико	Ответ ацетилхолинэстеразы	Формируется послойной сборкой электродов, ЗНЧ и модифицированной нафтоном нанопористой псевдоуглеродной пасты. Он проявляет высокое сродство к субстратам АХЭ и имеет линейный диапазон от $1,0 \times 10^{-8}$ до $1,0 \times 10^{-14}$ г/мл для паратона с пределом обнаружения $5,0 \times 10^{-15}$ г/мл.	Мониторинг фосфорорганических и метилпаразитарных пестицидов во фруктах и овощах.	(Deng et al., 2016)
Биосенсоры	Личи, апельсин (сок)	Сигнал сенсора ответа поверхностного антигена OmpD	Разработка чувствительной биосенсорной платформы в формате спектроскопии электрохимического импеданса с использованием G-GO на основе нового антигена OmpD (биомаркера). Изменения импедансного отклика датчика, отражающего концентрацию серотипа <i>Salmonella typhimurium</i> . Пределы обнаружения <i>Salmonella typhimurium</i> в образцах сока с шипами (личи и апельсина) составили $1,04 \times 10^1$ и $1,07 \times 10^1$ КОЕ/мл соответственно.	Его можно использовать для обнаружения <i>Salmonella typhimurium</i> во фруктах и овощах и продуктах из них.	(Mutreja et al., 2016)
Биосенсоры	Нью-Мексико	Хитозан-аптамер с нанощеткой	Комбинация бионических мягких материалов и целей обнаружения для селективного захвата небольшого количества бактерий из сложных матриц. Экспресс-тест (17 мин), селективное обнаружение <i>Listeria monocytogenes</i> в диапазоне концентраций $9-10^7$ КОЕ/мл.	Доступен в сочетании с упаковкой для фруктов и овощей для обнаружения <i>Listeria monocytogenes</i> в свежих фруктах и овощах.	(Hills et al., 2018)

Продолжение Таблицы 1

Категория	Фрукты/овощи	Интеллектуальный ответ	Основные результаты	Действие	Источник
Химические датчики (Газ)	Клубника, яблоко	Датчики передают данные о концентрации газа в терминальные программы	Датчик газа RMS88 (O_2 : 0–25 %; CO_2 : 0–0,5 % и 0–5 %) в сочетании с модульным респирометром для мониторинга в режиме реального времени концентрации газа и частоты дыхания в среде хранения. RMS88 непрерывно регистрирует концентрацию газа с фиксированными интервалами в 1 мин (клубника) и 5 мин (яблоки) и передает их в режиме реального времени в программу терминала для расчета частоты дыхания.	Для мониторинга на месте в режиме реального времени скорости дыхания во время хранения свежих продуктов и, следовательно, регулировки газовой атмосферы в хранилище в соответствии с частотой дыхания.	(Keshri et al., 2020)
Химические датчики (химическая реакция)	Киви	Изменение цвета в ответ на образование этилена, содержание	Функциональный сенсор на этилен, полученный реакцией полидиацетилена с реактивом Лоусона (концевые тиоловые группы декорируют полидиацетилен). Цвет сенсора меняется с синего на красный при воздействии этилена.	Возможен контроль выделения этилена при созревании плодов, что свидетельствует о спелости.	(Nguyen et al., 2020)
Влагочувствительные пленки	Клубника, черника, слива	Передача сигнала отклика на влажность на мобильные телефоны	Многофункциональная композитная бумага на основе металлоорганической основы и карбоксиметила на основе серебра (Ag-MOFs @ CMFP), полученная путем синтеза in situ. Моделирование реального хранения и транспортировки упакованных в ящики фруктов с использованием шейкера. Ag-MOF адсорбировали молекулы воды из упаковки и изменяли электрическое сопротивление пленки. Пленка обладает такими свойствами, как стойкость к трению, ударопрочность и низкая токсичность.	Мониторинг влажности среды фруктовой упаковки и сочетание его с антибактериальной консервацией. Адсорбция молекул воды из упаковочной среды для интеллектуального реагирования на влажность и удаленного мониторинга посредством передачи сигнала на мобильные телефоны.	(Zhang, Li et al., 2022)
Индикатор (время – температура) ТТІ (на основе диффузии)	Киви, клубника, манго	Изменение цвета в зависимости от влияния температуры окружающей среды на качество плодов	ТТІ на основе диффузии, состоящий из индикаторного слоя и функционального слоя, при этом изменение цвета среднего индикаторного слоя (от белого к синему) отражает влияние температуры окружающей среды и, кроме того, отражает качество фруктов. Изменение цвета этого ТТІ позволяет прогнозировать потерю веса, содержание растворимых сухих веществ, содержание витамина С, титруемую кислотность и антиоксидантную способность трех фруктов с ошибкой менее 15 %. E_a Различия между цветовой реакцией ТТІ и изменениями качества плодов были менее 25 кДж/моль, и их можно было использовать для мониторинга качества этих фруктов.	Схема быстрого контроля качества фруктов во время упаковки, хранения и распределения на основе визуального изменения цвета. Комбинация моделей диффузионного ТТІ и прогнозирования качества фруктов для создания кодов быстрого реагирования ТТІ для получения статуса качества фруктов путем сканирования.	(Yang & Xu, 2022)

Продолжение Таблицы 1

Категория	Фрукты/овощи	Интеллектуальный ответ	Основные результаты	Действие	Источник
ТТІ (на микробной основе)	Ананас, гранат, ананасовый мед	Изменение цвета в ответ на изменения времени и температуры при микробной порче фруктов	ТТІ для мониторинга микробного качества фруктов был разработан на основе изменения интенсивности цвета со временем и температурой (бесцветный-коричневый) из-за неферментативной реакции окислительного потемнения фенола. Цветовые сдвиги в ТТІ были аналогичны энергии активации (E_a) плода и хорошо коррелировали с микробным ростом в трех плодах ($R^2 \geq 0,7$).	Мониторинг микробной порчи минимально обработанных фруктов в зависимости от времени и температуры. Разработка ТТІ, которая может быть прикреплена к упаковке пищевых продуктов для обеспечения неразрушающего бесконтактного указания на изменение качества фруктов.	(Adiani et al., 2021)
Ферментативный ТТІ	Замороженная стручковая фасоль, белые грибы	Предсказания модели	Кинетическое моделирование параметров качества (цвет, содержание витамина С, содержание воды) замороженной стручковой фасоли в диапазоне от -3 до -20°C . Последующее моделирование влияния температуры на параметры качества с помощью уравнений Аррениуса и проверка в динамических температурных условиях.	Мониторинг изменения качества замороженной зеленой фасоли и замороженных грибов, в основном с точки зрения остаточного срока годности при различных температурах воздействия от производства до потребления.	(Ginnakourou & Taoukis, 2021)
RFID	Овощи	RFID-считыватель	Предлагается система на основе RFID для управления свежестью и мониторинга концентраций O_2 и CO_2 . Метки RFID объединяют данные о концентрации O_2 и CO_2 , связанные с дыханием свежих продуктов и их порчей.	Контроль свежести овощей. Синтез RFID-меток с датчиками свежести расширяет функциональные возможности RFID-технологии в качестве умной упаковки для фруктов и овощей.	(Eom et al., 2012)
RFID	яблоки	RFID-считыватель	Миниатюрный считыватель RFID в сочетании с датчиком газа на основе оксида металла и полупроводника (МОХ). Регулируя рабочую температуру газового датчика, можно количественно определять газы, связанные с определением качества яблок при хранении и транспортировке.	Его можно прикрепить к упаковке, чтобы отслеживать изменения свежести фруктов во время транспортировки и распределения.	(Vergara et al., 2017)
RFID	Фрукты и овощи	Обратная связь данных между RFID и WSN	Контроль температуры и влажности в холодильнике для хранения фруктов с помощью RFID и сети беспроводных датчиков WSN. Одновременно установлено 90 пассивных RFID-логгеров температуры с 7 микрочастицами в каждой камере. Трехмерные карты температуры, модели данных влажности от ASABE, расчет изменений энтальпии и абсолютного содержания влаги в воздухе.	Мониторинг логистики холодовой цепи фруктов и овощей, улучшение холодильного хранения скоропортящихся продуктов; Оценка энергопотребления при хранении в холодильнике, потери влаги продуктами и обнаружение конденсации воды на хранимых товарах.	(Badia-Melis et al., 2015)

Окончание Таблицы 1

Категория	Фрукты/овощи	Интеллекту- альный ответ	Основные результаты	Действие	Источник
RFID	Фрукты и овощи	Обратная связь данных от системы отслеживания на основе датчиков RFID и Интернета вещей (IoT)	Система была протестирована в цепочке поставок скоропортящихся продуктов (кимчи) и предоставляет информацию о продукте в режиме реального времени, а также полную историю температуры и влажности для удобства менеджеров и клиентов. Интеграция моделей машинного обучения в ворота RFID позволяет правильно идентифицировать помеченные продукты, входящие и выходящие через ворота, повышая эффективность системы отслеживания.	В цепочке поставок фруктов и овощей отслеживание скоропортящихся продуктов (RFID) и измерение температуры и влажности при хранении и транспортировке (IoT). Отслеживаемость продукта.	(Badia-Melis et al., 2015)

Сокращения: ТТИ — индикатор время—температура; АХЭ — ацетилхолинэстераза; КМЦ — карбоксиметилцеллюлоза; ЦНВ — целлюлозные нановолокна; композитная пленка E/CS, винилхлорид/хитозан (ETH/CS); G-GO, графен-оксид графена; ЗНЧ — наночастицы золота; KMnO₄ — перманганат калия; NFC —наноцеллюлоза; н.у. — не указано; ПВА — поливиниловый спирт; RCE — экстракт красной капусты.

Колориметрические индикаторные
этикетки/пленки

Индикаторные этикетки, состоящие из макромолекулярных полимеров (обычно полисахаридов или белков) в сочетании с химическими или природными красителями, являются наиболее распространенной формой интеллектуальной упаковки при определении качества продукции из фруктов и овощей. Хромогенные красители являются неотъемлемым компонентом индикаторных этикеток, обычно представляющих собой индикатор на свежесть, спелость и другие показатели качества посредством изменения цвета, что соответствует области их применения и чувствительности. Краситель и целевые метаболиты, свидетельствующие об изменении качества плодоовощной продукции, химически взаимодействуют, вызывая вариации цвета индикаторных меток (Mohammadian et al., 2020). Как было отмечено ранее, в зависимости от особенностей мишени различные индикаторы могут иметь несколько признаков и содержать множество красителей.

Этикетки-индикаторы химических
красителей

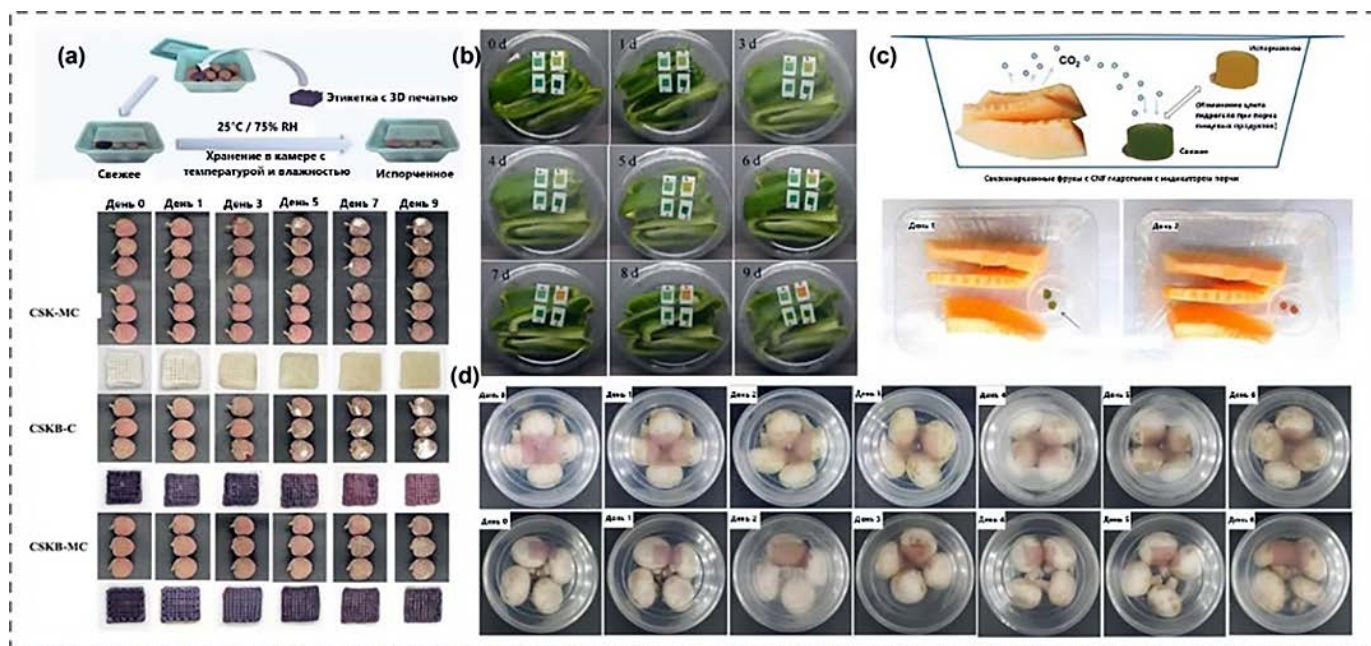
Химические хромогенные красители приобрели известность недавно, благодаря своей исключительной способности быстро реагировать, генерировать видимые цвета и сохранять эффективную стабильность (Shao et al., 2021). Химические хромогенные красители, такие как метиловый красный, феноловый красный, бромфеноловый красный, бромфеноловый синий и бромкрезоло-

вый фиолетовый, часто используются в пищевой промышленности, особенно в интеллектуальной упаковке для фруктов и овощей (Luo et al., 2022; Shao et al., 2022; Warsiki & Rofifah, 2018).

Пленочная этикетка была изготовлена с использованием смеси муки тапиоки, агара и красителя метилового красного для выявления различий в свежести драконьего фрукта и прикреплена на внутренней поверхности контейнера (Warsiki & Rofifah, 2018). Установлено, что при хранении драконьего фрукта в среде CO₂ органические кислоты конденсируются в упаковке, вызывая заметное изменение цвета этикетки метилового красного (желто-оранжево-красный). Эта модификация в конечном итоге показывает качество драконьего фрукта. Кроме того, фталоцианиновые красители, состоящие из фенолфталеина, фенолового красного, хлорфенолового красного и бромкрезолового фиолетового, широко используются в качестве индикаторов pH, в первую очередь из-за отчетливого изменения цвета, которое происходит при протонировании или депротонировании фенольных гидроксильных групп (Luo et al., 2022). Во время хранения гуавы летучие органические соединения, образующиеся в свободном пространстве упаковки, постепенно изменяют pH, а индикаторная этикетка меняет цвет (с синего на зеленый) (Kuswandi et al., 2013). Показано, что эта метка подходит для оценки качества гуавы в режиме реального времени в условиях окружающей среды (28–30°C). Аналогичные метки индикаторов также использовались для оценки качества хранения манго в режиме реального времени (Dirpan et al., 2018) и винограда (Kuswandi & Murdyaningsih, 2017).

Рисунок 1.

Интеллектуальные индикаторные этикетки/пленки, отражающие изменения качества фруктов и овощей.



(a) 3D-печатные этикетки из наноцеллюлозы для сохранения фруктов и мониторинга свежести личи в режиме реального времени (Zhou et al., 2021). (b) Изменение цвета индикаторных этикеток для четырех составов свеженарезанных перцев, проверенных на порчу при $7 \pm 1^\circ\text{C}$. Среди них изменение цвета индикаторной этикетки, изготовленной из смеси метилового красного и бромтимолового синего (соотношение 3:2) (препарат MB2), было похоже на тенденцию изменения качества перца, что позволяло отслеживать порчу перца в режиме реального времени (Chen et al., 2018). (c) Индикатор на основе гидрогеля CNF для свежесрезанной дыни, указывающий на изменение свежести, с четким изменением цвета с темно-зеленого на оранжевый, указывающим на снижение свежести и также на порчу (Lu et al., 2018). (d) Интеллектуальные пленки для мониторинга свежести грибов были приготовлены путем включения нанокомплексов овальбумин-карбоксиметилцеллюлоза, насыщенных антоцианами, в матрицу кукурузного крахмала/поливинилового спирта с изменением цвета, указывающим на свежесть грибов при 20°C и относительной влажности 65 %: фиолетовый (0–1 день), красно-коричневый (2–3 дня), розовый (>4 дня) (Liu, Wu et al., 2022)

Несмотря на то, что индикаторные этикетки с одним красителем, используемые в вышеуказанных исследованиях, были эффективными для индикации качества свежих фруктов, они имели узкий диапазон цветовых переходов и неопределенность в различениях начального и конечного состояний, что препятствовало их дальнейшему применению. В связи с этой проблемой многочисленные исследования направлены на изучение индикаторных этикеток с несколькими красителями (или смешанными красителями) для повышения цветовой чувствительности конечной точки, вызванной ухудшением качества фруктов и овощей, а также более эффективным обнаружением порогов ухудшения качества. Комбинируя различные цветовые красители, смешанные индикаторы обычно используются для расширения области изменения цвета и повышения четкости процесса модификации цвета (Chen et al., 2018; Liu, Ma et al., 2021; Niponsak et al., 2016). Так, например, для проведения мониторинга процесса созревания киви использовали изготовленную колориметрическую пленку

на основе хитозана. В качестве индикатора в состав пленки были включены метиловый красный и бромкрезоловый фиолетовый. Видимый переход цвета (от сине-фиолетового к темно-красному, а затем постепенно к красному) взаимосвязан с качеством зрелости плодов. Примечательно, что колориметрический ингредиент этой этикетки термоставивается между двумя гидрофобными листами, защищая индикатор от дыхания и транспирации фруктов и обеспечивая более стабильный цвет. Следует также отметить применение изготовленной индикаторной этикетки со смесью растворов метилового красного и бромтимолового синего (соотношение 3:2) для контроля свежести свеженарезанного перца. Метка смешанного красителя значительно расширила диапазон цветовых сдвигов, что позволило эффективно отслеживать изменения CO_2 в диапазоне 0–5 % (об./об.) (Chen et al., 2018).

Этикетки-индикаторы с использованием натуральных красителей

Несмотря на преимущества этикеток с химическими красителями (чувствительные изменения цвета), необходимо учитывать возможную токсичность их миграции в пищевые матрицы. Следовательно, безопасность использования этих непищевых красителей в индикаторных этикетках будет препятствием для промышленного использования. Учитывая это, индикаторные этикетки, содержащие проявители натуральных красителей, все чаще становятся в приоритете исследований для умной упаковки фруктов и овощей с точки зрения их доступности и безопасности (Balbinot-Alfaro et al., 2019). В настоящее время натуральные красители, которые используются в колориметрической смарт-упаковке, включают антоцианы, куркумин и пигменты свеклы (Almasi et al., 2022). Наибольшее внимание для широкого изучения и использования представляют антоцианы (Etxabide et al., 2021). Они обладают широким диапазоном свойств (разнообразие цветов, различная чувствительность, широкий диапазон pH, множество источников и т. д.), которые облегчают изготовление этикеток, что делает их пригодными для умной упаковки в качестве натуральных красителей (Becerril et al., 2021; Luo et al., 2022; Yong & Liu, 2020). Недавно в ходе исследования была успешно изготовлена высокочувствительная к pH этикетка двойного назначения для сохранения и мониторинга фруктов, содержащая антоцианы черники, с использованием коаксиальной 3D-печати и ионного сшивания, а ее функциональность подтверждена при упаковке личи (Zhou et al., 2021). Тем не менее структура антоцианов крайне нестабильна, и применительно к интеллектуальным меткам требуются дополнительные меры для повышения ее стабильности (Almasi et al., 2022). Авторы Liu, Wu et al. (2022) улучшили стабильность антоцианов, загрузив их в нанокмплеск овальбумин-карбоксиметилцеллюлозу, который впоследствии был включен в матрицу кукурузного крахмала/поливинилового спирта, чтобы создать интеллектуальную колориметрическую пленку и сделать ее доступной для мониторинга качества грибов. По мере увеличения времени хранения грибов колориметрическая пленка показывала изменения в фиолетовом, красновато-коричневом и розовом цвете, что соответственно указывает на постоянство качества, снижении качества и гниении грибов.

Датчики

Датчик, состоящий из компонентов идентификации, преобразования, электроники отображения сигнала и блока обработки сигналов, генерирует сигнал посредством взаимодействия компонента идентификации с веществом обнаружения, запуская модификацию рецептора и затем преобразовывая его в полезный

сигнал электронного инструмента, для отображения с помощью компонента преобразования (Zhang, Guo et al., 2021). В упаковке фруктов и овощей датчики могут реагировать на характерные вещества, высвобождаемые при метаболизме плодоовощного сырья (например, кислород, двуокись углерода, этилен и альдегиды), или на возможные эндогенные опасности (остатки пестицидов, токсины, микроорганизмы и т. д.), тем самым передавая информацию о качестве сырья (Fernandez et al., 2022). Кроме того, на основе обнаружения, некоторые датчики могут автоматически модулировать условия окружающей среды внутри упаковки, чтобы замедлить процесс порчи. Распознающие элементы датчиков в интеллектуальной упаковке для сырья могут взаимодействовать с аналитом как биологически, так и химически. Соответственно, типы сенсоров в интеллектуальной упаковке для овощей и фруктов можно разделить на биосенсоры и химические сенсоры.

Биосенсоры

Биосенсор — это датчик, в котором биоаналит функционирует как детектор, чей рецепторный слой распознавания обычно состоит из ферментов, антигенов, антител, нуклеиновых кислот фагов и т. д. (Kalpana et al., 2019). Он отслеживает свежесть продуктов, остатки пестицидов и биологическое загрязнение путем выявления и измерения аллергенов и аналитов. В настоящее время разработка биосенсоров в интеллектуальной упаковке для фруктов и овощей пока находится в начале пути, при этом существующие исследования сосредоточены на отслеживании изменений качества сырья (Maftoonazad & Ramaswamy, 2019), обнаружении остатков пестицидов (Deng et al., 2016), и мониторинга пищевых патогенов (Guo, Xue et al., 2022).

Порча плодоовощного сырья, как правило, происходит под воздействием различных бактерий и грибов, вызывая ферментирование сахара с образованием молочной кислоты, альдегидов, CO₂ и других побочных продуктов, что приводит к снижению pH и образованию постороннего вкуса. Используя технологию электростатического прядения, была создана чувствительная к pH биосенсорная подушка в режиме реального времени путем включения экстракта красной капусты в матрицу из поливинилового спирта, которую можно поместить в упаковку для фруктов. Результаты показывают, что биосенсор pH способен отображать значения pH в диапазоне 2–12 и что происходит цветовая реакция, связанная с качеством свежих плодов.

Патогенные бактерии пищевого происхождения, включая *Listeria monocytogenes*, *Salmonella enterica*, *Escherichia coli* и *Staphylococcus aureus*, представляют серьезную угрозу для здоровья человека (Zhang, Guo et

al., 2021), что стимулировало создание датчиков обнаружения микробов в пищевой промышленности. Нанощеточный граничный привод хитозан-аптамер использовался в исследованиях, чтобы показать сенсорный механизм для быстрого скрининга *L. monocytogenes* во фруктах и овощах, что позволило сенсору завершить обнаружение за 17 минут (Hills et al., 2018). Используя новый антиген OmpD, Mutreja et al. (2016) сконструировали биосенсор для обнаружения *Salmonella typhimurium*, сделав его доступным для зонда обнаружения в форме иммунологического анализа, который мог бы специфически идентифицировать *S. typhimurium* в образцах воды и сока. По аналогии с данным исследованием для обнаружения сальмонеллы также использовался другой маломощный микрожидкостный биосенсор на основе золотникового клапана, одноразового шприца и смартфона (Guo, Xue et al., 2022). Биосенсор на ацетилхолинэстеразу (АХЭ) был изготовлен Deng et al. (2016) с использованием хитозана, наночастиц золота и нанопористого псевдоуглерода, модифицированного перфторсульфоновой кислотой, в сочетании с послойной сборкой. Сенсор проявлял высокое сродство к субстратам АХЭ и распознавал метилпаратион с линейным диапазоном от $1,0 \times 10^{-8}$ до $1,0 \times 10^{-14}$ г/мл и пределом обнаружения $5,0 \times 10^{-15}$ г/мл, что указывает на то, что сенсор может быстро реагировать на фосфорорганические и метилпаратионные пестициды для обнаружения остатков пестицидов в соответствующих сельскохозяйственных продуктах

Химические датчики

Химические датчики основаны на реакции, происходящей между рецепторами и их мишенями, для создания сигналов, которые впоследствии обнаружения могут быть записаны и проанализированы. (Kalpana et al., 2019). Как указывалось ранее, газообразный состав свободного пространства упаковки сырья, который включает такие газы, как CO_2 , этилен и альдегиды, связан с дыханием продуктов, микробным метаболизмом или утечками газа как внутри, так и снаружи упаковки (Firouz et al., 2021). Эти вещества могут служить целевыми аналитами для химических сенсоров, взаимодействуя с рецептором для создания фотоэлектрического преобразования, которое создает сигнал, подобный цветовому преобразованию, связанный с концентрацией аналита, показывая изменения качества плодово-овощного сырья. Кроме того, с течением времени, химические датчики в интеллектуальной упаковке могут отслеживать изменения температуры и влажности, чтобы обеспечить сигнал хранения в дополнение к мониторингу концентрации газа.

Применение газовых датчиков для измерения концентрации O_2 или CO_2 и расчета частоты дыхания фруктов

и овощей является важным способом улучшения дизайна упаковки или поддержания идеальных условий для хранения сырья. Неразрушающие оптические датчики O_2 и два датчика CO_2 (один для определения низких концентраций, 0–3 %, другой для определения высоких концентраций, 40 %) были размещены Borchert et al. (2014) внутри контейнеров для хранения, с целью постоянного наблюдения за изменениями концентрации газа. Параметры датчика были связаны с физико-химическими и микробиологическими свойствами грибов во время хранения, что позволило оценить изменения качества. Как и в вышеупомянутом исследовании, сенсорная система была разработана для постоянного контроля содержания газа и частоты дыхания свежей клубники, что дает возможность для отслеживания в режиме реального времени при упаковке и транспортировке клубники, тем самым сводя к минимуму метаболические потери (Keshri et al., 2019).

Кроме того, несколько изучаемых в настоящее время химических сенсоров могут отслеживать выделение органических соединений во время созревания сырья для мониторинга свежести, а также степени зрелости. В ходе исследований была разработана колориметрическая сенсорная этикетка на основе метилового красного, прикрепленная к упаковке, которая показывала выделение альдегидов из яблок (Kim et al., 2018). Изменяя уровень pH с помощью химической реакции между альдегидами и гидроксидами, в условиях созревания цвет этикетки меняется с желтого на оранжевый, а затем на красный. Кроме того, в ходе исследования была изготовлена сенсорная система, способная контролировать выделение этилена за счет использования окислительно-восстановительной реакции между восстановлением этилена и ионом металла — Mo (VI), — которые подвержены изменению цвета, в сочетании с датчиком цвета (Lang & Hübert, 2012). Авторами сделан вывод о возможности применения датчика для измерения спелости яблок в отдельных плодах или картонных коробках при различных условиях хранения. В соответствии с предыдущим исследованием, другие ученые разработали колориметрический датчик, который можно было бы применять для обнаружения газообразного этилена, на основе комплексов красного палладия, получаемых за одну стадию из красного фенантролина и хлорида палладия (Hu, Li et al., 2016). Следует отметить, что этот тип хемосенсора похож на колориметрические индикаторные метки по тому, как он реагирует, обе используют изменение pH хромогенного красителя для его отражения. Отличие состоит в том, что химические датчики содержат целевые рецепторы, которые реагируют на целевой метаболит, генерируя сигналы, которые можно улавливать и анализировать, что позволяет повысить чувствительность реакции. Подобным образом могут быть созданы датчики реакции, адаптированные к отслеживаемому химическому веществу, например,

CO₂-датчики, датчики этилена и колориметрические датчики альдегида. Кроме того, их наличие упрощает включение химических датчиков в интеллектуальные устройства для обмена данными с несколькими терминалами.

Условия температуры и влажности, в которых хранится плодовоовощное сырье оказывают огромное влияние на их качество и срок годности. Высокая относительная влажность и колебания температуры могут спровоцировать конденсацию воды, что, в свою очередь, вызывает рост микробов, ускоряет ухудшение текстуры фруктов и овощей и приводит к запотеванию внутренней части упаковки, что влияет на решение потребителя о покупке. Несколько датчиков, большинство из которых связаны с индикаторами время-температура (ТТИ), были использованы для предотвращения внутренних и внешних факторов окружающей среды, таких как температура и относительная влажность, которые можно рассматривать как компонент интеллектуальных приложений для упаковки (Gao et al., 2020; Rahman et al., 2018).

Подводя итог, следует отметить, что химические датчики, контролирующие газы, могут отслеживать физиологические изменения сырья вместе с концентрацией летучих веществ, образующихся в результате микробной активности, тогда как негазовые датчики могут регулировать внешнюю среду во время хранения и транспортировки фруктов и овощей преимущественно за счет измерения температуры и влажности.

Индикатор время–температура

Температура и время хранения оказывают значительное влияние на органолептические свойства и пищевую ценность сырья, а также его микробиологическую обсемененность (Zhang, Guo et al., 2021). ТТИ как эффективные инструменты мониторинга температуры используются для регистрации колебаний температуры в цепочке поставок пищевых продуктов для отслеживания качества и безопасности пищевых продуктов (Pereira et al., 2015). Сопоставляя действие ТТИ (объединяющее цвет, кислотность, длину диффузии и т. д.) с качеством пищевого продукта, ТТИ можно увязать со сроком годности целевого пищевого продукта, используя принципы, включая микробные, ферментативные или электрохимические изменения, в сочетании с математическим моделированием. Процесс порчи пищевых продуктов, вызванной микроорганизмами или биохимией, в основном соответствует уравнению Аррениуса, связанному со скоростью реакции и температурой (Gao et al., 2020). При абсолютном значении разности между энергией активации пищевого продукта и энергией активации ТТИ не более 25 кДж/моль предполагают, что энергия активации (E_a) пищевого продукта, рассчитанная по уравнению Аррениуса, может быть близко к E_a ТТИ, который эффективен

для прогнозирования качества целевого продукта питания (Gao et al., 2020).

Основываясь на ферментативных реакциях в живых организмах, для создания электрического и колориметрического ответа ТТИ был изготовлен путем использования каталитической реакции глюкозооксидазы (Rahman et al., 2018). pH раствора снижается, когда глюкозооксидаза реагирует с D-глюкозой с образованием D-глюконовой кислоты, H₂O₂, и последующее выделение H⁺ из D-глюконовой кислоты в растворе, что может вызвать изменение цвета в растворе. Индикатор pH (метиловый красный), отражающий изменения качества пищевых продуктов. Ток можно измерить с помощью измерителя постоянного потенциала, чтобы подтвердить образование H₂O₂. Энергия активации по Аррениусу для текущей реакции оказалась равной $25,0 \pm 1,6$ кДж/моль, а E_a для реакции развития окраски — $24,2 \pm 0,6$ кДж/моль, их сходство свидетельствует о согласии в предсказании качества пищевых продуктов между электрическим сигналом и изменением цвета. То есть разница в E_a между этим ферментативным ТТИ и качеством пищевых продуктов составляла менее 25 кДж/моль и, следовательно, могла использоваться для прогнозирования качества целевых фруктов и овощей, замороженного лука и клубники.

В исследованиях также изучалась возможность микробного ТТИ для обнаружения порчи сырья с учетом связи микробного ТТИ с температурно-зависимым ростом микробов и синтезом метаболитов (Zhang, Guo et al., 2021). Adiani et al. разработали ТТИ, который можно применять для мониторинга микробиологической порчи фруктов с минимальной обработкой (ананас, гранат, ананасовый нектар), в которых использовали изменение интенсивности цвета со временем и температурой в результате окисления фенола в присутствии карбоната натрия и персульфата аммония (APS; инициатор свободных радикалов). Было показано, что изменение цвета этого ТТИ сравнимо с E_a плода и положительно коррелирует с микробным ростом трех плодов. Разработанный ТТИ может быть добавлен к упаковке пищевых продуктов для неразрушающей, бесконтактной индикации изменений качества фруктов, что является перспективной интеллектуальной упаковкой для фруктов и овощей. ТТИ на основе диффузии также применялся для прогнозирования качества фруктов (киви, клубники и манго) во время хранения (Yang & Xu, 2021). Этот диффузионный ТТИ состоит из функционального слоя и индикаторного слоя, при этом изменение цвета среднего индикаторного слоя указывает на влияние окружающей температуры. ТТИ запускается, и цветопроявляющие элементы в функциональном слое диффундируют в индикаторный слой, когда индикаторный слой и функциональный слой соприкасаются. В зависимости от температуры и времени цвет индикаторного слоя меняется от белого до синего.

В ходе исследования было установлено несколько прогностических моделей, основанных на значениях красного, зеленого и синего (RGB) и в сочетании с качеством фруктов. Результаты показали, что температура и время хранения оказали заметное влияние на изменение цвета ТТИ и качество плодов. Кроме того, цветовая реакция этого ТТИ предсказывала потерю веса, содержание растворимых сухих веществ, содержание витамина С, титруемую кислотность, и антиоксидантная способность трех плодов с ошибкой менее 15 %. Более того, расхождения между цветовой реакцией ТТИ и изменениями качества фруктов были менее 25 кДж/моль, что в совокупности свидетельствует о том, что ТТИ может использоваться для отслеживания качества этих фруктов.

Будущие исследования ТТИ должны быть направлены на сопоставление большего количества индикаторов ухудшения процессов порчи пищевых продуктов (охватывающих ферментативные реакции, потемнение, окисление и т. д.), чтобы обеспечить интеграцию нескольких параметров качества и предоставление исчерпывающей информации о сроке годности пищевых продуктов.

Метка радиочастотной идентификации (RFID)

Указанные выше колориметрические индикаторные этикетки, датчики и ТТИ, как составляющие интеллектуальной упаковки, способны отображать информацию об изменении качества фруктов и овощей, которая также может быть передана потребителю через считывающее устройство носителя информации. Интеллектуальная упаковка значительно выиграла от достижений RFID в идентификации качества и порчи, мониторинге всего процесса холодовой цепи, а также управлением

температурой и влажностью. Например, интеграция датчиков контроля и метки RFID расширяет возможности технологии RFID в качестве интеллектуальной упаковки для фруктов и овощей. Качество фруктов и овощей постоянно меняется в процессе транспортировки и распределения из-за их постоянной физиологической активности. Vergara et al. (2007) выпустили считыватель микро-RFID со встроенным микромеханическим датчиком газа оксида металла для отслеживания изменений свежести яблок во время транспортировки и распределения. Комбинация этих RFID с датчиками газа, способными указывать на свежесть, должна быть изучена более подробно, чтобы получить более надежные данные. Кроме того, температура и влажность являются наиболее важными элементами, влияющими на безопасность и качество пищевых продуктов при их распределении и хранении. Было доказано, что метки RFID имеют большой потенциал для применения в мониторинге логистики холодовой цепи для фруктов и овощей. В этом проекте контроль температуры и влажности при хранении фруктов в холодильнике осуществлялся с использованием RFID и сетей беспроводных датчиков (Badia-Melis et al., 2015). Точно так же Alfian et al. (2020) предложили систему отслеживания, включающую технологию RFID для отслеживания скоропортящихся пищевых продуктов и датчики для измерения условий окружающей среды, таких как температура и влажность скоропортящихся пищевых продуктов при хранении и транспортировке, что позволяет эффективно бороться с контрафактными и некачественными продуктами в цепочке поставок. Однако, высокая стоимость RFID (Han et al., 2018) и проблемы экологической безопасности при переработке являются препятствиями для внедрения технологии, которая ограничивает промышленное внедрение (Bibi et al., 2017). Некоторые выпускаемые и применяемые промышленные системы ТТИ и RFID представлена в Таблице 2.

Таблица 2
Краткий перечень промышленных интеллектуальных упаковочных систем для фруктов и овощей

Наименование	Категория	Функциональное назначение	Основные характеристики	Литература
Ripe Sense®	Метки индикаторов	Определяет спелость плода по характерному газу (этилену), образующемуся при созревании. Этикетка становится красной, когда плод твердый и не полностью созревший; когда плод полностью созрел, оранжево-желтый (лучшее время для употребления в пищу).	Индикатор действует как датчик созревания и используется на упаковке таких фруктов, как киви, дыни, манго и груши.	(Firouz et al., 2021)
Vitsab CheckPoint®	Метки ТТИ на основе ферментов	Метки ТТИ можно активировать, слегка надавив на «окно», которое запускает ферментативную реакцию между ферментом и субстратом. CheckPoint — ферментативный ИТИ производства Vitsab International AB (Швеция), меняющий цвет при снижении значения pH.	Изменение цвета центрального круга «КПП»: зелено-желто-оранжево-красное. Зеленый: упакованные продукты транспортировались и хранились в хороших условиях. Оранжевый/красный: продукт стал неприемлемым.	(Han et al., 2018)

Окончание Таблицы 2

Наименование	Категория	Функциональное назначение	Основные характеристики	Литература
Smart Dot(умная точка)	Химически активный ТТИ	Smart Dot производства EVIGENCE SENSORS (Израиль) демонстрирует отчетливое изменение цвета за счет накопления изменений времени и температуры. Светло-зеленый (12 ч)–темно-зеленый (24 ч)–коричневый (36 ч)–красный (48 ч).	Этот ТТИ предоставляет производителям, розничным торговцам и потребителям в цепочке поставок продуктов питания возможность отслеживать срок годности скоропортящихся продуктов в режиме реального времени.	(Zhang, Guo et al., 2021)
Monitor Mark™	Диффузионный ТТИ	ТТИ обеспечивает непрерывную запись воздействия на продукт нежелательных температур во время хранения. Индикатор обеспечивает контрастность в различных оттенках синего, когда пища подвергается воздействию высоких температур. Для наблюдения за изменением качества свежавыжатых непастеризованных соков (яблочный, апельсиновый, морковный, свекольный), хранящихся в различных условиях.	Индикаторы не имеют прямого контакта с самим продуктом, они просто контролируют и отображают условия хранения. Стабильное изменение цвета ТТИ с необратимыми изменениями цвета. Информация, необходимая для оценки условий хранения и транспортировки.	(Firouz et al., 2021)
Freshness TTI	ТТИ	Изготовлен из гелеобразного прозрачного материала с цветовой индикацией и нанесенным на товар штрих-кодом. Форма штрих-кода со временем уменьшается до тех пор, пока он не исчезнет/не перестанет блестеть, что указывает на снижение свежести.	В супермаркетах, где сложены большие количества овощей и фруктов, чтобы покупатели могли определить свежесть скоропортящихся продуктов. Порча фруктов и овощей, из-за которой этикетка со штрих-кодом не считывается сканером.	(Firouz et al., 2021)
Verigo Pod quality	RFID в сочетании с датчиками	Интеллектуальная упаковка, система логистики: оценка оставшегося срока использования продукта и определение приоритетов логистики в соответствии с его характеристиками и условиями окружающей среды.	Показана взаимосвязь между порчей клубники и температурой хранения, и соответственно можно оценить оставшийся срок годности. Для клубники, упакованной при температуре от 0 до 2°C, продолжительность срока годности оценивается в 8,9 дней. Срок годности клубники, упакованной при температуре от 2 до 10 °C, примерно 2,6 дня	(Fernandez et al., 2022).

Практическое применение интеллектуальной упаковки для овощей и фруктов

Физиологическая активность фруктов и овощей после сбора урожая может генерировать метаболиты, содержащие двуокись углерода, органические кислоты, этилен, летучие альдегиды и кетоны, вызывая необратимые сдвиги в среде хранения сырья, особенно изменения pH. Это изменение может быть связано со снижением качества за счет изменения цвета, вызванного чувствительными к pH красителями (Bhargava et al., 2020; Zheng et al., 2022). Анализ литературных источников показал, что интеллектуальная упаковка может использоваться

для различных продуктов питания и напитков, включая киви (Shao et al., 2022), дыню (Lu et al., 2018), драконий фрукт (Warsiki & Rofifah, 2018), гуава (Kuswandi et al., 2013), виноград (Kuswandi & Murdyaningsih, 2017), личи (Zhou et al., 2021), манго (Dirpan et al., 2018), финики (Maftoonazad & Ramaswamy, 2019), перец (Chen et al., 2018), грибы (Liu, Wu et al., 2022) и др. Авторы Dirpan et al. (2018) создали индикатор свежести манго с использованием бактериальной целлюлозы в сочетании с красителем бромфеноловым синим, изменение цвета которого отражало колебания pH внутри упаковки манго и, следовательно, указывало на его свежесть (темно-синий для свежих фруктов, светло-синий для твердых фруктов и зеленый для гнилых). фруктов). Учитывая, что нату-

ральные красители pH больше подходят для контроля свежести пищевых продуктов из-за их нетоксичного, биоразлагаемого характера (Bhargava et al., 2020; Zheng et al., 2022). Группа ученых Zhou et al. (2021) изготовили смарт-этикетку из целлюлозных нановолокон, содержащую антоцианы черники, с помощью технологии коаксиальной 3D-печати и загрузили хитозан, содержащий 1-MCP, в полые микроканалы волокон для контролируемого высвобождения. В рамках проекта была впервые создана интеллектуальная этикетка с сохранением свежести и колориметрической индикацией pH, способная продлить срок хранения личи до 6 дней при температуре 25°C и 75 % относительной влажности в сочетании с изменением цвета для обозначения свежести. Следует отметить, что это данное исследование служит основой для будущих интеллектуальных технологий упаковки фруктов и овощей, а именно инновационной упаковки с двойными функциями сохранения сырья (например, антибактериальная, влагопоглощающая) и интеллектуальным реагированием (Zhang, Guo et al., 2021).

Стоит отметить эффективность проекта по мониторингу качества киви, клубники и манго во время хранения с использованием изменения цвета подготовленного TTI на основе диффузии в сочетании с разработанной моделью прогнозирования качества (Yang & Xu, 2021).

Контроль спелости фруктов и овощей

Фрукты и овощи претерпевают множество физиологических и биохимических изменений в процессе созревания, которые проявляются в повышении сладости (от распада органических кислот и превращения крахмала в сахар), аромата (от образования ароматических летучих веществ), соединений), снижение плотности (из-за потери набухания клеток, превращения пектина и разрушения компонентов клеточной стенки) и изменение цвета (нарушение выработки пигмента) (Pirsa et al., 2022). Отслеживание сохранности сырья имеет решающее значение для повышения безопасности, сокращения отходов и минимизации финансовых потерь. Следует отметить, что эстетический вид (изменение цвета) некоторых фруктов и овощей, таких как помидоры, апельсины и бананы, может указывать на степень зрелости. Однако спелость большинства фруктов (таких как яблоки, груши и киви) можно определить только по конкретным показателям, таким как отслеживание изменений в этилене и летучих альдегидах.

Производство этилена в плодах в период созревания резко возрастает, что влечет за собой повышенную скорость автокатализа и дыхания (Hu, Sun et al., 2019). Были созданы индикаторные этикетки на молибдате аммония, чувствительные к этилену, залитые в полимерную матрицу, которые могли обнаруживать 100 частей

на миллион чистого газообразного этилена (Iskandar et al., 2020). После этого на упаковку авокадо были нанесены индикаторные этикетки, демонстрирующие переход цвета в соответствии с образцами зрелости авокадо и качества плода. Сравнительные исследования (Hu, Li et al., 2016; Lang & Hübert, 2012; Nguyen et al., 2020; Pirsa & Chavoshizadeh, 2018; Valente et al., 2019) также выполнялись другими учеными для оценки зрелости плодов с использованием произведенного этилена. Существуют интеллектуальные пленки, которые используют этилен для изменения зрелости. В исследовании, проведенном недавно Yao et al. (2022), была успешно создана интеллектуальная хитозановая пленка для неразрушающего контроля и длительного выделения этилена. Комбинация PALS, ACM и рамановской спектроскопии показала, что пленка винилхлорид/хитозан продолжала выделять газообразный этилен при комнатной температуре в течение 10 дней, что объясняется накоплением газообразного этилена в результате разложения винилхлорида в композитной пленке и образованием небольших полых структур для выполнения функции медленного высвобождения. Исследованием также установлено, что можно управлять периодами созревания манго и бананов по запросу, что дает преимущества в сохранении и созревании сельскохозяйственных продуктов.

Наравне с этим проводятся эксперименты с интеллектуальной упаковкой, которая отслеживает изменения уровней летучих альдегидов и серы, чтобы указать на спелость фруктов и овощей, однако оба они ограничены определенными видами продуктов. Так, например, киви (Liu, Ma et al., 2021) и яблоки (Kim et al., 2018) выделяют значительное количество альдегидов по мере созревания, поэтому в исследованиях использовалось аддитивное взаимодействие между альдегидами и основаниями с целью изменения pH среды упаковки для создания интеллектуальной упаковки. В настоящее время определение зрелости фруктов и овощей сводится к интеллектуальным подходам, основанным на данных, преимуществами которых являются практичность, непрерывность, работа в режиме реального времени и промышленная масштабируемость.

Измерение качества и безопасности

Опасения по поводу качества и безопасности фруктов и овощей часто связаны с остатками пестицидов, микробиологической порчей и заражением. Помимо обычного хроматографического и масс-спектрометрического обнаружения (Umapathi et al., 2022), для решения этих вопросов было использовано несколько интеллектуальных методов обнаружения, включая колориметрические индикаторные метки (Kaewnu et al., 2022), TTI (Adiani et al., 2021) и биосенсоры (Deng et al., 2016; Hills et al., 2018). Пестициды могут задерживаться и проникать в пище-

вую цепочку в результате их чрезмерного использования для борьбы с вредителями в течение вегетационного периода сырья, создавая постоянно растущую угрозу для здоровья человека, что стало серьезной проблемой общественного здравоохранения (Umapathi et al., 2022). Следовательно, биосенсоры также могут использоваться для обнаружения остатков пестицидов в свежих фруктах и овощах. В ходе исследования был создан новый бионический электрохимический датчик с использованием мембран с молекулярным отпечатком в качестве компонентов распознавания для быстрого обнаружения ацетамиприда и трихлорфона в образцах фасоли и огурцов (Tang et al., 2014).

Овощное и фруктовое сырье и продукция их переработки особенно восприимчивы к микробному загрязнению, поэтому ТТІ включали в упаковку для оценки испытаний на микробиологическую безопасность. Изготовили простой и недорогой ТТІ, основанный на изменении цвета в результате неферментативных процессов окислительного потемнения фенола. Объединяя оценку кинетики микробной порчи микрообработанных ананасов, гранатов и ананасового сока с цифровой однообъективной зеркальной камерой (DSLR), была построена модель, коррелирующая рост микробов с развитием окраски, как эффективное средство интеллектуального микробиологического мониторинга фруктов (Kaewnu et al., 2022).

Регулирование условий хранения фруктов и овощей

Параметры окружающей среды имеют решающее значение для качества фруктов и овощей, включая атмосферу с концентрацией газов этилена, O_2 и CO_2 , а также условия температуры и влажности. Частота дыхания и ее вариации, обычно измеряемые путем анализа потребления O_2 или производства CO_2 в единицу времени, в значительной степени способствуют поддержанию качества после сбора урожая, поэтому они являются важным параметром для контроля продления срока годности сырья (Keshri et al., 2019, 2020). Таким образом, оценка частоты дыхания является незаменимым инструментом для оптимизации конструкции упаковочных систем и поддержания оптимальных условий в системе хранения. В интеллектуальной упаковке для плодовоовощного сырья датчики газа часто встраиваются в упаковку с регулируемым газом, чтобы обеспечить динамическое управление составом газа в режиме реального времени для регулирования метаболизма фруктов и овощей. Датчик O_2 (0–25 %), два датчика CO_2 (0–0,5 % и 0–5 %) и модульный респирометр были использованы для создания системы непрерывного мониторинга концентрации газа и частоты дыхания в режиме реального времени свежих продуктов (Keshri et al., 2019).

Затем устройство подвергали испытанию последовательно с использованием клубники в измененных атмосферных условиях и условиях хранения в отсутствие окружающего воздуха и с постепенным снижением объемной доли O_2 с 21 % до 16 %, 8 %, 4 %, 2 % и 1 % (уравновешивается N_2). Результаты показали, что предлагаемое устройство может быстро и точно определять скорость дыхания свежих продуктов, таких как клубника, в режиме реального времени, облегчая регулирование газовой атмосферы хранения сырья. Позже ученые сообщили о непрерывном мониторинге концентрации яблочного газа и частоты дыхания яблок в различных условиях хранения и в течение всего периода хранения с помощью газовых датчиков и модульных респирометров (Keshri et al., 2020).

Кроме того, учитывая, что концентрация этилена в среде послеуборочного хранения является одним из наиболее важных факторов, влияющих на созревание и сохранение фруктов и овощей, было проведено несколько исследований по мониторингу концентрации газообразного этилена. Этиленовые пленки с медленным высвобождением были разработаны для регулирования условий хранения манго и бананов и контроля созревания фруктов (Yao et al., 2022). Следует отметить, что интеллектуальный мониторинг газовой атмосферы в основном ограничивается периодом хранения, и в будущем потребуются дополнительные исследования, чтобы обеспечить контроль газовой ситуации в условиях транспортировки и упаковки для обслуживания всей цепочки поставок плодовоовощного сырья.

Температура и влажность среды хранения являются наиболее важными параметрами, определяющими послеуборочную жизнь плодов после их сбора. В настоящее время несколько ТТІ, которые могут отслеживать изменения температуры окружающей среды, широко используются во время хранения или внутри упаковки для мониторинга в режиме реального времени (Gao et al., 2020). Исходя из этого, можно регулировать параметры окружающей среды в соответствии с температурой плодов, чтобы продлить срок их хранения после сбора урожая. Упаковка, способная контролировать и регулировать влажность, вызвала интерес исследователей (Liang et al., 2022; Pirsá, 2021). Кроме того, разработка интеллектуальной упаковки для фруктов и овощей получила развитие в результате открытия новых материалов. Металлоорганические каркасы (MOF) представляют собой группу пористых материалов с большой площадью поверхности и переменным размером пор, что делает их доступными для адсорбции молекул воды из окружающей среды упаковки для адаптивной реакции на влажность (Liang et al., 2022; Wang et al., 2021). Многофункциональная композитная бумага Ag-MOFs@CMFP (это относится к наполненной карбоксиметильной фильтровальной бумаге многофункциональным

MOF на основе серебра) была синтезирована *in situ* для использования в качестве чувствительного к влаге материала для измерения качества фруктов и одновременного сохранения свежести (Zhang et al., 2022). Поскольку физиологические процессы фруктов изменяют относительную влажность микроокружения упаковки, больше молекул воды адсорбируется на Ag-MOF, что соответственно изменяет устойчивость Ag-MOFs@CMFP. Этот ответный сигнал влажности может быть передан на смартфон, что позволяет осуществлять удаленный беспроводной мониторинг в режиме реального времени влажности окружающей среды упаковки фруктов (клубника, виноград, сливы). В этой работе предложена новая концепция использования гибких сенсорных материалов для обнаружения влаги и сохранения фруктов, которая может способствовать прогрессу в интегрированном мониторинге влажности и упаковке для сохранения в цепочке поставок фруктов, овощей и других сельскохозяйственных продуктов.

Отслеживание и интеллектуальный интерактивный опыт

В настоящее время доступно множество интеллектуальных систем идентификации, включая QR-коды и RFID-метки, для отслеживания источника продукции и мониторинга процессов (Alfian et al., 2020; Bibi et al., 2017). В исследовании сочетание технологии RFID с датчиками IoT позволило отслеживать условия температуры и влажности, а также прослеживаемость в цепочке поставок кимчи, тем самым предотвратив продажу поддельных товаров (Alfian et al., 2020). Кроме того, команда дизайнеров объединила использование QR-кодов и смарт-тегов RFID для создания «Файла фермера», интеллектуального интерактивного приложения, которое позволяет пользователям сканировать QR-код или RFID-метку на упаковке фруктов с помощью смартфона, чтобы получить доступ ко всей информации о фруктах и овощах, включая различные характеристики, среду происхождения, процесс созревания, каналы сбыта, который представляет собой дизайн, содержащий информацию об отслеживаемости с интеллектуальной интерактивной упаковкой (Zhang & Chen, 2021). Следует отметить, что дизайн упаковки NONGFU SPRING 17.5° Orange, выпущенной в 2014 году, включает в себя современную интеллектуальную технологию отслеживания упаковки, которая позволяет потребителям сканировать QR-код на апельсинах для получения информации о продукте, например информации о росте (Nongfuspring, 2022). Кроме того, информация об отслеживаемости влечет за собой видео с производственной линии апельсина 17,5, которое повышает качество обслуживания потребителей и служит препятствием для контрафактной продукции. Вполне очевидно, что каждый из этих дизайнов воплощает в себе вклад интеллектуального ди-

зайна упаковки фруктов и овощей в прослеживаемость, эффективный мониторинг и управление продуктами, а также в улучшение интеллектуального и интерактивного взаимодействия между потребителем и продуктом, что станет тенденцией развития упаковки. в эпоху информационных технологий.

Проблемы и перспективы использования и промышленного внедрения интеллектуальной упаковки для фруктов и овощей

Интеллектуальные упаковочные системы новая область пищевой упаковки, которая применяют для мониторинга в режиме реального времени продуктов, начиная от фруктов и овощей и заканчивая мясными и молочными продуктами в цепочке поставок. Это происходит посредством взаимодействия между небольшими компонентами внутри упаковки (например, колориметрические индикаторные этикетки, датчики) и целевые ответчики для предоставления поставщикам и потребителям точной информации о качестве продукта и окружающей среды. Несмотря на многие достоинства такой инновационной упаковки для пищевых продуктов, включающей в себя повышение эффективности использования сырья, снижение проблем с безопасностью пищевых продуктов и минимизацию отходов (Cheng et al., 2022), предстоит решить многочисленные препятствия для расширения промышленного внедрения интеллектуальной упаковки для плодовоовощного сырья.

Основные препятствия для расширения промышленного внедрения интеллектуальной упаковки для плодовоовощного сырья

Оценка безопасности интеллектуальной упаковки

В первую очередь необходимо учитывать безопасность интеллектуальных компонентов упаковки, включая миграцию химических красителей в колориметрических индикаторных этикетках и химических датчиках, а также возможность химического взаимодействия между интеллектуальными упаковочными материалами и пищевыми компонентами. В связи с этим использование природных колориметрических индикаторов (природных красителей с участием антоцианов, свекловичных пигментов, куркумина и др., природных полимеров, содержащих полисахариды и белки), а также подбор нетоксичных и неопасных материалов может эффективно повысить надежность интеллектуальных упаковочных материалов, что является направлением для будущих научных исследований.

Чувствительность отклика и достоверность интеллектуальной упаковки

Во-первых, один из способов, с помощью которого интеллектуальная упаковка отслеживает различия в качестве овощей и фруктов, заключается в мониторинге их метаболитов по мере их созревания, старения и деградации. Таким образом, эффективность интеллектуального мониторинга упаковки сильно ограничена чувствительностью ответа к этим целевым метаболитам. Интеллектуальная упаковка сырья, скорее всего, будет использовать CO_2 , летучие вещества, этилен, температуру и влажность в качестве целей отслеживания, поскольку эти вещества часто подвержены внешним воздействиям, которые могут вызвать колебания точности индикатора. Таким образом, в приоритете будущих исследований должны быть множественные/комбинированные показатели для мониторинга метаболитов, отчасти потому, что различия в качестве фруктов и овощей, как правило, являются комбинацией многочисленных факторов, а не изменениями одного показателя. С другой стороны, способность хромогенных красителей соответствовать изменениям качества целевого продукта является препятствием для их продвижения, поскольку они в основном используются в нескольких сложных пакетах для обнаружения изменений в свежести и зрелости сырья. Гибридные хромогенные агенты могут расширить диапазон цветовых сдвигов и более оперативно отслеживать изменения качества по сравнению с отдельными хромогенными агентами. Кроме того, необходимо уделить приоритетное внимание дальнейшим исследованиям того, как улучшить стабильность развития цвета в композитных системах при использовании натуральных красителей в качестве хромогенных агентов, например, путем стабилизации полисахаридно-белковых наноконплексов антоцианов (Liu, Wu et al., 2022).

Повышение эффективности упаковочного материала

Многочисленные природные макромолекулярные полимеры, такие как хитозан, целлюлоза и крахмал, используются в качестве индикаторных этикеточных материалов для интеллектуальной упаковки. Механические свойства и свойства водонепроницаемости являются ключевыми показателями для определения эффективности использования интеллектуальной пленки или метки. Прочность на разрыв и удлинение при разрыве интеллектуальных этикеток обычно можно увеличить за счет физического сшивания и других взаимодействий между материальными подложками. Существует проблема влагостойкости интеллектуальных пленок и этикеток из-за высокой гидрофильности некоторых природных макромолекул, используемых для создания интеллектуальной упаковки. Решением являются

использование нанотехнологии или комбинирование гидрофобных материалов. Кроме того, возможность использования вторичной переработки и экологичность материалов — это то, что необходимо изучить в будущих исследованиях. В качестве источника органических макромолекул (таких как пленкообразующие соединения целлюлоза, пектин и хитозан) или биологических компонентов для создания интеллектуальной упаковки (пигменты, содержащие антоцианы и куркумин, активные вещества, в том числе полифенолы и растительные эфирные масла) целесообразно использовать растительные отходы. Проведение дальнейших исследований по применению отходов будет способствовать увеличению эффективности и снижению затрат на производство интеллектуальной упаковки.

Затраты на производство интеллектуальной упаковки

В настоящее время производство интеллектуальной упаковки для фруктов и овощей преимущественно сосредоточено в небольших лабораториях без учета производственных затрат. Экономически обоснованная цена умной упаковки не должна превышать 10 % от общей стоимости продукта. Однако осуществить промышленное внедрение интеллектуальной упаковки сложно, поскольку включение компонентов интеллектуального индикатора неизбежно влечет увеличение затрат. Таким образом, чтобы снизить стоимость интеллектуальных упаковочных материалов, обработки и сделать их более доступными для возможности промышленного использования потребуются дополнительные и более глубокие исследования.

Вопросы правового регулирования и принятие потребителями

Наряду с препятствиями на пути промышленного производства интеллектуальной упаковки существуют также нерешенные вопросы, которые необходимо принять во внимание, такие как, восприятие потребителей и правовое регулирование интеллектуальной упаковки. Отсутствие достаточного законодательного регулирования интеллектуальных систем упаковки в настоящее время также препятствует внедрению новой упаковки. Общие спецификации для всех материалов, контактирующих с пищевыми продуктами, изложены в Регламенте ЕС ЕС 1935/2004, первом законодательном акте, посвященном теме активных и интеллектуальных материалов. В рамочном регламенте, в статьях 3, 4 и 15. особое внимание уделяется правилам использования интеллектуальных упаковочных материалов. Требования к упаковочным материалам с интеллектуальными компонентами, а также безопасное и надлежащее приме-

нение активных и интеллектуальных материалов и изделий потребителями находится в стадии обсуждения и законодательно не установлено. Кроме того, правила интеллектуальной упаковки для других стран и регионов, а также внедрение межрегиональных правил еще не разработаны. Хотя некоторые формы интеллектуальной упаковки, такие как индикаторные этикетки из натуральных полимеров и красок, признаны безопасными, на восприятие упаковки потребителями также влияет включение несъедобных веществ в интеллектуальную упаковку и возможность миграции ингредиентов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интеллектуальная технология упаковки разработана и используется для мониторинга качества фруктов и овощей, безопасности и условий окружающей среды в режиме реального времени, как для быстрого выявления дефектов качества фруктов и овощей, так и для предоставления визуальной и актуальной информации (свежесть, спелость, качество, безопасность, прослеживаемость и др.). Необходимо отметить, что, активная упаковка может быть включена в интеллектуальные упаковочные системы для обеспечения более эффективного контроля качества, оказывая при этом антибактериальное, антиоксидантное и другие защитные свойства. При этом необходимо учитывать, что различия в качестве фруктов и овощей часто представляют собой нечто большее, чем просто изменение одного метаболита и поэтому, для более точного учета изменений в свежести, степени зрелости и т. д. фруктов и овощей необходимо применять перспективный ответчик с уче-

том сводного индекса для отслеживания нескольких метаболитов. Широкому внедрению интеллектуальной упаковки для фруктов и овощей в промышленное производство и систему продаж будет способствовать решение проблем, связанных с оценкой безопасности, правовым регулированием, управлением затратами и другими факторами. Представленный научный обзор о целевых устройствах реагирования, которые можно применять к интеллектуальной упаковке для мониторинга качества фруктов и овощей, включая CO_2 , летучие органические кислоты, летучие соединения альдегида/серы, этилен и другие метаболиты может быть использован при проведении дальнейших научных исследований, с целью разработки эффективной интеллектуальной упаковки для отслеживания качества фруктов и овощей.

ВКЛАД АВТОРОВ:

Бурак Л.Ч.: концептуализация, разработка методологии исследования, научное руководство исследованием, проведение исследования, написание-рецензирование и редактирование рукописи.

Писарик М.И.: валидация данных, написание, подготовка черновика рукописи, курирование данных, работа с программным обеспечением.

Сарач А.Н.: проведение исследования, работа с программным обеспечением, валидация данных, редактирование рукописи.

ЛИТЕРАТУРА

- Adiani, V., Gupta, S., & Variyar, P. S. (2021). A simple time temperature indicator for real time microbial assessment in minimally processed fruits. *Journal of Food Engineering*, 311, 110731. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110731>
- Alam, A. U., Rath, P., Beshai, H., Sarabha, G. K., & Deen, M. J. (2021). Fruit quality monitoring with smart packaging. *Sensors*, 21(4), 1509. <https://doi.org/10.3390/s21041509>
- Alegbeleye, O., Odeyemi, O. A., Strateva, M., & Stratev, D. (2022). Microbial spoilage of vegetables, fruits and cereals. *Applied Food Research*, 2(1), 100122. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100122>
- Alfian, G., Syafrudin, M., Farooq, U., Ma'arif, M. R., Syaek-honi, M. A., Fitriyani, N. L., Lee, J., & Rhee, J. (2020). Improving efficiency of RFID-based traceability system for perishable food by utilizing IoT sensors and machine learning model. *Food Control*, 110, 107016. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.107016>
- Almasi, H., Forghani, S., & Moradi, M. (2022). Recent advances on intelligent food freshness indicators; an update on natural colorants and methods of preparation. *Food Packaging and Shelf Life*, 32, 100839. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100839>
- Ardiansyah, Kurnianto, M. F., Poerwanto, B., Wahyono, A., Apriliyanti, M. W., & Lestari, I. P. (2020). Monitoring of banana deteriorations using intelligent-packaging containing brazilian extract (*Caesalpinia sappan* L.). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 411(1), 012043. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/411/1/012043>
- Badia-Melis, R., Ruiz-Garcia, L., Garcia-Hierro, J., & Villalba, J. I. R. (2015). Refrigerated fruit storage monitoring combining two different wireless sensing technologies:

- RFID and WSN. *Sensors*, 15(3), 4781–4795. <https://doi.org/10.3390/s150304781>
- Baek, S., Maruthupandy, M., Lee, K., Kim, D., & Seo, J. (2020). Freshness indicator for monitoring changes in quality of packaged kimchi during storage. *Food Packaging and Shelf Life*, 25, 100528. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100528>
- Balbinot-Alfaro, E., Craveiro, D. V., Lima, K. O., Costa, H. L. G., Lopes, D. R., & Prentice, C. (2019). Intelligent packaging with pH indicator potential. *Food Engineering Reviews*, 11(4), 235–244. <https://doi.org/10.1007/s12393-019-09198-9>
- Bashir, H. A., & Abu-Goukh, A.-B. A. (2003). Compositional changes during guava fruit ripening. *Food Chemistry*, 80(4), 557–563. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(02\)00345-X](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(02)00345-X)
- Becerril, R., Nerín, C., & Silva, F. (2021). Bring some colour to your package: Freshness indicators based on anthocyanin extracts. *Trends in Food Science & Technology*, 111, 495–505. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.042>
- Betemps, D. L., Fachinello, J. C., Galarça, S. P., Portela, N. M., Remorini, D., Massai, R., & Agati, G. (2012). Non-destructive evaluation of ripening and quality traits in apples using a multiparametric fluorescence sensor. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 92(9), 1855–1864. <https://doi.org/10.1002/jsfa.5552>
- Bhargava, N., Sharanagat, V. S., Mor, R. S., & Kumar, K. (2020). Active and intelligent biodegradable packaging films using food and food waste-derived bioactive compounds: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 105, 385–401. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.09.015>
- Bibi, F., Guillaume, C., Gontard, N., & Sorli, B. (2017). A review: RFID technology having sensing aptitudes for food industry and their contribution to tracking and monitoring of food products. *Trends in Food Science & Technology*, 62, 91–103. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.01.013>
- Bobelyn, E., Hertog, M. L. A. T. M., & Nicolai, B. M. (2006). Applicability of an enzymatic time temperature integrator as a quality indicator for mushrooms in the distribution chain. *Postharvest Biology and Technology*, 42(1), 104–114. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2006.05.011>
- Borchert, N. B., Cruz-Romero, M. C., Mahajan, P. V., Ren, M., Papkovsky, D. B., & Kerry, J. P. (2014). Application of gas sensing technologies for non-destructive monitoring of headspace gases (O₂ and CO₂) during chilled storage of packaged mushrooms (*Agaricus bisporus*) and their correlation with product quality parameters. *Food Packaging and Shelf Life*, 2(1), 17–29. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2014.05.001>
- Cao, Y., & Mezzenga, R. (2020). Design principles of food gels. *Nature Food*, 1(2), 106–118. <https://doi.org/10.1038/s43016-019-0009-x>
- Caprioli, F., & Quercia, L. (2014). Ethylene detection methods in post-harvest technology: A review. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 203, 187–196. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2014.06.109>
- Chen, H., Lin, H., Jiang, X., Lin, M., & Fan, Z. (2022). Amelioration of chilling injury and enhancement of quality maintenance in cold-stored guava fruit by melatonin treatment. *Food Chemistry: X*, 14, 100297. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100297>
- Chen, H., Zhang, M., Bhandari, B., & Guo, Z. (2018). Applicability of a colorimetric indicator label for monitoring freshness of fresh-cut green bell pepper. *Postharvest Biology and Technology*, 140, 85–92. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.02.011>
- Chen, L., Pu, Y., Xu, Y., He, X., Cao, J., Ma, Y., & Jiang, W. (2022). Anti-diabetic and anti-obesity: Efficacy evaluation and exploitation of polyphenols in fruits and vegetables. *Food Research International*, 157, 111202. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111202>
- Cheng, H., Xu, H., McClements, D. J., Chen, L., Jiao, A., Tian, Y., Miao, M., & Jin, Z. (2022). Recent advances in intelligent food packaging materials: Principles, preparation and applications. *Food Chemistry*, 375, 131738. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131738>
- Choi, I., & Han, J. (2018). Development of a novel on-off type carbon dioxide indicator based on interactions between sodium caseinate and pectin. *Food Hydrocolloids*, 80, 15–23. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.01.028>
- da Silva Filipini, G., Romani, V. P., & Guimarães Martins, V. (2020). Biodegradable and active-intelligent films based on methylcellulose and jambolão (*Syzygium cumini*) skins extract for food packaging. *Food Hydrocolloids*, 109, 106139. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106139>
- Deng, Y., Liu, K., Liu, Y., Dong, H., & Li, S. (2016). An novel acetylcholinesterase biosensor based on nano-porous pseudo carbon paste electrode modified with gold nanoparticles for detection of methyl parathion. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 16(9), 9460–9467. <https://doi.org/10.1166/jnn.2016.13059>
- de Oliveira Filho, J. G., Bertolo, M. R. V., Rodrigues, M. Á. V., Marangon, C. A., da Silva, G. C., Odoni, F. C. A., & Egea, M. B. (2021). Curcumin: A multifunctional molecule for the development of smart and active biodegradable polymer-based films. *Trends in Food Science & Technology*, 118, 840–849. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.11.005>
- Dirpan, A., Latief, R., Syarifuddin, A., Rahman, A. N. F., Putra, R. P., & Hidayat, S. H. (2018). The use of colour indicator as a smart packaging system for evaluating mangoes Arummanis (*Mangifera indica* L. var. Arummanisa) freshness. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 157(1), 012031. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/157/1/012031>

- Eom, K.-H., Hyun, K.-H., Lin, S., & Kim, J.-W. (2014). The meat freshness monitoring system using the smart RFID tag. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 10(7), 591812. <https://doi.org/10.1155/2014/591812>
- Eom, K. H., Kim, M. C., Lee, S., & won Lee, C. (2012). The vegetable freshness monitoring system using RFID with oxygen and carbon dioxide sensor. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 8(6), 472986. <https://doi.org/10.1155/2012/472986>
- Etxabide, A., Kilmartin, P. A., & Maté, J. I. (2021). Color stability and pH-indicator ability of curcumin, anthocyanin and betanin containing colorants under different storage conditions for intelligent packaging development. *Food Control*, 121, 107645. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107645>
- FAO (2021). Fruit and vegetables — your dietary essentials. The International Year of Fruits and Vegetables, 2021, background paper. Food Agric Org Rome. <https://doi.org/10.4060/cb2395en>
- Fernandez, C. M., Alves, J., Gaspar, P. D., Lima, T. M., & Silva, P. D. (2022). Innovative processes in smart packaging. A systematic review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 11863. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11863>
- Firouz, M. S., Mohi-Alden, K., & Omid, M. (2021). A critical review on intelligent and active packaging in the food industry: Research and development. *Food Research International*, 141, 110113. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110113>
- Flórez, M., Guerra-Rodríguez, E., Cazón, P., & Vázquez, M. (2022). Chitosan for food packaging: Recent advances in active and intelligent films. *Food Hydrocolloids*, 124, 107328. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107328>
- Gao, T., Tian, Y., Zhu, Z., & Sun, D.-W. (2020). Modelling, responses and applications of time-temperature indicators (TTIs) in monitoring fresh food quality. *Trends in Food Science & Technology*, 99, 311–322. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.02.019>
- Ghaani, M., Cozzolino, C. A., Castelli, G., & Farris, S. (2016). An overview of the intelligent packaging technologies in the food sector. *Trends in Food Science & Technology*, 51, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.02.008>
- Guo, R., Xue, L., Jin, N., Duan, H., Li, M., & Lin, J. (2022). Power-free microfluidic biosensing of Salmonella with slide multivalve and disposable syringe. *Biosensors and Bioelectronics*, 213, 114458. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2022.114458>
- Guo, Z., Zuo, H., Ling, H., Yu, Q., Gou, Q., & Yang, L. (2022). A novel colorimetric indicator film based on watermelon peel pectin and anthocyanins from purple cabbage for monitoring mutton freshness. *Food Chemistry*, 383, 131915. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131915>
- Han, J.-W., Ruiz-Garcia, L., Qian, J.-P., & Yang, X.-T. (2018). Food packaging: A comprehensive review and future trends. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(4), 860–877. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12343>
- Hills, K. D., Oliveira, D. A., Cavallaro, N. D., Gomes, C. L., & McLamore, E. S. (2018). Actuation of chitosan-aptamer nanobrush borders for pathogen sensing. *Analyst*, 143(7), 1650–1661. <https://doi.org/10.1039/C7AN02039B>
- Hu, B., Sun, D.-W., Pu, H., & Wei, Q. (2019). Recent advances in detecting and regulating ethylene concentrations for shelf-life extension and maturity control of fruit: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 91, 66–82. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.06.010>
- Hu, X. G., Li, X., Park, S. H., Kim, Y.-H., & Yang, S. I. (2016). Nondestructive monitoring of kiwi ripening process using colorimetric ethylene sensor. *Bulletin of the Korean Chemical Society*, 37(5), 759–762. <https://doi.org/10.1002/bkcs.10745>
- Iskandar, A., Yuliasih, I., & Warsiki, E. (2020). Performance improvement of fruit ripeness smart label based on ammonium molybdate color indicators. *Indonesian Food Science and Technology Journal*, 3(2), 48–57. <https://doi.org/10.22437/iftstj.v3i2.10178>
- Jafarzadeh, S., Nafchi, A. M., Salehabadi, A., Oladzad-abbasabadi, N., & Jafari, S. M. (2021). Application of bio-nanocomposite films and edible coatings for extending the shelf life of fresh fruits and vegetables. *Advances in Colloid and Interface Science*, 291, 102405. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102405>
- Jiang, H., Zhang, W., Xu, Y., Zhang, Y., Pu, Y., Cao, J., & Jiang, W. (2021). Applications of plant-derived food by-products to maintain quality of postharvest fruits and vegetables. *Trends in Food Science & Technology*, 116, 1105–1119. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.09.010>
- Joshi, N., Rawat, K., & Bohidar, H. B. (2018). pH and ionic strength induced complex coacervation of pectin and gelatin A. *Food Hydrocolloids*, 74, 132–138. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.08.011>
- Jung, S., Cui, Y., Barnes, M., Satam, C., Zhang, S., Chowdhury, R. A., Adumbumkulath, A., Sahin, O., Miller, C., Sajadi, S. M., Sassi, L. M., Ji, Y., Bennett, M. R., Yu, M., Friguglietti, J., Merchant, F. A., Verduzco, R., Roy, S., Vajtai, R., ... Ajayan, P. M. (2020). Multifunctional bio-nanocomposite coatings for perishable fruits. *Advanced Materials*, 32(26), 1908291. <https://doi.org/10.1002/adma.201908291>
- Kaewnu, K., Samoson, K., Thiangchanya, A., Phonchai, A., & Limbut, W. (2022). A novel colorimetric indicator for ethanol detection in preserved baby mangoes. *Food Chemistry*, 369, 130769. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130769>

- Kalpana, S., Priyadarshini, S. R., Leena, M. M., Moses, J. A., & Anandharamakrishnan, C. (2019). Intelligent packaging: Trends and applications in food systems. *Trends in Food Science & Technology*, 93, 145–157. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.09.008>
- Kayitmazer, A. B., Seeman, D., Minsky, B. B., Dubin, P. L., & Xu, Y. (2013). Protein–polyelectrolyte interactions. *Soft Matter*, 9(9), 2553–2583. <https://doi.org/10.1039/C2SM27002A>
- Keshri, N., Truppel, I., Herppich, W. B., Geyer, M., Weltzien, C., & Mahajan, P. V. (2019). Development of sensor system for real-time measurement of respiration rate of fresh produce. *Computers and Electronics in Agriculture*, 157, 322–328. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.01.006>
- Keshri, N., Truppel, I., Herppich, W. B., Geyer, M., Weltzien, C., & Mahajan, P. V. (2020). In-situ measurement of fresh produce respiration using a modular sensor-based system. *Sensors*, 20(12), 3589. <https://doi.org/10.3390/s20123589>
- Kim, Y. H., Yang, Y. J., Kim, J. S., Choi, D. S., Park, S. H., Jin, S. Y., & Park, J. S. (2018). Non-destructive monitoring of apple ripeness using an aldehyde sensitive colorimetric sensor. *Food Chemistry*, 267, 149–156. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.02.110>
- Kuswandi, B., Maryska, C., Jayus, Abdullah, A., & Heng, L. Y. (2013). Real time on-package freshness indicator for guavas packaging. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 7(1), 29–39. <https://doi.org/10.1007/s11694-013-9136-5>
- Kuswandi, B., & Murdyaningsih, E. A. (2017). Simple on package indicator label for monitoring of grape ripening process using colorimetric pH sensor. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 11(4), 2180–2194. <https://doi.org/10.1007/s11694-017-9603-5>
- Lang, C., & Hübert, T. (2012). A colour ripeness indicator for apples. *Food and Bioprocess Technology*, 5(8), 3244–3249. <https://doi.org/10.1007/s11947-011-0694-4>
- Lee, K., Baek, S., Kim, D., & Seo, J. (2019). A freshness indicator for monitoring chicken-breast spoilage using a Tyvek® sheet and RGB color analysis. *Food Packaging and Shelf Life*, 19, 40–46. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2018.11.016>
- Liang, Y., Yao, Y., Liu, Y., Li, Y., Xu, C., Fu, L., & Lin, B. (2022). Curcumin-loaded HKUST-1@ carboxymethyl starch-based composites with moisture-responsive release properties and synergistic antibacterial effect for perishable fruits. *International Journal of Biological Macromolecules*, 214, 181–191. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.06.022>
- Liu, L., Wu, W., Zheng, L., Yu, J., Sun, P., & Shao, P. (2022). Intelligent packaging films incorporated with anthocyanins-loaded ovalbumin-carboxymethyl cellulose nanocomplexes for food freshness monitoring. *Food Chemistry*, 387, 132908. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132908>
- Liu, M., Zhang, J., Liu, S., & Li, B. (2022). A label-free visual aptasensor for zearalenone detection based on target-responsive aptamer-cross-linked hydrogel and color change of gold nanoparticles. *Food Chemistry*, 389, 133078. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133078>
- Liu, X., Le Bourvellec, C., Yu, J., Zhao, L., Wang, K., Tao, Y., Renard, C. M. G. C., & Hu, Z. (2022). Trends and challenges on fruit and vegetable processing: Insights into sustainable, traceable, precise, healthy, intelligent, personalized and local innovative food products. *Trends in Food Science & Technology*, 125, 12–25. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.04.016>
- Liu, Y., Ma, Y., Feng, T., Luo, J., Sameen, D. E., Hossen, M. A., Dai, J., Li, S., & Qin, W. (2021). Development and characterization of aldehyde-sensitive cellulose/chitosan/beeswax colorimetric papers for monitoring kiwifruit maturity. *International Journal of Biological Macromolecules*, 187, 566–574. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.07.132>
- Liu, Y., Wang, R., Wang, D., Sun, Z., Liu, F., Zhang, D., & Wang, D. (2022). Development of a food packaging antibacterial hydrogel based on gelatin, chitosan, and 3-phenyllactic acid for the shelf-life extension of chilled chicken. *Food Hydrocolloids*, 127, 107546. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107546>
- Lu, P., Liu, R., Liu, X., & Wu, M. (2018). Preparation of Self-supporting bagasse cellulose nanofibrils hydrogels induced by zinc ions. *Nanomaterials*, 8(10), 800. <https://doi.org/10.3390/nano8100800>
- Luo, X., Zaitoon, A., & Lim, L.-T. (2022). A review on colorimetric indicators for monitoring product freshness in intelligent food packaging: Indicator dyes, preparation methods, and applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(3), 2489–2519. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12942>
- Ma, Q., & Wang, L. (2016). Preparation of a visual pH-sensing film based on tara gum incorporating cellulose and extracts from grape skins. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 235, 401–407. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.05.107>
- Maftoonazad, N., & Ramaswamy, H. (2019). Design and testing of an electrospun nanofiber mat as a pH biosensor and monitor the pH associated quality in fresh date fruit (*Rutab*). *Polymer Testing*, 75, 76–84. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.01.011>
- Miller, K., Reichert, C. L., & Schmid, M. (2021). Biogenic amine detection systems for intelligent packaging concepts: Meat and meat products. *Food Reviews International*, 1–25. <https://doi.org/10.1080/87559129.2021.1961270>

- Mohammadian, E., Alizadeh-Sani, M., & Jafari, S. M. (2020). Smart monitoring of gas/temperature changes within food packaging based on natural colorants. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(6), 2885–2931. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12635>
- Mohd Ali, M., Hashim, N., & Shahamshah, M. I. (2021). Durian (*Durio zibethinus*) ripeness detection using thermal imaging with multivariate analysis. *Postharvest Biology and Technology*, 176, 111517. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2021.111517>
- Müller, P., & Schmid, M. (2019). Intelligent packaging in the food sector: A brief overview. *Foods*, 8(1), 16. <https://doi.org/10.3390/foods8010016>
- Mutreja, R., Jariyal, M., Pathania, P., Sharma, A., Sahoo, D. K., & Suri, C. R. (2016). Novel surface antigen based impedimetric immunosensor for detection of *Salmonella typhimurium* in water and juice samples. *Biosensors and Bioelectronics*, 85, 707–713. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2016.05.079>
- Nguyen, L. H., Oveissi, F., Chandrawati, R., Dehghani, F., & Naficy, S. (2020). Naked-eye detection of ethylene using thiol-functionalized polydiacetylene-based flexible sensors. *ACS Sensors*, 5(7), 1921–1928. <https://doi.org/10.1021/acssensors.0c00117>
- Niponsak, A., Laohakunjit, N., & Kerdchoechuen, O. (2015). Contribution to volatile fingerprinting and physico-chemical qualities of minimally processed Durian cv. 'Monthong' during storage: Identification of a novel chemical ripeness marker. *Food and Bioprocess Technology*, 8(6), 1229–1243. <https://doi.org/10.1007/s11947-015-1486-z>
- Niponsak, A., Laohakunjit, N., Kerdchoechuen, O., & Wong-sawadee, P. (2016). Development of smart colourimetric starch-based indicator for liberated volatiles during durian ripeness. *Food Research International*, 89, 365–372. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.08.038>
- Niponsak, A., Laohakunjit, N., Kerdchoechuen, O., Wong-sawadee, P., & Uthairatanakij, A. (2020). Novel ripeness label based on starch/chitosan incorporated with pH dye for indicating eating quality of fresh-cut durian. *Food Control*, 107, 106785. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.106785>
- Otoni, C. G., Azeredo, H. M. C., Mattos, B. D., Beaumont, M., Correa, D. S., & Rojas, O. J. (2021). The food-materials nexus: Next generation bioplastics and advanced materials from agri-food residues. *Advanced Materials*, 33(43), 2102520. <https://doi.org/10.1002/adma.202102520>
- Pathak, N., Caleb, O. J., Rauh, C., & Mahajan, P. V. (2017). Effect of process variables on ethylene removal by vacuum ultraviolet radiation: Application in fresh produce storage. *Biosystems Engineering*, 159, 33–45. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.04.008>
- Pereira, V. A., de Arruda, I. N. Q., & Stefani, R. (2015). Active chitosan/PVA films with anthocyanins from *Brassica oleraceae* (red cabbage) as time-temperature indicators for application in intelligent food packaging. *Food Hydrocolloids*, 43, 180–188. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.05.014>
- Perumal, A. B., Huang, L., Nambiar, R. B., He, Y., Li, X., & Selamuthu, P. S. (2022). Application of essential oils in packaging films for the preservation of fruits and vegetables: A review. *Food Chemistry*, 375, 131810. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131810>
- Pirsa, S. (2021). Nanocomposite base on carboxymethylcellulose hydrogel: Simultaneous absorbent of ethylene and humidity to increase the shelf life of banana fruit. *International Journal of Biological Macromolecules*, 193, 300–310. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.10.075>
- Pirsa, S., & Chavoshizadeh, S. (2018). Design of an optical sensor for ethylene based on nanofiber bacterial cellulose film and its application for determination of banana storage time. *Polymers for Advanced Technologies*, 29(5), 1385–1393. <https://doi.org/10.1002/pat.4250>
- Pirsa, S., Sani, I. K., & Mirtalebi, S. S. (2022). Nano-biocomposite based color sensors: Investigation of structure, function, and applications in intelligent food packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, 31, 100789. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100789>
- Qi, W., Wang, H., Zhou, Z., Yang, P., Wu, W., Li, Z., & Li, X. (2020). Ethylene emission as a potential indicator of Fuji apple flavor quality evaluation under low temperature. *Horticultural Plant Journal*, 6(4), 231–239. <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2020.03.007>
- Qin, Y., Liu, Y., Yong, H., Liu, J., Zhang, X., & Liu, J. (2019). Preparation and characterization of active and intelligent packaging films based on cassava starch and anthocyanins from *Lycium ruthenicum* Murr. *International Journal of Biological Macromolecules*, 134, 80–90. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.05.029>
- Rahman, A. T. M. M., Kim, D. H., Jang, H. D., Yang, J. H., & Lee, S. J. (2018). Preliminary study on biosensor-type time-temperature integrator for intelligent food packaging. *Sensors*, 18(6), 1949. <https://doi.org/10.3390/s18061949>
- Shao, P., Liu, L., Yu, J., Lin, Y., Gao, H., Chen, H., & Sun, P. (2021). An overview of intelligent freshness indicator packaging for food quality and safety monitoring. *Trends in Food Science & Technology*, 118, 285–296. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.10.012>
- Shao, P., Liu, L., Yu, J., Zheng, L., & Sun, P. (2022). Novel aldehyde sensitive bio-based colorimetric film for kiwi fruit freshness monitoring. *LWT*, 159, 113177. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113177>

- Shu, C., Zhang, W., Zhao, H., Cao, J., & Jiang, W. (2020). Chlorogenic acid treatment alleviates the adverse physiological responses of vibration injury in apple fruit through the regulation of energy metabolism. *Postharvest Biology and Technology*, 159, 110997. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.110997>
- Sohail, M., Sun, D.-W., & Zhu, Z. (2018). Recent developments in intelligent packaging for enhancing food quality and safety. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(15), 2650–2662. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1449731>
- Tang, Q., Shi, X., Hou, X., Zhou, J., & Xu, Z. (2014). Development of molecularly imprinted electrochemical sensors based on Fe₃O₄@MWNT-COOH/CS nanocomposite layers for detecting traces of acephate and trichlorfon. *Analyst*, 139(24), 6406–6413. <https://doi.org/10.1039/C4AN01514B>
- Tarone, A. G., Cazarin, C. B. B., & Junior, M. R. M. (2020). Anthocyanins: New techniques and challenges in microencapsulation. *Food Research International*, 133, 109092. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109092>
- Umapathi, R., Ghoreishian, S. M., Sonwal, S., Rani, G. M., & Huh, Y. S. (2022). Portable electrochemical sensing methodologies for on-site detection of pesticide residues in fruits and vegetables. *Coordination Chemistry Reviews*, 453, 214305. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2021.214305>
- Valente, J., Almeida, R., & Kooistra, L. (2019). A comprehensive study of the potential application of flying ethylene-sensitive sensors for ripeness detection in apple orchards. *Sensors*, 19(2), 372. <https://doi.org/10.3390/s19020372>
- Vanderroost, M., Ragaert, P., Devlieghere, F., & De Meulenaer, B. (2014). Intelligent food packaging: The next generation. *Trends in Food Science & Technology*, 39(1), 47–62. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2014.06.009>
- Wallace, T. C., Bailey, R. L., Blumberg, J. B., Burton-Freeman, B., Chen, C. O., Crowe-White, K. M., Drownowski, A., Hooshmand, S., Johnson, E., Lewis, R., Murray, R., Shapses, S. A., & Wang, D. D. (2020). Fruits, vegetables, and health: A comprehensive narrative, umbrella review of the science and recommendations for enhanced public policy to improve intake. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(13), 2174–2211. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1632258>
- Wang, J., Li, D., Ye, Y., Qiu, Y., Liu, J., Huang, L., Liang, B., & Chen, B. (2021). A fluorescent metal-organic framework for food real-time visual monitoring. *Advanced Materials*, 33(15), 2008020. <https://doi.org/10.1002/adma.202008020>
- Warsiki, E., & Rofifah, N. (2018). Dragon fruit freshness detector based on methyl red colour indicator. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 209, 012016. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/209/1/012016>
- Yang, J., & Xu, Y. (2021). Prediction of fruit quality based on the RGB values of time-temperature indicator. *Journal of Food Science*, 86(3), 932–941. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15518>
- Yao, Y., Deng, Y., Liang, Y., Li, X., Tang, X., Lin, M., Xu, C., Fu, L., & Lin, B. (2022). Convenient, nondestructive monitoring and sustained-release of ethephon/chitosan film for on-demand of fruit ripening. *International Journal of Biological Macromolecules*, 214, 338–347. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.06.086>
- Yong, H., & Liu, J. (2020). Recent advances in the preparation, physical and functional properties, and applications of anthocyanins-based active and intelligent packaging films. *Food Packaging and Shelf Life*, 26, 100550. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100550>
- Yue, X. Q., Shang, Z. Y., Yang, J. Y., Huang, L., & Wang, Y. Q. (2020). A smart data-driven rapid method to recognize the strawberry maturity. *Information Processing in Agriculture*, 7(4), 575–584. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2019.10.005>
- Zhang, D., & Chen, L. (2021). Design and research of intelligent interaction in fresh fruit and vegetable packaging. *Packaging Engineering*, 42(4), 202–209. <https://doi.org/10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.04.029>
- Zhang, W., Jiang, H., Zhang, Y., Cao, J., & Jiang, W. (2021). Synergistic effects of 1-MCP and hot air treatments on delaying softening and promoting anthocyanin biosynthesis in nectarines. *Postharvest Biology and Technology*, 180, 111598. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2021.111598>
- Zhang, W., Li, X., & Jiang, W. (2020). Development of antioxidant chitosan film with banana peels extract and its application as coating in maintaining the storage quality of apple. *International Journal of Biological Macromolecules*, 154, 1205–1214. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.10.275>
- Zhang, W., Shu, C., Chen, Q., Cao, J., & Jiang, W. (2019). The multi-layer film system improved the release and retention properties of cinnamon essential oil and its application as coating in inhibition to *penicillium* expansion of apple fruit. *Food Chemistry*, 299, 125109. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125109>
- Zhang, W., Zhao, H., Jiang, H., Xu, Y., Cao, J., & Jiang, W. (2020). Multiple 1-MCP treatment more effectively alleviated postharvest nectarine chilling injury than conventional one-time 1-MCP treatment by regulating ROS and energy metabolism. *Food Chemistry*, 330, 127256. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127256>
- Zhang, W., Zhao, H., Zhang, J., Sheng, Z., Cao, J., & Jiang, W. (2019). Different molecular weights chitosan coatings

- delay the senescence of postharvest nectarine fruit in relation to changes of redox state and respiratory pathway metabolism. *Food Chemistry*, 289, 160–168. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.047>
- Zhang, X., Guo, M., Ismail, B. B., He, Q., Jin, T. Z., & Liu, D. (2021). Informative and corrective responsive packaging: Advances in farm-to-fork monitoring and remediation of food quality and safety. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(5), 5258–5282. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12807>
- Zhang, Y., Li, H., Yao, Y., Shen, X., Xu, C., Fu, L., & Lin, B. (2022). Multifunctional flexible Ag-MOFs@CMFP composite paper for fruit preservation and real-time wireless monitoring of fruit quality during storage and transportation. *Food Chemistry*, 395, 133614. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133614>
- Zhao, M., Wang, P., Guo, Y., Wang, L., Luo, F., Qiu, B., Guo, L., Su, X., Lin, Z., & Chen, G. (2018). Detection of aflatoxin B1 in food samples based on target-responsive aptamer-cross-linked hydrogel using a handheld pH meter as readout. *Talanta*, 176, 34–39. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2017.08.006>
- Zheng, L., Liu, L., Yu, J., & Shao, P. (2022). Novel trends and applications of natural pH-responsive indicator film in food packaging for improved quality monitoring. *Food Control*, 134, 108769. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108769>
- Zhou, W., Wu, Z., Xie, F., Tang, S., Fang, J., & Wang, X. (2021). 3D printed nanocellulose-based label for fruit freshness keeping and visual monitoring. *Carbohydrate Polymers*, 273, 118545. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118545>
- Zhu, X., Li, Q., Li, J., Luo, J., Chen, W., & Li, X. (2018). Comparative study of volatile compounds in the fruit of two banana cultivars at different ripening stages. *Molecules*, 23(10), 2456. <https://doi.org/10.3390/molecules23102456>