

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВКЛЮЧЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ЧУФЫ
В СУТОЧНЫЙ НАБОР ПРОДУКТОВ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
В БИОРЕГЕНЕРАТИВНОЙ СИСТЕМЕ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ***

**V.S. Kovalyov, N.S. Manukovsky,
A.A. Tikhomirov, S.A. Ushakova,
V.I. Polonsky, G.S. Kalachyova**

**MODELING INCLUSION OF CHUFA PRODUCTS IN DAILY FOOD PACKAGE
FOR THE USE IN BIOREGENERATIVE LIFE SUPPORT SYSTEM**

Ковалёв В.С. – канд. биол. наук, ст. науч. сотр. лаб. управления биосинтезом фототрофов Института биофизики СО РАН, г. Красноярск. E-mail: kovalev49@mail.ru

Мануковский Н.С. – канд. биол. наук, ст. науч. сотр. лаб. управления биосинтезом фототрофов Института биофизики СО РАН, г. Красноярск. E-mail: mana49@mail.ru

Тихомиров А.А. – д-р биол. наук, проф., зав. лаб. управления биосинтезом фототрофов Института биофизики СО РАН, г. Красноярск. E-mail: alex-tikhomirov@yandex.ru

Ушакова С.А. – канд. биол. наук, вед. науч. сотр. лаб. управления биосинтезом фототрофов Института биофизики СО РАН, г. Красноярск. E-mail: sofya-ushakova@yandex.ru

Полонский В.И. – д-р биол. наук, проф., зав. каф. ботаники, физиологии и защиты растений Красноярского государственного аграрного университета, г. Красноярск. E-mail: vadim.polonskiy@mail.ru

Калачёва Г.С. – д-р биол. наук, зав. аналитической лабораторией Института биофизики СО РАН, г. Красноярск. E-mail: kalach@ibp.ru

Kovalyov V.S. – Cand. Biol. Sci., Senior Staff Scientist, Lab. of Biosynthesis of Phototroph Management, Institute of Biophysics, SB RAS, Krasnoyarsk. E-mail: kovalev49@mail.ru

Manukovsky N.S. – Cand. Biol. Sci., Senior Staff Scientist, Lab. of Biosynthesis of Phototroph Management, Institute of Biophysics SB RAS, Krasnoyarsk. E-mail: mana49@mail.ru

Tikhomirov A.A. – Dr. Biol. Sci., Prof., Head, Lab. of Biosynthesis of Phototroph Management, Institute of Biophysics SB RAS, Krasnoyarsk. E-mail: alex-tikhomirov@yandex.ru

Ushakova S.A. – Cand. Biol. Sci., Leading Staff Scientist, Lab. of Biosynthesis of Phototroph Management, Institute of Biophysics SB RAS, Krasnoyarsk. E-mail: sofya-ushakova@yandex.ru

Polonsky V.I. – Dr. Biol. Sci., Prof., Head, Chair of Botany, Physiology and Protection of Plants, Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk. E-mail: vadim .polonskiy@mail.ru

Kalachyova G.S. – Dr. Biol. Sci., Head, Analytical Laboratory, Institute of Biophysics SB RAS, Krasnoyarsk. E-mail: kalach@ibp.ru

*В среде Excel Visual Basic for Applications проведено компьютерное моделирование включения муки, масла и напитка оршад, получаемых из клубеньков чуфы *Syperus esculentus* L., в базовый суточный набор продуктов (СНП), предназначенный для использования в биорегенеративной системе жизнеобеспече-*

ния и состоящий из продуктов растительного и животного происхождения. Параметры модели: целевые функции – минимизация общей массы и максимизация автономности СНП; независимые переменные – массы продуктов; ограничения – нормы питания, определяемые физиологическими потребностями в энергии и

**Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 56.1.4 программы фундаментальных исследований (раздел 6) Российской академии наук на 2013–2020 годы.*

пищевых веществах взрослого населения России. Условия и последствия включения изделий из чуфы оценивали по следующим показателям: общая масса и автономность СНП, массы муки, масла и напитка Оршад, а также число и номенклатура дисбалансов в СНП. Специфическим показателем в моделировании является автономность СНП: процентная доля массы продуктов, производимых в биорегенеративной системе жизнеобеспечения в общей массе СНП. Минимальная масса СНП с включением изделий из чуфы составляет 3 452 г, максимальная автономность – 95 %. Установлено, что максимальные порции муки, масла и напитка оршад в СНП могут составлять 102, 28 и 2202 г соответственно. Общая масса СНП при этом возрастает до 4 017 г. Арахисовое масло в СНП можно без нарушения норм питания полностью заменить маслом, полученным из клубеньков чуфы. Основанием для использования изделий из чуфы в СНП могут быть увеличение продуктового разнообразия, улучшение вкусовых качеств пищи и удовлетворение индивидуальных пищевых предпочтений.

Ключевые слова: суточный набор продуктов, изделия из чуфы, моделирование, биорегенеративная система жизнеобеспечения.

*With the help of a computer model we have simulated in the Excel Visual Basic for Applications programming environment the inclusion of flour, oil and Orgeat drink, derived from the tubers of chufa *Cyperus esculentus* L., in daily food package (DFP) intended for the use in bioregenerative life-support system and consisted of plant and animal origin products. Parameters of the model: objective functions were minimization of DFP total mass and minimization DFP autonomy, independent variables, masses of products, constraints, i.e. nutritional standards determined by physiological needs for energy and nutrients and recommended for adult population of Russia. The conditions and consequences of chufa product inclusion were estimated by the following indices: DFP total mass and autonomy, masses of flour, oil and Orgeat drink, the nomenclature and number of food imbalances. The specific index in our modeling was DFP autonomy: the ratio "mass of products produced in bioregenerative life-support system/ the total mass of products" expressed in percents. Minimum mass of DFP*

with chufa products was 3452 g, maximal DFP autonomy was 95 %. It has been established that the maximum portion of flour, oil and Orgeat drink in DFP may be 102 g, 28 g, correspondingly. At this the total DFP mass rises to 4017 g. Peanut oil in the DFP can be completely replaced by the oil obtained from chufa tubers keeping in mind the nutritional standards. The reason for the use of chufa products in the DFP could be increasing food variety, improving food palatability and meeting the individual food preferences.

Keywords: daily food package, chufa products, modeling, bioregenerative life support system.

Введение. В экспериментальной системе жизнеобеспечения БИОС-3 измельченные в муку из клубеньков чуфы (*Cyperus esculentus* L.) добавляли к пищевым продуктам как источник полиненасыщенных жирных кислот (ПНЖК) для испытуемых. При этом изменения органолептических свойств пищи не наблюдалось [1].

Физиологическая норма потребления ПНЖК составляла в то время 3,4–3,7 г/сут. В ходе 4-месячного эксперимента в БИОС-3 обеспеченность экипажа ПНЖК превышала 100 %. Данную оценку нельзя считать вполне корректной, поскольку при формировании суточного рациона принцип строгого регламентирования по физиологическим нормам применен лишь для запасаемых продуктов, которые были заранее скомплектованы из расчета среднесуточной потребности и введены в БИОС-3, а продукты внутрисистемного синтеза потреблялись в основном по усмотрению испытуемых [2].

Требуется переоценка возможности использования чуфы в БСЖО, поскольку номенклатура и величины рекомендуемых норм потребления жирных кислот, а также других нутриентов существенно изменились за время, прошедшее от опытов в БИОС-3 до наших дней [3]. В частности, введены нормы на употребление n-3 и n-6 незаменимых жирных кислот на основании исследования их влияния на ишемическую болезнь сердца и другие заболевания [4, 5].

Помимо муки изделиями из клубеньков чуфы являются масло и напиток оршад. Коммерческое производство этих изделий существует в Испании [6]. В России чуфа не получила широкого распространения, поскольку она относится к теплолюбивым растениям.

Цель исследования: определение условий и последствий включения муки, масла и напитка оршад, изготовленных из клубеньков чуфы, в суточный набор пищевых продуктов, предназначенный для употребления в биорегенеративной системе жизнеобеспечения.

Объекты и методы исследования. Моделирование включения изделий из чуфы в СНП проводили в среде Excel 2007 – Visual Basic for Applications.

В качестве базового СНП использовали комплект из продуктов, предложенный для использования в биорегенеративной системе жизнеобеспечения (БСЖО) на лунной базе [7]. Часть продуктов этого комплекта планировали производить в БСЖО: муку, изготовленную из зерен пшеницы *Triticum aestivum* L., зерна риса *Oryza sativa* L., проростки и молоко из бобов сои *Glycine max* (L.) Merr., масло из орехов арахиса *Arachis hypogaea* L., плоды сладкого перца *Cap-sicum frutescens* L. var. longum Bailey, корнеплоды моркови *Daucus carota* L. var. sativa, плоды томатов *Lycopersicon esculentum* L. var. cerasiforme, листья кинзы *Coriandum sativum* L., листья капусты *Brassica chinensis* L., листья салата *Lactuca sativa* L. var. Longifolia Lim., корнеплоды редиса *Raphanus sativus* L., плоды и семена тыквы *Cucurbita moschata* Duch, листья лука батун *Allium fistulosum* L. var. giganteum, луковицы чеснока *Allium sativum* L. и плодовые тела гриба вешенки *Pleurotus florida* Fovose.

Из запасов предполагали использовать консервированные сардины и ставриды в масле, мясной соус, поваренную соль и сахар. Расширенный СНП получали путем добавления к базовому СНП муки, масла и напитка Оршад.

Подобный подход использовали при оценке включения мяса улитки в базовый СНП, который состоял из зерен риса, соевых бобов, салата, земляники, поваренной соли и воды и предназначался для употребления в БСЖО на лунной базе [8].

Базовый и расширенный СНП оценивали по следующим показателям:

- Общая суточная масса набора продуктов (IFM_t), г. Она включает массу продуктов, производимых в БСЖО (IFM_{in}) и массу продуктов из запасов (IFM_s).
- Автономность суточного набора продуктов, %, которая определяется соотношением между массой продуктов, производимой внутри БСЖО, и общей массой СНП:

$$FI = 100IFM_{in} / IFM_t.$$

- Количество дисбалансов (SNI), т. е. количество нутриентов в наборе, масса которых не укладывается в нормы физиологических потребностей.

- Масса муки, изготовленной из клубеньков чуфы, в расширенном наборе (mf), г.
- Масса масла, изготовленного из клубеньков чуфы, в расширенном наборе (mo), г.
- Масса напитка Оршад в расширенном наборе (md), г.

Сравнивали базовый и расширенный суточный набор продуктов, используя следующие целевые функции оптимизации:

- минимизация общей массы набора продуктов

$$IFM_{min} = \min(IFM_t);$$

- максимизация автономности суточного набора продуктов

$$FI_{max} = \max(FI).$$

Чтобы определить верхний предел масс изделий, изготовленных из чуфы, в расширенном СНП и определить причины, препятствующие увеличению масс изделий, использовали следующие целевые функции:

$$mf_{max} = \max(mf) \quad mo_{max} = \max(mo) \\ md_{max} = \max(md).$$

Каждый продукт P представлен в модели как вектор-столбец:

$$P_j = [m_{1j} \ m_{2j} \ \dots \ m_{ij} \ \dots \ m_{uj}]^T,$$

где m_{ij} = масса i-го нутриента в 100 г j-го продукта.

Совокупность векторов $P_1 \ P_2 \ \dots \ P_j \ \dots \ P_v$ представляет собой матрицу «нутриент-продукт» размером $u \times v$, где u – количество отслеживаемых нутриентов; v – количество продуктов в СНП. В нашей модели $u = 43$; в базовом СНП $v = 25$, в расширенном СНП $v = 28$.

К нутриентам относятся белки, жиры, углеводы, клетчатка, вода, минералы, макро- и микроэлементы, витамины, жирные кислоты и аминокислоты. Численные величины масс нутриентов находили в открытых базах данных: USDA National Nutrient Database for Standard Reference, SELFNutritionData, Fodevaredata, European Food Composition Tables.

Суточную массу mn_i i -го нутриента в СНП рассчитывали по формуле

$$mn_i = \sum_1^v \frac{m_{ij} \cdot mp_j}{100},$$

где mp_j – масса j -го продукта в СНП; $1 \leq i \leq u$; $1 \leq j \leq v$.

На область изменения масс нутриентов наложено ограничение $nd_i \leq mn_i \leq nh_i$, где nd_i – нижний предел для массы i -го нутриента, а nh_i – верхний предел, определяемый нормами питания [4].

Независимыми переменными в модели являются массы продуктов mp_j . На область изменения независимых переменных наложено ограничение: $mpd_j \leq mp_j \leq mpu_j$, где mpd_j и mpu_j – верхний и нижний предел массы j -го продукта соответственно.

Калорийность СНП принимали равным 2 800 ккал в соответствии с расчетными суточными энергозатратами испытуемых Бр. и Ас. в БИОС-3 [2]. Расчет калорийности проводили по формуле Атватера

$$E = 4 \cdot [\text{protein}] + 9 \cdot [\text{fat}] + 4 \cdot [\text{carbohydrate}],$$

где $[\text{protein}]$, $[\text{fat}]$, $[\text{carbohydrate}]$ – массы белков, жиров и углеводов в СНП. Верхний предел массы СНП принимали равным 4 017 г в соответствии со схемой массообмена экипажа испытуемых на 2-м этапе эксперимента в БИОС-3 [2]. Пищевую ценность белков определяли по аминокислотной шкале ФАО [9].

Результаты исследования и их обсуждение. Дефицит незаменимых серосодержащих аминокислот в базовом СНП составляет 0,3 г. Несбалансированность базового СНП по серосодержащим аминокислотам обусловлена тем, что полноценные белки продуктов животного происхождения не компенсируют дефицит метионина и цистина в растительных продуктах. Поэтому в базовый СНП добавлен дополнительный продукт – сухой яичный белок, в котором скор суммы «метионин + цистин» и скоры других незаменимых аминокислот не меньше, чем в эталонном белке [9].

Минимальная общая масса базового СНП, при использовании которой соблюдаются все нормы питания, составляет 3 456 г, при этом автономность СНП равна 84 % (табл.). Автономность базового СНП при ее максимизации

достигает 85 % за счет увеличения массы низкокалорийных растительных продуктов, которые производят в БСЖО. Общая масса базового СНП при этом возрастает до 3 485 г.

Минимальная общая масса расширенного СНП составляет 3 452 г. При этом в состав расширенного СНП включены мука и напиток оршад в количестве 15 и 139 г соответственно. Автономность расширенного СНП возрастает до 86 %, поскольку изделия из чуфы предусмотрено производить в БСЖО. Лимитирующим фактором в максимизации автономности расширенного СНП, а также в максимизации масс муки, масла и напитка оршад является принятый нами верхний предел общей массы СНП – 4017 г.

Результаты моделирования находятся в противоречии с опытами по включению муки в продукты питания. Установлено, что мука в количестве 130 г может быть без ущерба для здоровья включена в дневной рацион [1]. В перспективе планировали опыты по увеличению количества муки. Следует отметить, что норма на мононенасыщенные жирные кислоты является «жесткой», поскольку задается одним числом без интервала допустимых отклонений. Возможно, что в будущем норма в отношении мононенасыщенных жирных кислот будет скорректирована, и появится интервал, в пределах которого масса мононенасыщенных жирных кислот в СНП может варьировать. Увеличение массы напитка Оршад приводит к сокращению количества воды и соевого молока, поскольку суточное потребление воды ограничено величиной 4200 г [3]. По-видимому, соотношение масс напитков и воды целесообразно определять на основе индивидуальных предпочтений.

Моделирование показало, что вместо арахисового масла в расширенном СНП можно использовать масло, полученное из клубеньков чуфы. Взаимозаменяемость масел из арахиса и чуфы обусловлена сходным составом жирных кислот: доминируют олеиновая, пальмитиновая и линолевая кислоты. Причем арахисовое масло отличается более высоким содержанием незаменимой $n-6$ линолевой кислоты [10, 11]. Окончательный вывод о перспективе использования арахиса и чуфы в БСЖО можно будет сделать после построения схем материального баланса при производстве масла из этих культур.

Показатели базового и расширенного суточного набора продуктов при использовании различных целевых функций оптимизации

Показатель	Базовый СНП		Расширенный СНП				
	Целевая функция						
	Минимизация общей массы СНП	Максимизация автономности СНП	Минимизация общей массы СНП	Максимизация автономности СНП	Максимизация массы муки	Максимизация массы масла	Максимизация массы напитка
Общая масса СНП, г	3456	3485	3452	4017	4017	4017	4017
Автономность СНП, %	84	85	86	95	94	92	92
Масса муки, г	–	–	15	55	102	0	0
Масса масла, г	–	–	0	0	0	28	6
Масса напитка, г	–	–	139	242	0	270	2202

Выводы

1. Максимальные массы изделий из чужы в суточном наборе продуктов могут достигать: муки – 102 г, масла – 28 г, напитка оршад – 2 202 г, – без нарушения норм питания.

2. Включение изделий из чужы в суточный набор продуктов позволяет увеличить его автономность до 95 %.

3. Вместо арахисового масла в суточном наборе продуктов можно использовать масло, получаемое из клубеньков чужы.

Литература

1. Окладников Ю.Н., Воркель Я.Б., Трубачёв И.Н. и др. Включение в рацион человека чужы как источника полиненасыщенных жирных кислот // Вопросы питания. – 1977. – № 3. – С. 45–48.
2. Замкнутая система: человек – высшие растения. – Новосибирск: Изд-во Наука, 1979. – 160 с.
3. Cooper, M., Douglas, G., Perchonok, M. Developing the NASA food system for long duration missions // J. Food Sci. – 2011. – V. 76. – P. 40–48.
4. Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различ-

ных групп населения Российской Федерации: метод. рекомендации МР 2.3.1.2432-08. – М., 2008. – 30 с.

5. Fats and fatty acids in human nutrition. Report of an expert consultation. FAO food and nutrition paper 91. – 2010. – 170 p.
6. Boeting K., Aguilera de Benzo Z., M. Luisa Cervera M.L. de la Guardia M. Authentication of the protected designation of origin horchata de Valencia through the chemometric treatment of mineral content // Anal. Methods – 2010. – V. 2. – P. 1723–1728.
7. Liu H., Yu C.Y., Manukovsky N.S. et al. A conceptual configuration of the lunar base bioregenerative life support system including soil-like substrate for growing plants // Adv. Space Res. – 2008. – V. 42. – P. 1080–1088.
8. Midorikawa Y., Fujii T., Ohira A. et al. CELSS nutrition system utilizing snails // Acta Astronaut. – 1993. – V., 29. – P. 645–650.
9. Скурихин И.М., Нечаев А.П. Всё о пище с точки зрения химика. – М.: Высш. шк., 1991. – 288 с.
10. Adel A.A. M., Awad A.M., Mohamed H.H. et al. Chemical composition, physicochemical properties and fatty acid profile of Tiger Nut (*Cyperus esculentus* L.) seed oil as affected by different preparation methods // Int. Food Res. J. – 2015. – V. 22. – P. 1931–1938.

11. Özcan M., Seven S. Physical and chemical analysis and fatty acid composition of peanut, peanut oil and peanut butter from COM and NC-7 cultivars // *Grasas y Aceites*. – 2003. – V. 54. – P. 12–18.
- Literatura**
1. Okladnikov Ju.N., Vorkel' Ja.B., Trubachjov I.N. i dr. Vkljuchenie v racion cheloveka chufy kak istochnika polinenasyshhennyh zhirnyh kislot // *Voprosy pitaniya*. – 1977. – № 3. – S. 45–48.
 2. Zamknutaja sistema: chelovek – vysshie rastenija. – Novosibirsk: Izd-vo Nauka, 1979. – 160 s.
 3. Cooper M., Douglas G., Perchonok M. Developing the NASA food system for long duration missions // *J. Food Sci.* – 2011. – V. 76. – P. 40–48.
 4. Normy fiziologicheskikh potrebnostej v jenergii i pishhevyyh veshhestvah dlja razlichnyh grupp naselenija Rossijskoj Federacii: metod. rekomendacii MR 2.3.1.2432-08. – M., 2008. – 30 s.
 5. Fats and fatty acids in human nutrition. Report of an expert consultation. FAO food and nutrition paper 91. – 2010. – 170 p.
 6. Boeting K., Aguilera de Benzo Z., M. Luisa Cervera M.L. de la Guardia M. Authentication of the protected designation of origin horchata de Valencia through the chemometric treatment of mineral content // *Anal. Methods* – 2010. – V. 2. – P. 1723–1728.
 7. Liu H., Yu C.Y., Manukovsky N.S. et al. A conceptual configuration of the lunar base bioregenerative life support system including soil-like substrate for growing plants // *Adv. Space Res.* – 2008. – V. 42. – P. 1080–1088.
 8. Midorikawa Y., Fujii T., Ohira A. et al. CELSS nutrition system utilizing snails // *Acta Astronaut.* – 1993. – V., 29. – P. 645–650.
 9. Skurihin I.M., Nechaev A.P. Vsjo o pishhe s točki zrenija himika. – M.: Vyssh. shk., 1991. – 288 s.
 10. Adel A.A. M., Awad A.M., Mohamed H.H. et al. Chemical composition, physicochemical properties and fatty acid profile of Tiger Nut (*Cyperus esculentus* L.) seed oil as affected by different preparation methods // *Int. Food Res. J.* – 2015. – V. 22. – P. 1931–1938.
 11. Özcan M., Seven S. Physical and chemical analysis and fatty acid composition of peanut, peanut oil and peanut butter from COM and NC-7 cultivars // *Grasas y Aceites*. – 2003. – V. 54. – P. 12–18.



УДК 581.5: 582.632.1:630*16

О.Л. Цандекова, О.А. Неверова

**ОСОБЕННОСТИ АНТИОКСИДАНТНОЙ СИСТЕМЫ *BETULA PENDULA* ROTH.,
ПРОИЗРАСТАЮЩЕЙ В УСЛОВИЯХ ПОРОДНОГО ОТВАЛА
КЕДРОВСКОГО УГОЛЬНОГО РАЗРЕЗА**

O.L. Tsandekova, O.A. Neverova

**FEATURES OF ANTIOXIDANT SYSTEM OF *BETULA PENDULA* ROTH.
IN THE CONDITIONS OF WASTE DUMP KEDROVSKY COAL CUT**

Цандекова О.Л. – канд. с.-х. наук, науч. сотр. Института экологии человека СО РАН, г. Кемерово. E-mail: zandekova@bk.ru

Неверова О.А. – д-р биол. наук, проф. каф. зоологии и экологии Кемеровского государственного университета, г. Кемерово. E-mail: Nev11@yandex.ru

Tsandekova O.L. – Cand. Agr. Sci., Staff Scientist, Institute of Ecology of the Man, SB RAS, Kemerovo. E-mail: zandekova@bk.ru

Neverova O.A. – Dr. Biol. Sci., Prof., Chair of Zoology and Ecology, Kemerovo State University, Kemerovo. E-mail: Nev11@yandex.ru