

EDN: YCIIZS

УДК 57.022

## Analysis of Closure Dynamics of an Experimental Biological Life Support System

Yuri V. Barkhatov<sup>\*a</sup>, Sofya A. Ushakova<sup>a</sup>,  
Alexander A. Tikhomirov<sup>a, b</sup> and Andrey G. Degermendzhy<sup>a</sup>  
*<sup>a</sup>Institute of Biophysics FRC “Krasnoyarsk Science Center SB RAS”  
Krasnoyarsk, Russian Federation  
<sup>b</sup>Siberian Federal University  
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 22.05.2023, received in revised form 25.09.2023, accepted 09.10.2023

**Abstract.** An experimental model of a biological life support system (BLSS) created at the Institute of Biophysics SB RAS has a high level of closure of material cycling with plant wastes and human waste products incorporated into mass exchange. To predict the ways to further increase the level of closure of the BLSS experimental model, a mathematical model based on kinetic coefficients and dependences obtained during experimental research has been constructed. The processes of mass transfer occurring in the BLSS are presented in the model as continuous dynamic processes and are described by differential equations written in the dimensions of mass. The model describes the basic mass transfer processes that make it possible to investigate the behavior of the system without transforming it into an imitation model, which would be too complex to analyze. The verification of the model was conducted using the experimental data obtained in the BLSS experiments. The main distinction of the mathematical model is the possibility of dynamic numerical determination of the system closure coefficient. The closure coefficient is considered here as the ratio of the rate of substance transfer from heterotrophic to autotrophic organisms to the sum of this rate and the rate of the flow of the substance to the dead end. The model of the closed BLSS is able to suggest the ways to increase the degree of the system closure by varying the parameters of the model calculation and its effect on the calculated closure coefficient.

**Keywords:** life support system, mathematical model, closure coefficient.

**Acknowledgements.** The present study was funded by Russian Science Foundation, project number 23-44-00059, <https://rscf.ru/en/project/23-44-00059/>

---

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

\* Corresponding author E-mail address: barkh@ibp.ru

ORCID: 0000-0003-4547-0439 (Barkhatov Y.); 0000-0002-5386-5951 (Ushakova S.); 0000-0001-8649-5419 (Degermendzhi A.)



## **Анализ динамики замкнутости массообменных процессов в экспериментальной модели биологической системы жизнеобеспечения**

**Ю. В. Бархатов<sup>а</sup>, С. А. Ушакова<sup>а</sup>,  
А. А. Тихомиров<sup>а, б</sup>, А. Г. Дегерменджи<sup>а</sup>**

*<sup>а</sup>Институт биофизики  
ФИЦ «Красноярский научный центр СО РАН»  
Российская Федерация, Красноярск  
<sup>б</sup>Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, Красноярск*

**Аннотация.** В ИБФ СО РАН создана экспериментальная модель биологической системы жизнеобеспечения (БСЖО) человека с высокой степенью замкнутости круговоротных процессов с вовлечением в массообмен растительных отходов и экзометаболитов человека. Для прогноза возможностей дальнейшего повышения степени замкнутости рассматриваемой экспериментальной модели БСЖО построена математическая модель, опирающаяся на кинетические коэффициенты и зависимости, полученные в экспериментальных исследованиях. Процессы массообмена, протекающие в системе БСЖО, представлены в модели как непрерывные динамические процессы и описываются дифференциальными уравнениями, записанными в размерностях массы. Модель описывает основные процессы массообмена, позволяющие исследовать поведение системы, не превращая в то же время ее в сложную для анализа имитационную модель. Верификация модели была проведена по экспериментальным данным, полученным при работе с БСЖО. Ключевой особенностью математической модели является возможность динамического численного расчета коэффициента замыкания системы. Коэффициент замыкания рассматривается здесь как отношение скорости поступления вещества от гетеротрофных организмов к автотрофным к сумме этой скорости и скорости ухода вещества в тупик. Модель замкнутой БСЖО способна указывать пути повышения замкнутости системы путем варьирования параметров модельного счета и его влияния на рассчитываемый коэффициент замыкания.

**Ключевые слова:** система жизнеобеспечения, математическая модель, коэффициент замыкания.

**Благодарности.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-44-00059, <https://rscf.ru/project/23-44-00059/>

Цитирование: Бархатов Ю. В. Анализ динамики замкнутости массообменных процессов в экспериментальной модели биологической системы жизнеобеспечения / Ю. В. Бархатов, С. А. Ушакова, А. А. Тихомиров, А. Г. Дегерменджи // Журн. Сиб. федер. ун-та. Биология, 2023. 16(4). С. 522–535. EDN: YCIIZS

## Введение

Биологические системы жизнеобеспечения (БСЖО) являются перспективным инструментом для создания нового поколения систем жизнеобеспечения космического и земного назначения. Они позволяют воспроизводить кислород, воду и растительную пищу за счет зеленых растений, а отходы жизнедеятельности человека и несъедобную биомассу возвращать в круговорот как минеральные удобрения для растений. Возможность создания таких систем была продемонстрирована в 60–70 годах прошлого века сотрудниками Института биофизики СО АН СССР, где были созданы экспериментальные системы жизнеобеспечения БИОС-1, БИОС-2 и БИОС-3 (Salisbury et al., 1997; Gitelson, Lisovsky, 2002, 2008). В системе БИОС-3 была достигнута высокая степень замыкания массообменных процессов – до 100 % по водному балансу и газообмену и до 70 % по биомассе.

Высокая степень замкнутости БСЖО может быть достигнута лишь при тщательном обоснованном подборе отдельных звеньев системы, обеспечении необходимых скоростей и сопряженности круговорота химических элементов и соединений. Игнорирование знаний о механизмах замкнутости, ответственных за поддержание длительного и устойчивого круговорота вещества, может привести к тяжелым последствиям для функционирования системы. Примером такой неудачи является попытка обеспечить работу проекта «Biosphere 2» (сооружение, предназначенное для экспериментального моделирования замкнутой экологической системы, построенное в пустыне Аризона) в автономном режиме на длительный период (Nelson et al., 1993; Marino et al., 1999).

В настоящее время в Институте биофизики СО РАН продолжаются работы по повышению уровня замкнутости в экспери-

ментальных БСЖО. Такое повышение, кроме подбора оптимальных видов для замкнутой экосистемы, предполагает использование гетеротрофного звена – грибов, червей и микроорганизмов, способствующих включению в круговорот большей части растительных отходов. Продуктом их метаболизма является так называемый почвоподобный субстрат (ППС). Он заменяет использованный в системе БИОС-3 нейтральный субстрат и обеспечивает растения минеральными элементами (Manukovsky et al., 1997; Tikhomirov et al., 2003; Gros et al., 2005). Также для включения в круговорот метаболитов человека используется блок физико-химической переработки органических отходов (Kudenko et al., 2000; Tikhomirov et al., 2016). Системы, в которых данные подходы проходят апробацию, являются малоразмерными и рассчитаны на имитационное присутствие доли условного человека.

Одним из вариантов такой экспериментальной БСЖО с высоким уровнем замкнутости является следующий. Используются две вегетационные камеры из нержавеющей стали, объемом по 3000 л каждая, связанные между собой воздушными путями. В одной из камер представлен конвейер пшеницы и солероса, выращиваемых на керамзите с использованием минерализованных экзометаболитов человека, другую камеру занимает конвейер овощных культур, выращиваемых на ППС. В целом экспериментальная БСЖО включает в себя следующие основные блоки: блок фотосинтезирующего звена, блок гетеротрофного окисления отходов, блок физико-химического окисления органических отходов и блок технического обеспечения работы системы. В качестве объектов исследования используются следующие виды высших растений – пшеница мягкая (*Triticum aestivum* L., линия 232 селекции Г.М. Лисовского), со-

лерос европейский (*Salicornia europaea* L.), чуфа (*Cyperus esculentus* L.), редис (*Raphanus sativus* L.) и салат (*Lactuca sativa* L.). Подробно данная БСЖО описана в работах (Tikhomirov et al., 2011; Ushakova et al., 2012; Velichko et al., 2013).

Для прогноза возможностей дальнейшего повышения степени замкнутости рассматриваемой экспериментальной модели БСЖО предлагается математическая модель, опирающаяся на кинетические коэффициенты и зависимости, полученные в экспериментальных исследованиях.

### Материалы и методы

#### Описание математической модели

Модель описывает основные процессы массообмена, позволяющие исследовать поведение системы, не превращая в то же время ее в сложную для анализа имитационную модель. В модель включены следующие компоненты – растения пшеницы, солероса, чуфы, редиса и салата, гетеротрофный блок, условный человек, два вида минерального субстра-

та, почвоподобный субстрат. В модели учтены следующие процессы: фотосинтез с поглощением минеральных элементов пшеницы, солероса, чуфы, салата и редиса, дыхание гетеротрофного блока и условного человека, потребление условным человеком съедобной фитомассы, утилизация организмами гетеротрофного блока несъедобной для человека фитомассы, выделение минеральных элементов условным человеком и организмами гетеротрофного блока. Блок-схема математической модели представлена на рис. 1.

Процессы массообмена, протекающие в системе БСЖО, представлены в модели как непрерывные динамические процессы и описываются дифференциальными уравнениями, записанными в размерностях массы. Используются дифференциальные уравнения вида

$$\frac{dX_n}{dt} = F(X_1, \dots, X_n, \dots, X_m),$$

где  $X_n$  – одна из переменных экосистемы.

Скорость роста общей массы растений пшеницы  $X_1$  определяется как

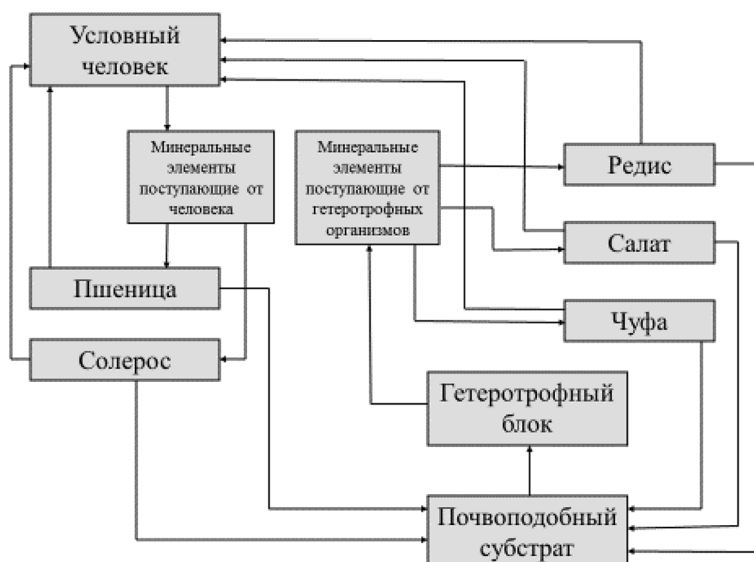


Рис. 1. Блок-схема математической модели системы БСЖО

Fig. 1. Flow chart of the BLSS mathematical model

$$\frac{dX_1}{dt} = \mu_{X1}X_1 - \eta_{X1}X_1, \quad (1)$$

где  $\mu_{X1}$  – удельная скорость роста общей массы растений пшеницы,  $\eta_{X1}$  – удельная скорость метаболических процессов общей массы растений пшеницы, причем

$$\mu_{X1} = \frac{\hat{\mu}_{X1}S_1}{S_1 + K_{S1X1}}, \quad (2)$$

где  $S_1$  – общая масса минеральных элементов, поступающих от условного человека,  $K_{S1X1}$  – константа полунасыщения для общей массы растений пшеницы  $X_1$  по минеральным элементам,  $\hat{\mu}_{X1}$  – максимальная удельная скорость роста общей массы растений пшеницы.

Скорость роста общей массы растений солероса  $X_2$  определяется как

$$\frac{dX_2}{dt} = \mu_{X2}X_2 - \eta_{X2}X_2, \quad (3)$$

где  $\mu_{X2}$  – удельная скорость роста общей массы растений солероса,  $\eta_{X2}$  – удельная скорость метаболических процессов общей массы растений солероса, причем

$$\mu_{X2} = \frac{\hat{\mu}_{X2}S_1}{S_1 + K_{S1X2}}, \quad (4)$$

где  $K_{S1X2}$  – константа полунасыщения для общей массы растений солероса  $X_2$  по минеральным элементам,  $\hat{\mu}_{X2}$  – максимальная удельная скорость роста общей массы растений солероса.

Скорость роста общей массы растений редиса  $X_3$  определяется как

$$\frac{dX_3}{dt} = \mu_{X3}X_3 - \eta_{X3}X_3, \quad (5)$$

где  $\mu_{X3}$  – удельная скорость роста общей массы растений редиса,  $\eta_{X3}$  – удельная скорость

метаболических процессов общей массы растений редиса, причем

$$\mu_{X3} = \frac{\hat{\mu}_{X3}S_2}{S_2 + K_{S2X3}}, \quad (6)$$

где  $S_2$  – общая масса минеральных элементов, поступающих от гетеротрофного блока системы,  $K_{S2X3}$  – константа полунасыщения для общей массы растений редиса  $X_3$  по минеральным элементам,  $\hat{\mu}_{X3}$  – максимальная удельная скорость роста общей массы растений редиса.

Скорость роста общей массы растений салата  $X_4$  определяется как

$$\frac{dX_4}{dt} = \mu_{X4}X_4 - \eta_{X4}X_4, \quad (7)$$

где  $\mu_{X4}$  – удельная скорость роста общей массы растений салата,  $\eta_{X4}$  – удельная скорость метаболических процессов общей массы растений салата, причем

$$\mu_{X4} = \frac{\hat{\mu}_{X4}S_2}{S_2 + K_{S2X4}}, \quad (8)$$

где  $K_{S2X4}$  – константа полунасыщения для общей массы растений салата  $X_4$  по минеральным элементам,  $\hat{\mu}_{X4}$  – максимальная удельная скорость роста общей массы растений салата.

Скорость роста общей массы растений чужы  $X_5$  определяется как

$$\frac{dX_5}{dt} = \mu_{X5}X_5 - \eta_{X5}X_5, \quad (9)$$

где  $\mu_{X5}$  – удельная скорость роста общей массы растений чужы,  $\eta_{X5}$  – удельная скорость метаболических процессов общей массы растений чужы, причем

$$\mu_{X5} = \frac{\hat{\mu}_{X5}S_2}{S_2 + K_{S2X5}}, \quad (10)$$

где  $K_{S_2X_5}$  – константа полунасыщения для общей массы растений чуфы  $X_5$  по минеральным элементам,  $\hat{\mu}_{X_5}$  – максимальная удельная скорость роста общей массы растений чуфы.

Скорость роста общей массы условного человека  $H_1$  определяется как

$$\frac{dH_1}{dt} = -\eta_{H1}H_1 + \varepsilon_{X1}\eta_{X1}X_1 + \varepsilon_{X2}\eta_{X2}X_2 + \varepsilon_{X3}\eta_{X3}X_3 + \varepsilon_{X4}\eta_{X4}X_4 + \varepsilon_{X5}\eta_{X5}X_5, \quad (11)$$

где  $\eta_{H1}$  – удельная скорость выделения минеральных элементов из общей массы условного человека,  $\varepsilon_{X1}$  – доля съедобной биомассы в общей биомассе пшеницы,  $\varepsilon_{X2}$  – доля съедобной биомассы в общей биомассе солероса,  $\varepsilon_{X3}$  – доля съедобной биомассы в общей биомассе редиса,  $\varepsilon_{X4}$  – доля съедобной биомассы в общей биомассе салата,  $\varepsilon_{X5}$  – доля съедобной биомассы в общей биомассе чуфы.

Скорость роста массы минеральных элементов, поступающих от условного человека,  $S_1$ , определяется как

$$\frac{dS_1}{dt} = \alpha_{\eta H1}\eta_{H1}H_1 - \frac{\mu_{X1}X_1}{Y_{X1}} - \frac{\mu_{X2}X_2}{Y_{X2}} \quad (12)$$

где  $\alpha_{\eta H1}$  – относительное содержание минеральных элементов в выделениях условного человека,  $Y_{X1}$  – коэффициент урожайности пшеницы по минеральным элементам, поступающим от условного человека,  $Y_{X2}$  – коэффициент урожайности солероса по минеральным элементам, поступающим от условного человека.

Скорость роста общей массы гетеротрофных организмов системы  $H_2$  определяется как

$$\frac{dH_2}{dt} = \mu_{H2}H_2 - \eta_{H2}H_2, \quad (13)$$

где  $\mu_{H2}$  – удельная скорость роста общей массы гетеротрофных организмов,  $\eta_{H2}$  – удельная

скорость метаболических процессов общей массы гетеротрофных организмов, причем

$$\mu_{H2} = \frac{\hat{\mu}_{H2}D}{D + K_{DH2}}, \quad (14)$$

где  $D$  – общая масса почвоподобного субстрата,  $K_{DH2}$  – константа полунасыщения для общей массы гетеротрофных организмов по почвоподобному субстрату,  $\hat{\mu}_{H2}$  – максимальная удельная скорость роста общей массы гетеротрофных организмов.

Скорость роста общей массы почвоподобного субстрата  $D$  определяется как

$$\begin{aligned} \frac{dD}{dt} = & (1 - \varepsilon_{X1})\eta_{X1}X_1 + (1 - \varepsilon_{X2})\eta_{X2}X_2 + \\ & + (1 - \varepsilon_{X3})\eta_{X3}X_3 + (1 - \varepsilon_{X4})\eta_{X4}X_4 + \\ & + (1 - \varepsilon_{X5})\eta_{X5}X_5 - \frac{\mu_{H2}H_2}{Y_{H2}}, \end{aligned} \quad (15)$$

где  $Y_{H2}$  – коэффициент урожайности гетеротрофных организмов по почвоподобному субстрату.

Скорость роста массы минеральных элементов, поступающих от гетеротрофных организмов системы,  $S_2$ , определяется как

$$\begin{aligned} \frac{dS_2}{dt} = & \alpha_{\mu H2}\mu_{H2}H_2 - \\ & - \frac{\mu_{X3}X_3}{Y_{X3}} - \frac{\mu_{X4}X_4}{Y_{X4}} - \frac{\mu_{X5}X_5}{Y_{X5}}, \end{aligned} \quad (16)$$

где  $\alpha_{\mu H2}$  – относительное содержание минеральных элементов в выделениях гетеротрофных организмов,  $Y_{X3}$  – коэффициент урожайности редиса по минеральным элементам, поступающим от гетеротрофных организмов,  $Y_{X4}$  – коэффициент урожайности салата по минеральным элементам, поступающим от гетеротрофных организмов,  $Y_{X5}$  – коэффициент урожайности чуфы по минеральным

элементам, поступающим от гетеротрофных организмов.

Верификация модели проводилась по экспериментальным данным, полученным при работе с экспериментальной моделью БСЖО.

Значения коэффициентов для представленных далее расчетов использовались следующие:

$$\begin{aligned} \eta_{X1} &= 0,1 \text{ сут}^{-1}, K_{S1X1} = 3 \text{ г}, \mu_{X1} = 0,1 \text{ сут}^{-1}, \\ \eta_{X2} &= 0,1 \text{ сут}^{-1}, K_{S1X2} = 3 \text{ г}, \mu_{X2} = 0,1 \text{ сут}^{-1}, \\ \eta_{X3} &= 0,01 \text{ сут}^{-1}, K_{S2X3} = 1 \text{ г}, \mu_{X3} = 0,2 \text{ сут}^{-1}, \\ \eta_{X4} &= 0,01 \text{ сут}^{-1}, K_{S2X4} = 1 \text{ г}, \mu_{X4} = 0,2 \text{ сут}^{-1}, \\ \eta_{X5} &= 0,01 \text{ сут}^{-1}, K_{S2X5} = 1 \text{ г}, \mu_{X5} = 0,2 \text{ сут}^{-1}, \\ \eta_{H1} &= 0,9 \text{ сут}^{-1}, \varepsilon_{X1} = 0,22, \varepsilon_{X2} = 0,88, \varepsilon_{X3} = 0,39, \\ \varepsilon_{X4} &= 9, \varepsilon_{X5} = 0,4, \alpha_{\eta H1} = 0,9, Y_{X1} = 10, Y_{X2} = 10, \\ \eta_{H2} &= 0,01 \text{ сут}^{-1}, K_{DH2} = 100 \text{ г}, \mu_{H2} = 0,01 \text{ сут}^{-1}, \\ Y_{H2} &= 0,5, \alpha_{\mu H2} = 0,5, Y_{X3} = 10, Y_{X4} = 10, Y_{X5} = 10. \end{aligned}$$

#### Коэффициент замыкания

Ключевой особенностью математической модели является возможность динамического численного расчета коэффициента замыкания системы. Коэффициент замыкания согласно (Gubanov, Degermendzhy, 2008) рассматривается как отношение скорости поступления вещества от гетеротрофных организмов к автотрофным к сумме этой скорости и скорости ухода вещества в тупик и определяется по формуле:

$$Cl = \frac{\sum_i \sum_k \dot{\Omega}_{ik}}{\sum_i \sum_k \dot{\Omega}_{ik} + \sum_i \sum_l \dot{U}_{il}}, \quad (17)$$

где  $\dot{\Omega}$  – скорость поступления вещества от гетеротрофных организмов к автотрофным,  $\dot{U}$  – скорость потери вещества системой (ухода вещества в тупик),  $Cl$  – коэффициент замыкания круговорота по веществу,  $k$  и  $l$  – все возможные пути переноса вещества, поступающего от гетеротрофных организмов к авто-

трофным и уходящего в тупик. Из (17) следует, что  $0 \leq Cl \leq 1$ , где 1 – это полное замыкание. Такой вид определения степени замкнутости представляется обоснованным для систем, существующих на запасах вещества или предусматривающих его наличие (Gubanov et al., 2009a). К последним относятся системы типа БСЖО, в том числе рассматриваемая система, созданная в Институте биофизики СО РАН. Показано (Gubanov et al., 2009b), что в таких БСЖО стабильность коэффициента замыкания может служить критерием стабильности самой системы.

Для используемой системы уравнений коэффициент замыкания определяется как

$$Cl = \frac{\mu_{X1}X_1 + \mu_{X2}X_2 + \mu_{X3}X_3 + \mu_{X4}X_4 + \mu_{X5}X_5}{\mu_{X1}X_1 + \mu_{X2}X_2 + \mu_{X3}X_3 + \mu_{X4}X_4 + \mu_{X5}X_5 + (1 - \alpha_{\eta H1})\eta_{H1}H_1 + (1 - \alpha_{\mu H2})\mu_{H2}H_2}. \quad (18)$$

#### Результаты и обсуждение

С помощью математической модели (1–16) и на основании экспериментальных данных был проведен анализ степени замкнутости внутрисистемного круговорота вещества в экспериментальной модели БСЖО.

На рис. 2 представлена модельная динамика растительных компонентов системы за годовой период. Общая биомасса пшеницы составляет 800–850 г, чуфы 500–850 г, соле-роса 30–35 г, салата 12–23 г, редиса 14–21 г. Существенное падение биомассы чуфы, салата и редиса в системе с течением времени является следствием процесса вывода части растительной биомассы из биотического круговорота и включением ее в состав ППС, что соответствует аналогичному процессу в экспериментальной БСЖО. Формирование запаса несъедобной биомассы (4,8 г в сутки) связано с уменьшением продуктивности салатных культур из-за аллелопатических свой-

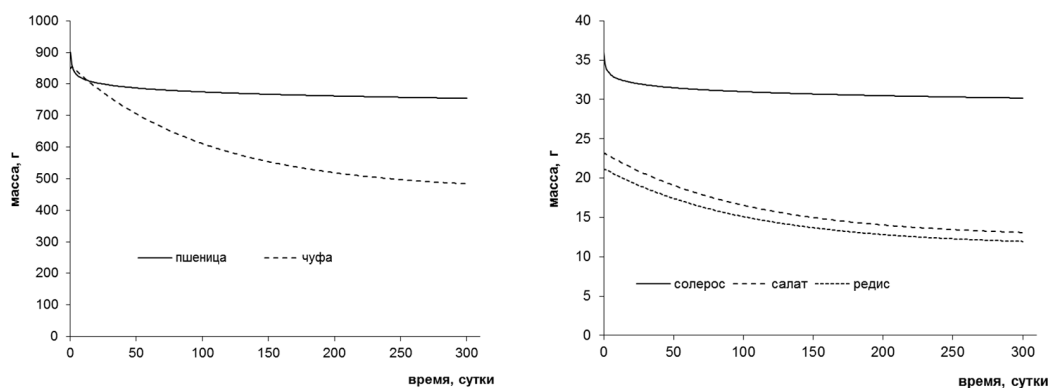


Рис. 2. Динамика массы пшеницы, солероса, салата, редиса и чужы в экспериментальной замкнутой системе за годовой период (модельный расчет)

Fig. 2. Dynamics of wheat, glasswort, lettuce, radish, and chufa biomass in the BLSS over a year (model calculation)

ств листьев чужы. Салат и редис находились в том же вегетационном блоке, что и чужа и были включены в ту же петлю массообмена.

Модельный расчет динамического коэффициента замыкания системы за тот же период представлен на рис. 3 в двух вариантах – соответствующем реальной БСЖО и гипотетическим вариантом без выноса вещества в ППС. В системе без выноса вещества

коэффициент замыкания достаточно высок и соответствуют значению, близкому 0,97. Коэффициент замыкания в целом стабилен и демонстрирует только легкое незначительное повышение в течение всего года. Для той системы, где из массообменного цикла систематически удаляется часть вещества, идущего на образование ППС, коэффициент замыкания существенно ниже и составляет

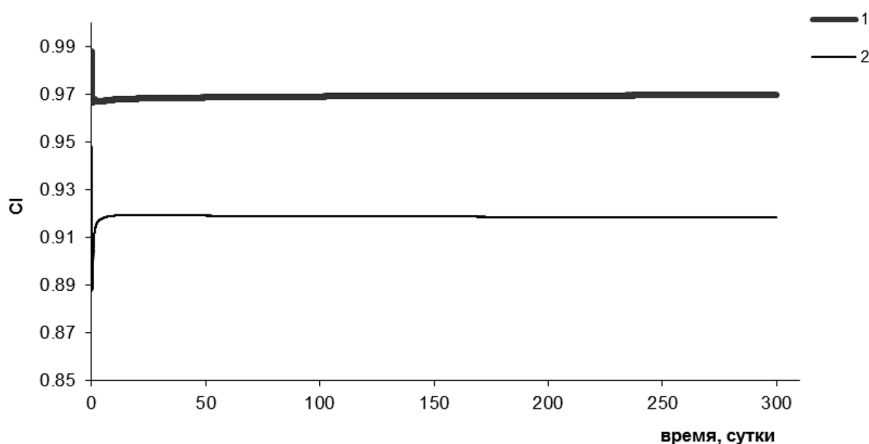


Рис. 3. Динамика коэффициента замыкания в экспериментальной системе БСЖО (модельный расчет). 1 – вариант без постоянного перехода части вещества системы в ППС, 2 – вариант с переходом части вещества системы в ППС со скоростью 4,8 г в сутки

Fig. 3. Dynamics of the closure coefficient in the experimental BLSS (model calculation). 1 – without constant transfer of part of the system matter into SLS, 2 – with transfer of part of the system matter into SLS at a 4.8 g per day rate



0,91–0,92, с тенденцией к дальнейшему понижению.

Отсюда следует, что математическая модель экспериментальной замкнутой БСЖО способна подсказать пути повышения замкнутости системы путем варьирования параметров модельного счета и влияния его на рассчитываемый коэффициент замыкания. В частности, изменение числа переменных и формы уравнений дает прогноз на изменение числа компонентов экспериментальной системы и ее конфигурации, изменение коэффициентов – на замену видов или изменение небиотических параметров системы, таких как объем, освещенность и т.д., изменение начальных условий – на изменение начальных биомасс компонентов.

Один из примеров такого варьирования представлен на рис. 4. Стандартное состояние

системы сравнивается с двумя гипотетическими – увеличением в два раза и уменьшением до нуля массы каждой из двух компонент БСЖО – пшеницы и чуфы. Видно, что уменьшение массы пшеницы в системе до нуля значительно влияет на значение коэффициента замыкания в сторону его уменьшения – он падает ниже значения 0,9. Увеличение массы пшеницы в 2 раза увеличивает и коэффициент замыкания, но очень незначительно. Подобного рода модельные манипуляции с содержанием в системе чуфы (сравнимой с пшеницей по общей массе) не влекут за собой существенных изменений коэффициента замыкания в обоих случаях. Данный результат позволяет сделать вывод о высокой чувствительности показателя замкнутости системы БСЖО к колебаниям массы пшеницы, причем увеличение массы пшеницы будет ве-

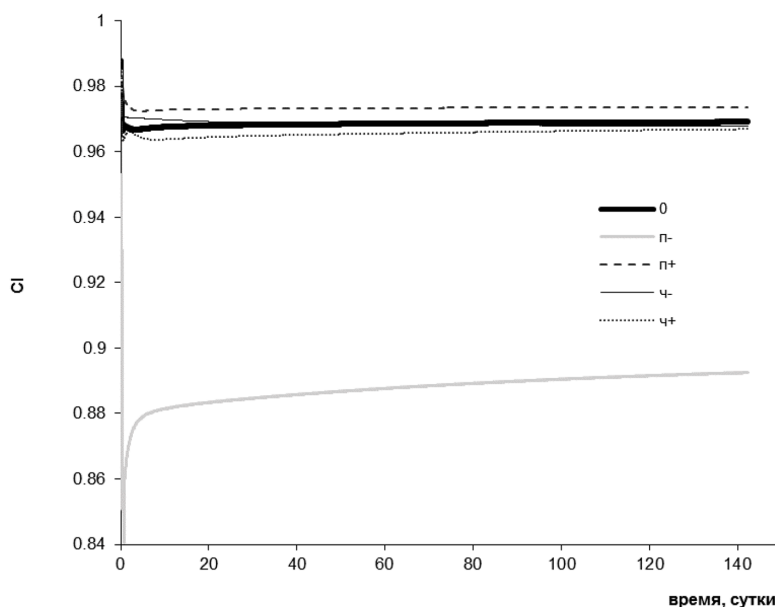


Рис. 4. Модельный расчет динамических коэффициентов замыкания для различных вариаций содержания пшеницы и чуфы в БСЖО. 0 – стандартное состояние системы, «п-» – начальная масса пшеницы уменьшена до нуля, «п+» – начальная масса пшеницы увеличена в 2 раза, «ч-» – начальная масса чуфы уменьшена до нуля, «ч+» – начальная масса чуфы увеличена в 2 раза

Fig. 4. Model calculation of dynamic closure coefficients for various contents of wheat and chufa in the BLSS. 0 – standard state of the system, “п-” – the initial weight of wheat is reduced to zero, “п+” – the initial weight of wheat is doubled, “ч-” – the initial weight of chufa is reduced to zero, “ч+” – the initial weight of chufa is doubled

сти к увеличению коэффициента замыкания, а уменьшение массы пшеницы его снижает. Масса чужды же может меняться в широких пределах без существенного влияния на уровень замкнутости.

Коэффициент замыкания не является важнейшим и единственным параметром, согласно которому можно рекомендовать производить изменения в системе БСЖО, хотя его всегда следует принять во внимание. Способность системы жизнеобеспечения выполнять свою основную функцию – поддержание жизнедеятельности человека – не менее и даже более важна. В рамках данной математической модели такую функцию отражает содержание съедобной биомассы в общей биомассе присутствующих в системе растений. Понятно, что этот параметр в первую очередь определяется физиологическими свойствами самого растения и варьировать его в экспериментальной системе достаточно сложно. Как правило, согласно целевой функции системы, из существующих вариантов должен отби-

раться тот, в котором содержание съедобной биомассы максимально. Но как повлияет показатель содержания съедобной биомассы на уровень замыкания, можно оценить в математической модели.

На рис. 5 представлен ряд динамических коэффициентов замыкания для разных уровней реального (0,22) и гипотетического содержания съедобной биомассы в общей биомассе пшеницы. Видно, что реальное содержание съедобной биомассы не обеспечивает наибольший возможный показатель замыкания БСЖО (который в этом случае составляет около 0,97), а ее имитационное повышение до 0,3 и 0,4 еще более снижает коэффициент замыкания (до 0,95–0,96). При снижении же доли съедобной биомассы в пшенице до 0,1 коэффициент замыкания увеличивается и составляет чуть меньше 0,98. При полном отсутствии съедобной биомассы в общей биомассе пшеницы коэффициент замыкания первоначально еще немного выше, но практически сразу начинает снижение и к концу расчетно-

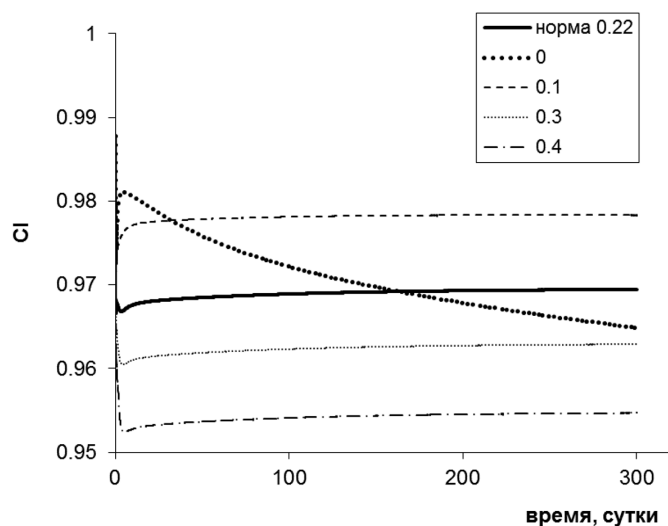


Рис. 5. Динамика коэффициента замыкания в экспериментальной системе БСЖО для различных значений коэффициента содержания съедобной биомассы в общей биомассе пшеницы

Fig. 5. Dynamics of the closure coefficient in the experimental BLSS for different values of the coefficient of edible biomass content in the total biomass of wheat

го периода падает ниже уровня характерного для реального содержания съедобной биомассы. При остальных вариантах коэффициент замыкания относительно стабилен. Ясно, что не стоит уменьшать принципиально важные показатели системы ради небольшого увеличения замкнутости, но знать о подобном механизме может быть полезно.

Расчет динамического коэффициента замыкания хотелось бы рекомендовать включать в математические модели систем жизнеобеспечения прежде всего как количественный показатель качества таких систем. Но, как правило, этого не происходит, хотя такие модели создаются и развиваются. В настоящее время большинство представленных в литературе моделей БСЖО связано с экспериментальным модулем «Лунный дворец» программы исследований «Искусственная закрытая экосистема для постоянного жизнеобеспечения космической базы» (КНП) (Dong et al., 2017). Так, сотрудниками данной программы была разработана кинетическая модель простой замкнутой экологической системы с высшими растениями (*Brassica oleracea*) рассматриваемой как диссипативная структура (Hu et al., 2018), модель прошла высокоточную валидацию на экспериментальных данных. Также разработана модель микроводорослей (*Spirulina platensis*) в биореакторе на основе нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка (Hu et al., 2008) с использованием искусственной нейронной сети. Основная цель данных работ – это оптимизация системы контроля таких систем при возможных возмущениях стационарного состояния. В работе (Yang et al., 2020) с помощью кинетических моделей исследовались взаимодействия микробных сообществ в искусственных системах под действием низких доз ионизирующего излучения. Была показана возможность формирования в таких БСЖО

высокой степени микробного биоразнообразия. В (Hu et al., 2013) представлена очень подробная кинетическая модель биореактора на основе ППС (подобного тому, что моделируется нами), показывающая возможность его длительного существования в широком диапазоне условий. Делается вывод, что введение ППС в БСЖО потенциально повысит как степень замкнутости, так и устойчивость системы, что согласуется с нашими представлениями о развитии технологии биологических систем жизнеобеспечения.

Существуют и другие математические модели БСЖО. Модель, описанная в (Boscheri et al., 2012), использовалась для прогнозирования производительности прототипа лунной теплицы (проект Аризонского университета) для выращивания нескольких культур (помидоры, картофель, салат и клубника). Модель рассчитывает рост растений в терминах производства биомассы, используя расчет прироста углерода через несколько регулируемых параметров. Модель хорошо предсказывает результаты длительных экспериментов, но оказывается заметно менее точной на коротких промежутках времени. В (Fulget et al., 1999) представлена общая модель замкнутой экосистемы жизнеобеспечения, основанной на микроорганизмах. В условиях стационарного состояния каждый компартмент системы описывался одним или несколькими стехиометрическими уравнениями, полученными на основе знаний о путях клеточного метаболизма, специфичного для микроорганизма, а для экипажа – на основе метаболических потребностей человека. В работе (Kovalev et al., 2022) была разработана концептуальная конфигурация грибной фермы в составе биорегенеративной системы жизнеобеспечения на обитаемой лунной базе. Бабичева и Губанов (2006а, 2006б) предложили математическую модель варианта того же модуля БСЖО,

что описан в данной работе, но без участия человека. Модель основана на системе обыкновенных дифференциальных уравнений и описывает существование в замкнутом цикле высшего растения рода *Arabidopsis*, земляных червей и бактерий. Для системы уравнений аналитически найдены условия замкнутости. Еще один вариант экспериментальной системы, включающей два вида высших растений (пшеницу и редис), грибы, а также условное присутствие 1/30 доли человека (Tikhomirov et al., 2003), был представлен в виде математической модели на основе обыкновенных дифференциальных уравнений (Gubanov et al., 2009a, 2009b). В этой работе использовались расчеты динамического коэффициента замыкания.

Это позволило оценить различные варианты существования системы и предложить некоторые подходы к организации оптимального функционирования БСЖО.

### Заключение

Представленная математическая модель замкнутой экспериментальной БСЖО способна рассчитывать динамический коэффициент замыкания системы по веществу, предсказывать изменение степени замкнутости для различных вариантов существования системы и ее компонентов и давать прогноз относительно возможностей дальнейшего повышения степени замкнутости круговоротных процессов.

### Список литературы / References

Бабичева Е.В., Губанов В.Г. (2006а) Математическая модель самоподдерживающейся высокозамкнутой по массообмену экспериментальной экосистемы (без учета человека). 1. Построение модели. *Вестник Красноярского государственного университета. Физико-математические науки*, 1: 55–57 [Babicheva E. V., Gubanov V. G. (2006a) Mathematical model of self-supported highly closed on the mass exchanging of experimental ecosystem (without the man). 1. Construction of model. *Bulletin of Krasnoyarsk State University. Physical and Mathematical Sciences* [Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo universiteta. Fiziko-matematicheskie nauki], 1: 55–57 (in Russian)]

Бабичева Е.В., Губанов В.Г. (2006b) Математическая модель самоподдерживающейся высокозамкнутой по массообмену экспериментальной экосистемы без звена-задатчика. 2. Анализ модели. *Вестник Красноярского государственного университета. Физико-математические науки*, 9: 32–37 [Babicheva E. V., Gubanov V. G. (2006b) A mathematical model of the self-sustained experimental ecosystem with an essentially closed mass exchange loop (excluding the human). 2. Analysis of the model. *Bulletin of Krasnoyarsk State University. Physical and Mathematical Sciences* [Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo universiteta. Fiziko-matematicheskie nauki], 9: 32–37 (in Russian)]

Boscheri G., Kacira M., Patterson L., Giacomelli G., Sadler P., Furfaro R., Lobascio C., Lamantea M., Grizzaffi L. (2012) Modified energy cascade model adapted for a multicrop Lunar greenhouse prototype. *Advances in Space Research*, 50(7): 941–951

Dong C., Fu Y., Xie B., Wang M., Liu H. (2017) Element cycling and energy flux responses in ecosystem simulations conducted at the Chinese Lunar Palace-1. *Astrobiology*, 17(1): 78–86

Fulget N., Poughon L., Richalet J., Lasseur C. (1999) MELISSA: Global control strategy of the artificial ecosystem by using first principles models of the compartments. *Advances in Space Research*, 24(3): 397–405

- Gitelson I.I., Lisovsky G.M. (2008) Creation of closed ecological life support systems: results, critical problems and potentials. *Journal of Siberian Federal University. Biology*, 1(1): 19–39
- Gitelson J.I., Lisovsky G.M. (2002) *Man-made closed ecological systems*. London, CRC Press, 416 p.
- Gros J.B., Lasseur C., Tikhomirov A.A., Manukovsky N.S., Kovalev V.S., Ushakova S.A., Zolotukhin I.G., Tirranen L.S., Karnachuk R.A., Dorofeev V.Y. (2005) Testing soil-like substrate for growing plants in bioregenerative life support systems. *Advances in Space Research*, 36(7): 1312–1318
- Gubanov V.G., Barkhatov Y.V., Manukovsky N.S., Tikhomirov A.A., Degermendzhy A.G., Gross J.-B. B., Lasseur C. (2009a) Mathematical and computer simulation of the biological life support system module 1/2. Description of the model. *Journal of Siberian Federal University. Biology*, 2(4): 466–480
- Gubanov V.G., Barkhatov Y.V., Manukovsky N.S., Ushakova S.A., Gribovskaya I.V., Tikhomirov A.A., Degermendzhy A.G., Gross J.-B. R., Lasseur C. (2009b) Mathematical and computer simulation of the biological life support system module 2/2. Verification of the model and scenarios. *Journal of Siberian Federal University. Biology*, 2(4): 481–496
- Gubanov V.G., Degermendzhy A.G. (2008) Biotic turnover in superorganism systems: several principles of establishment and sustenance (theoretical analysis, debatable issues). *Biosphere Origin and Evolution*. Dobretsov N., Kolchanov N., Rozanov A., Zavarzin G. (Eds.) Boston, Springer US, p. 327–348
- Hu D., Liu H., Yang C., Hu E. (2008) The design and optimization for light-algae bioreactor controller based on Artificial Neural Network-Model Predictive Control. *Acta Astronautica*, 63(7–10): 1067–1075
- Hu D., Zhang H., Li L., Zhou R., Sun Y. (2013) Mathematical modeling, design and optimization of conceptual configuration of soil-like substrate bioreactor based on system dynamics and digital simulation. *Ecological Engineering*, 51: 45–58
- Hu D., Wang K., Hu J., Xu X., Long Y. (2018) Robust stability of closed artificial ecosystem cultivating cabbage realized by ecological thermodynamics and dissipative structure system. *Ecological Modelling*, 380: 1–7
- Kovalev V.S., Grandl W., Manukovsky N.S., Tikhomirov A.A., Böck C. (2022) Modeling a lunar base mushroom farm. *Life Sciences in Space Research*, 33: 1–6
- Kudenko Y.A., Gribovskaya I.V., Zolotukhin I.G. (2000) Physical–chemical treatment of wastes: a way to close turnover of elements in LSS. *Acta Astronautica*, 46(9): 585–589
- Manukovsky N.S., Kovalev V.S., Rygalov V.Y., Zolotukhin I.G. (1997) Waste bioregeneration in life support CES: Development of soil organic substrate. *Advances in Space Research*, 20(10): 1827–1832
- Marino B.D. V., Mahato T.R., Druitt J.W., Leigh L., Lin G., Russell R.M., Tubiello F.N. (1999) The agricultural biome of Biosphere 2: Structure, composition and function. *Ecological Engineering*, 13(1–4): 199–234
- Nelson M., Burgess T.L., Alling A., Alvarez-Romo N., Dempster W.F., Walford R.L., Allen J.P. (1993) Using a closed ecological system to study Earth's biosphere: initial results from Biosphere 2. *BioScience*, 43(4): 225–236
- Salisbury F.B., Gitelson J.I., Lisovsky G.M. (1997) Bios-3: Siberian experiments in bioregenerative life support: attempts to purify air and grow food for space exploration in a sealed environment began in 1972. *BioScience*, 47(9): 575–585

Tikhomirov A. A., Trifonov S. V., Morozov E. A., Kudenko Y. A., Kalacheva G. S., Ushakova S. A. (2016) Development of human exometabolite deep mineralization method for closed ecosystems. *Doklady Biochemistry and Biophysics*, 470(1): 316–318

Tikhomirov A. A., Ushakova S. A., Manukovsky N. S., Lisovsky G. M., Kudenko Y. A., Kovalev V. S., Gubanov V. G., Barkhatov Y. V., Gribovskaya I. V., Zolotukhin I. G., Gros J. B., Lasseur C. (2003) Mass exchange in an experimental new-generation life support system model based on biological regeneration of environment. *Advances in Space Research*, 31(7): 1711–1720

Tikhomirov A. A., Ushakova S. A., Velichko V. V., Tikhomirova N. A., Kudenko Y. A., Gribovskaya I. V., Gros J. B., Lasseur C. (2011) Assessment of the possibility of establishing material cycling in an experimental model of the bio-technical life support system with plant and human wastes included in mass exchange. *Acta Astronautica*, 68(9–10): 1548–1554

Ushakova S. A., Tikhomirov A. A., Tikhomirova N. A., Kudenko Y. A., Litovka Y. A., Anishchenko O. V. (2012) A biological method of including mineralized human liquid and solid wastes into the mass exchange of bio-technical life support systems. *Advances in Space Research*, 50(7): 932–940

Velichko V. V., Tikhomirov A. A., Ushakova S. A., Tikhomirova N. A., Shihov V. N., Tirranen L. S., Gribovskaya I. A. (2013) Production characteristics of the “higher plants–soil-like substrate” system as an element of the bioregenerative life support system. *Advances in Space Research*, 51(1): 115–123

Yang X., Xu X., Hu D. (2020) Succession mechanism of microbial community with high species diversity in nutrient-deficient environments with low-dose ionizing radiation. *Ecological Modelling*, 435: 109270