


УДК 51-76

DOI: [10.26102/2310-6018/2024.47.4.016](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.47.4.016)

Архитектура системы прогнозирования состояния здоровья пациента с использованием методов агентного моделирования и машинного обучения

А.С. Лисовенко¹, О.В. Лимановская², Д.А. Тарасов¹, В.Н. Мещанинов^{2,3},
И.В. Гаврилов^{2,3}

¹Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Российская Федерация

²Центр специализированных видов медицинской помощи «Институт медицинских клеточных технологий», Екатеринбург, Российская Федерация

³Уральский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации, Екатеринбург, Российская Федерация

Резюме. Внедрение информационных технологий в медицинские учреждения способствует развитию предиктивной, превентивной и персонализированной медицины. Возникающая при этом задача создания программного аналога пациента, способного учесть его индивидуальные показатели и спрогнозировать состояние здоровья, до сих пор актуальна. Представленная в работе архитектура системы прогнозирования состояния здоровья пациента направлена на решение этой задачи. Отличительной особенностью архитектуры системы является сочетание принципов агентного моделирования и представление организма пациента в виде взаимодействующих между собой модулей, что открывает широкие возможности для моделирования состояния здоровья организма пациента. В работе описана иерархия агентов в архитектуре системы, описаны правила взаимодействия агентов и приведена математическая модель оценки эффективности терапевтических воздействий на организм пациента, решение которой достигается путем взаимодействия агентов системы. Прогнозирование состояния здоровья пациента производится с помощью загружаемых предварительно обученных моделей машинного обучения, модели при этом непосредственно участвуют в определении поведения агентов. Архитектура системы прогнозирования состояния здоровья пациента, реализованная в виде программного комплекса, представляет собой мощный инструмент для построения агентных моделей прогнозирования, направленных на моделирование физиологических и патологических процессов и воздействий на организм пациента.

Ключевые слова: прогнозирование состояния здоровья, здоровье пациента, агентное моделирование, цифровой двойник пациента, модульный подход.

Для цитирования: Лисовенко А.С., Лимановская О.В., Тарасов Д.А., Мещанинов В.Н., Гаврилов И.В. Архитектура системы прогнозирования состояния здоровья пациента с использованием методов агентного моделирования и машинного обучения. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2024;12(4). URL: <https://moitvivr.ru/ru/journal/pdf?id=1724> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.47.4.016

Architecture of the patient's health predicting system using agent-based modeling and machine learning methods

A.S. Lisovenko¹, O.V. Limanovskaya², D.A. Tarasov¹, V.N. Meshchaninov^{2,3},
I.V. Gavrilov^{2,3}

¹Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, the Russian Federation

²*Specialized Medical Care Center of Medical Cell Technology Institute,
Yekaterinburg, the Russian Federation*

³*Ural State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation,
Yekaterinburg, the Russian Federation*

Abstract. The introduction of information technology in medical institutions contributes to the development of predictive, preventive and personalized medicine. The task that arises in this case is to create a software analogue of the patient, capable of taking into account his individual indicators and predicting the state of health, is still relevant. The architecture of the patient's health predicting system presented in the work is aimed at solving this problem. A distinctive feature of the system architecture is the combination of the principles of agent modeling and representation of the patient's body in the form of interacting modules, which opens up wide opportunities for modeling the health status of the patient's body. The paper describes the hierarchy of agents in the system architecture, describes the rules of agent interaction and provides a mathematical model for evaluating the effectiveness of therapeutic effects on the patient's body, the solution of which is achieved through the interaction of system agents. The prediction of the patient's health status is performed using downloadable pre-trained machine learning models, while the models are directly involved in determining the behavior of agents. The architecture of the patient's health predicting system, implemented in the form of a software package, is a powerful tool for building agent-based predicting models aimed at modeling physiological and pathological processes and effects on the patient's body.

Keywords: health predicting, patient's health, agent-based modeling, patient's digital double, modular approach.

For citation: Lisovento A.S., Limanovskaya O.V., Tarasov D.A., Meshchaninov V.N., Gavrilov I.V. Architecture of the patient's health predicting system using agent-based modeling and machine learning methods. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2024;12(4). URL: <https://moitvivr.ru/ru/journal/pdf?id=1724> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.47.4.016 (In Russ.).

Введение

В медицинских учреждениях продолжается внедрение информационных технологий, в том числе в соответствии с приказом Министерства здравоохранения РФ от 24.04.2018 г. «Об утверждении Концепции предиктивной, превентивной и персонализированной медицины»¹. Данная концепция направлена на развитие индивидуального подхода к пациенту. Индивидуальный подход при этом заключается в доклиническом выявлении заболеваний, выявлении предрасположенности к тем или иным болезням пациента, а также разработке комплекса лечебных и профилактических мер с учетом его индивидуальных диагностических показателей.

Реализация утвержденной концепции подразумевает под собой решение подзадачи создания программного аналога пациента, который вбирает в себя индивидуальные показатели организма пациента, характеристику его образа жизни, интегрально состояние его здоровья и который способен на основе этих данных совершать прогнозы при различных лечебных воздействиях на него [1, 2]. Так как организм человека представляет собой сложную систему, предпочтительным для моделирования такой сложной системы является использование метода агентного моделирования [2–8]. Это подтверждается рядом работ по моделированию состояния здоровья человека, которые направлены на прогнозирование развития заболеваний [2–5], проверку гипотез влияния образа жизни и внешней среды на здоровье [7, 9] и проверку гипотез развития заболеваний [6, 8].

¹ Приказ Министерства здравоохранения РФ от 24 апреля 2018 г. N 186 «Об утверждении Концепции предиктивной, превентивной и персонализированной медицины». ГАРАНТ.РУ. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71847662/> (дата обращения: 21.10.2024).

Несмотря на большой спектр применимости агентных моделей по отношению к здоровью человека, задача построения цифровой модели состояния здоровья пациента остается не до конца решенной, так как агентные системы в упомянутых работах содержат следующие допущения:

1. Системы ограничены лишь теми моделируемыми процессами по отношению к здоровью пациентов, которые изначально были в них заложены, что существенно ограничивает расширяемость этих моделей под включение других моделируемых процессов по отношению к здоровью, не внося существенные изменения в существующую модель.

2. Системы абстрагируют представление состояния организма пациента, не беря в рассмотрение его индивидуальные показатели.

3. Системы рассматривают прогнозирование состояния здоровья уже заболевших людей, но не относительно здоровых для профилактики возможных заболеваний и купирования уже имеющихся хронических заболеваний.

В данной работе авторами представлена архитектура системы прогнозирования состояния здоровья пациента, которая реализует модульный подход к решаемой задаче без необходимости внесения изменений в архитектуру системы при добавлении в систему новых моделируемых процессов в организме пациента, а также содержит в себе механизм прогнозирования состояния здоровья пациента для оценки оказываемых на него терапевтических воздействий с учетом индивидуальных показателей пациента. Объектом системы при этом может быть как практически здоровый человек, так и человек с диагностированной или не диагностированной патологией. Архитектура системы основывается на применении принципов агентного моделирования.

Материалы и методы

Метод агентного моделирования. Агентное моделирование представляет собой метод имитационного моделирования, при котором моделируемая система представляется в виде взаимодействующих между собой агентов², каждый из которых преследует собственную цель, направленную на максимизацию какого-либо параметра этого агента. Агент на основе своих параметров и параметров внешней среды переходит между своими состояниями и, при необходимости, корректирует свое поведение.

Модульный подход к прогнозированию состояния здоровья. Модульный подход заключается в выделении ряда модулей, каждый из которых описывает конкретную биологическую подсистему организма, и выделении ряда модулей для описания воздействий на пациента и его образа жизни. Биологическая подсистема при этом рассматривается с математическим формализмом – например, дифференциальное уравнение, стохастическая модель или модель на основе агентов [13, 14]. При использовании агентного моделирования каждое моделируемое состояние системы организма рассматривается как отдельный агент, состоящий из некоторой математической модели, численного решателя и временного интервала (начальное время, временной шаг и время завершения) [11, 12].

Результаты

Ядро системы. Ядром системы прогнозирования состояния здоровья пациента является построенная агентная модель, в которой агенты оперируют данными о пациенте и характеризуют собой происходящие в организме пациента физиологические и

² Agent-based modeling. AnyLogic Help. URL: <https://anylogic.help/anylogic/agentbased/index.html> (дата обращения: 21.10.2024).

патологические процессы и оказываемые на организм воздействия (воздействие лекарственным препаратом, влияние болезни и т. д.). Структура каждого агента в системе представлена в Таблице 1 [11].

Таблица 1 – Структура агента в системе прогнозирования состояния здоровья пациента
Table 1 – The structure of the agent in the patient's health predicting system

Структурная часть	Назначение
Состояние	Отслеживание текущего состояния.
Множество возможных состояний агента	Каждое состояние содержит в себе булево выражение, выполнение которого определяет текущее состояние агента.
Параметры	Участвуют в выполняемом коде и определении текущего состояния агента.
Выполняемый код	Представляет собой набор выражений с конструкциями if-else для расчета переменных агента.
Целевой параметр	Переменная агента, которая своим значением однозначно определяет состояние агента.
Функция максимизации/минимизации целевого параметра	Участвует в определении эффективности внешнего воздействия на агента. Присутствует только у агентов верхнего уровня и агента «Пациент».

В архитектуре системы выделена следующая древовидная иерархия агентов: центральный агент «Пациент», агенты верхнего и нижнего уровней (Рисунок 1). Агенты нижнего и верхнего уровня декомпозируют организм пациента на взаимосвязанные модули (верхний уровень) и подмодули (нижний уровень):

1. Агент «Пациент»: центральный агент.

Состояние агента является составным и характеризуется совокупностью состояний агентов верхнего уровня. Это выражается в условиях перехода между состояниями агента «Пациент», которые основываются на нормированной сумме численных характеристик состояний агентов верхнего уровня. Целью агента «Пациент» всегда является максимизация / минимизация этой суммы. Также одной из задач центрального агента является предоставление связанным с ним агентам информации о показателях пациента.

2. Агенты верхнего уровня: характеризуют анатомо-физиологические системы организма (сердечно-сосудистая, дыхательная и т. д.), происходящие в организме процессы (старение, болезнь) и воздействия на организм (терапевтическое воздействие, образ жизни и т. д.).

Состояние агентов этого типа является также составным и, по аналогии с агентом «Пациент», характеризуется совокупностью состояний агентов нижнего уровня.

3. Агенты нижнего уровня: своими состояниями характеризуют отдельные процессы, которые в своей совокупности характеризуют их агента верхнего уровня.

Агент «Пациент» является связующим модулем для остальных агентов: он берет на себя обязанность оповещения агентов двух уровней об изменении показателей пациента, после чего в системе происходит взаимодействие агентов и перерасчет их состояний снизу вверх по иерархии: сначала нижнего уровня, затем верхнего и в последнюю очередь центрального агента «Пациент». В любой момент времени в системе возможно получить информацию о состоянии и свойствах агентов. Взаимодействие агентов при этом происходит через обмен сообщениями.

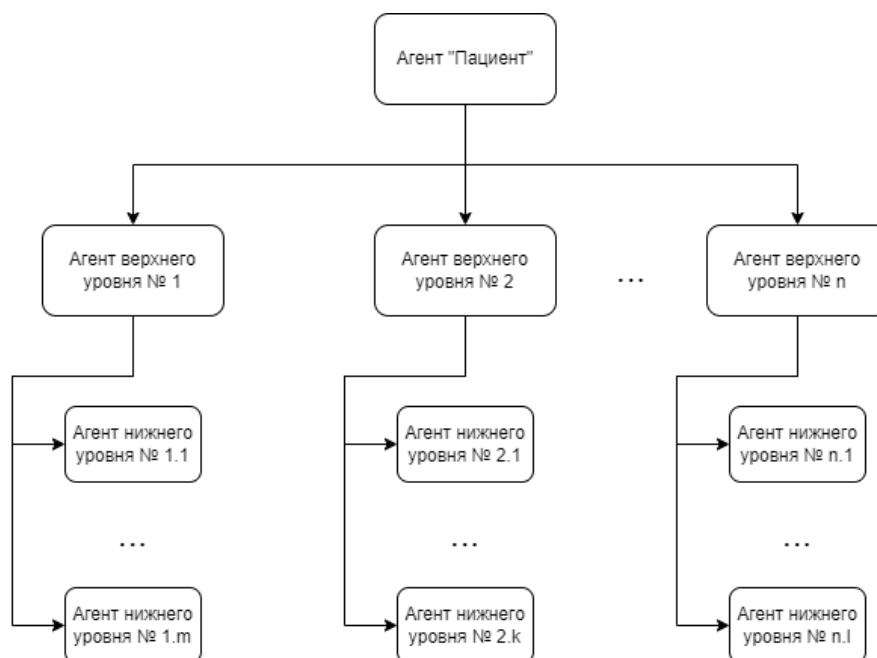


Рисунок 1 – Иерархия агентов в системе прогнозирования состояния здоровья пациента:
 m, k, l – число агентов нижнего уровня для соответствующих им агентов верхнего уровня
 Figure 1 – The hierarchy of agents in the patient's health predicting system:
 m, k, l are the number of lower-level agents for their corresponding upper-level agents

Прогнозирование состояния здоровья в системе. Прогнозирование состояния здоровья пациента происходит снизу вверх, начиная с агентов нижнего уровня. Для прогнозирования состояния агента нижнего уровня используются методы машинного обучения. В систему в качестве входных данных загружаются заранее обученные на тренировочных данных модели машинного обучения для прогнозирования показателей пациентов, а также данные по показателям пациента на текущий и прошлые моменты времени. При настройках агентов системы в выполняемом коде агента указываются модели машинного обучения, которые необходимо использовать для прогнозирования указанного показателя пациента.

Прогнозирование в системе происходит в виде симуляций. На вход симуляции поступают необходимые для оценки терапевтические воздействия для пациента $I_i, i \in [1, \dots, n]$, где n – количество оцениваемых терапевтических воздействий, а также целевая отметка времени t .

В симуляции эффективность терапевтического воздействия I_i для пациента k численно выражается в значении целевого параметра $c_{I_i k}$ агента «Пациент» P_k после воздействия I_i на пациента. Целевой параметр $c_{I_i k}$ рассчитывается по следующей формуле:

$$c_{I_i k} = \sum_1^{j_k} c_j, \quad (1)$$

где c_j – значение целевых параметров агентов верхнего уровня, связанных с агентом «Пациент» P_k ; j_k – количество связанных с P_k агентов верхнего уровня.

В свою очередь, значение целевого параметра c_j агента верхнего уровня P_{kj} рассчитывается по следующей формуле:

$$c_j = \sum_1^{l_j} c_{jl}, \quad (2)$$

где c_{jl} – значение целевых параметров агентов нижнего уровня, которые связаны с агентом Π_{kj} ; l_j – количество связанных с Π_{kj} агентов нижнего уровня.

Далее, значение целевого параметра c_{jl} агента нижнего уровня Π_{kjl} вычисляется следующим образом:

$$c_{jl} = solver_{jl}(t), \quad (3)$$

где t – целевая отметка времени симуляции, $solver_{jl}$ – решатель для агента Π_{kjl} , содержащий в себе модели машинного обучения для прогнозирования целевого параметра c_{jl} . Решатель на вход получает показатели пациента на момент времени t . В зависимости от заранее установленных настроек решатель самостоятельно выбирает модель машинного обучения для расчетов. Более высокое значение c_{jl} характеризует положительную динамику целевого параметра.

Значения c_{jl} целевых параметров агентов нижнего уровня, которые связаны с агентом Π_{kj} , масштабируются в отрезок $[0,1]$ на основе максимального и минимального возможного значения, которое характеризуется целевым параметром c_{jl} .

Таким образом, определение в симуляции терапевтического воздействия I_i , оказавшего наиболее позитивное влияние на организм пациента, заключается в решении следующей задачи максимизации:

$$\begin{aligned} & \max(c_{I_{ik}}, i \in [1, \dots, n], \\ & c_{I_{ik}} = \sum_1^{j_k} c_j, \\ & c_j = \sum_1^{l_j} c_{jl}, \\ & c_{jl} = solver_{jl}(t). \end{aligned} \quad (4)$$

Решение задачи максимизации (4) в системе достигается путем поочередной симуляции воздействий на пациента I_i , на целевую отметку времени t . В результате системой выбирается то воздействие I_i на пациента k , имеющее максимальное значение целевого параметра $c_{I_{ik}}$ агента пациента Π_k .

Обсуждение

Рассмотрим использование разработанной архитектуры для оценки эффективности геропротективного воздействия на темп старения пациента. Для этого введем одного агента верхнего уровня под названием «Темп старения» и связанного с ним агента нижнего уровня «Биовозраст». Таким образом, иерархия агентов принимает линейный вид «Пациент» – «Темп старения» – «Биовозраст».

В решатель $solver_{11}$ агента «Биовозраст» были загружены 4 модели машинного обучения для прогнозирования биовозраста [15]: для мужчин моложе 40 лет, для мужчин старше 40 лет, для женщин моложе 40 лет, для женщин старше 40 лет.

Каждая из этих моделей на вход получает 10 функциональных показателей пациента, а на выходе – биологический возраст. Решатель, в зависимости от возраста и пола пациента, выбирает модель машинного обучения для расчетов. На выходе решатель агента возвращает численное значение разности календарного возраста и биологического возраста пациента $Delta$. Значение $Delta$ масштабируется в отрезок от

0 до 1 – это целевой показатель c_{11} агента «Биовозраст». На основе значения *Delta* определяется состояние агента «Биовозраст» по правилам попадания значения в соответствующий отрезок значений. Состояния варьируются по темпу старения от резко замедленного до резко ускоренного.

Целевой параметр агента «Процесс старения» c_1 в рамках примера характеризует состояние процесса старения лишь с одним моделируемым процессом – прогнозированием биовозраста. Поэтому значение целевого показателя равно значению c_{11} со знаком минус, так как лучшее значение c_1 характеризуется меньшим значением. При включении в агентную модель других процессов, затрагивающих процесс старения, в модель добавятся новые агенты нижнего уровня, связанные с агентами «Темп старения», и, соответственно, формула расчета целевого параметра c_1 расширяется.

В рамках примера определение воздействия, оказавшего наиболее позитивное влияние на состояние центрального агента, сводится к функции максимизации значения $c_{I_{i1}}$.

При первом воздействии I_1 на пациента в возрасте 51 год, на выходе модель машинного обучения дала значение биологического возраста в 50,1 лет, значение *Delta* на выходе решателя агента «Биовозраст» равно разности 50,1 и 51, т. е. -0,9. Это характерно для состояния «Примерное соответствие биологического и календарного возрастов». Масштабированное значение *Delta* (c_{11}), исходя из min-max масштабирования, где $\min = -50$ лет, $\max = 50$ лет, принимает значение 0,491. c_1 в таком случае равен -0,491.

При втором воздействии I_2 на того же пациента, на выходе модель машинного обучения дала значение биологического возраста 38,8 лет, значение *Delta* = 38,8 - 51 = -12,2 (Резко замедленный темп старения). Масштабированное значение = 0,378 (c_{11}). $c_1 = -0,378$.

В итоге $c_{I_{11}} = -0,491$, $c_{I_{21}} = -0,378$, $\max(c_{I_{11}}, c_{I_{21}}) = -0,378$. Исходя из полученного значения, второе воздействие оказало наиболее положительное влияние на состояние здоровья пациента.

Заключение

Отличительной особенностью разработанной архитектуры системы прогнозирования состояния здоровья пациента является комбинация модульного подхода по отношению к здоровью пациента и метода агентного моделирования. Каждой биологической подсистеме выделяется агент верхнего уровня и ряд агентов нижнего уровня, которые моделируют происходящие в этой подсистеме процессы.

Разработанная авторами архитектура системы обеспечивает решение задачи учета индивидуальных показателей пациентов в ходе прогнозирования состояния их здоровья. Это достигается с помощью рассмотрения происходящих в организме физиологических и патологических процессов и воздействий на организм пациента как набора взаимосвязанных модулей и реализации этих модулей с применением агентного моделирования.

Архитектура системы, реализованная в виде программного комплекса, может быть применена для прогнозирования состояния здоровья отдельных подсистем организма (например, сердечно-сосудистой системы) на основе моделирования в ней с помощью агентов происходящих физиологических / патологических процессов в этой подсистеме. Более того, применимость системы не ограничена моделированием лишь одного процесса в организме, а может включать в себя моделирование нескольких, что позволяет составлять более сложные модели с учетом возможных взаимосвязей между моделируемыми физиологическими / патологическими процессами.

Результаты могут быть полезны для учреждений системы здравоохранения и реабилитации. Реализация представленной в данной работе архитектуры системы прогнозирования состояния здоровья пациента в дальнейшем будет опробована для оценки влияния тормозящих процесс старения организма (геропротективных) воздействий с целью подбора эффективной геропротективной терапии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Lehrach H. Omics approaches to individual variation: modeling networks and the virtual patient. *Dialogues in Clinical Neuroscience*. 2016;18(3):253–265. <https://doi.org/10.31887/DCNS.2016.18.3/lehrach>
2. Kutumova E., Kiselev I., Sharipov R., Lifshits G., Kolpakov F. Thoroughly Calibrated Modular Agent-Based Model of the Human Cardiovascular and Renal Systems for Blood Pressure Regulation in Health and Disease. *Frontiers in Physiology*. 2021;12. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.746300>
3. Day T.E., Ravi N., Xian H., Brugh A. An Agent-Based Modeling Template for a Cohort of Veterans with Diabetic Retinopathy. *PLoS One*. 2013;8(6). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0066812>
4. Veloso M. An agent-based simulation model for informed shared decision making in multiple sclerosis. *Multiple Sclerosis and Related Disorders*. 2013;2(4):377–384. <https://doi.org/10.1016/j.msard.2013.04.001>
5. Hum R.S., Kleinberg S. Replicability, Reproducibility, and Agent-based Simulation of Interventions. In: *AMIA Annual Symposium Proceedings: American Medical Informatics Association Annual Symposium, AMIA 2017, 4–8 November 2017, Washington, USA*. 2017. pp. 959–968.
6. Broomhead T., Ballas D., Baker S.R. Neighbourhoods and oral health: Agent-based modelling of tooth decay. *Health & Place*. 2021;71. <https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2021.102657>
7. Li Y., Kong N., Lawley M.A., Pagán J.A. Using Systems Science for Population Health Management in Primary Care. *Journal of Primary Care & Community Health*. 2014;5(4):242–246. <https://doi.org/10.1177/2150131914536400>
8. Weston B., Fogal B., Cook D., Dhurjati P. An agent-based modeling framework for evaluating hypotheses on risks for developing autism: Effects of the gut microbial environment. *Medical Hypotheses*. 2015;84(4):395–401. <https://doi.org/10.1016/j.mehy.2015.01.027>
9. Auchincloss A.H., Diez Roux A.V. A New Tool for Epidemiology: The Usefulness of Dynamic-Agent Models in Understanding Place Effects on Health. *American Journal of Epidemiology*. 2008;168(1):1–8. <https://doi.org/10.1093/aje/kwn118>
10. Лимановская О.В. *Имитационное моделирование в AnyLogic 7: в 2 частях: Часть I*. Екатеринбург: Издательство Уральского университета; 2017. 152 с.
11. Лисовенко А.С., Лимановская О.В., Гаврилов И.В., Мещанинов В.Н., Мякотных В.С. Концепция агентной модели прогнозирования общего состояния здоровья пациента в процессе старения. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2022;10(4). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2022.39.4.007>
 Lisoivenko A.S., Limanovskaya O.V., Gavrilov I.V., Meshchaninov V.N., Myakotnykh V.S. The concept of the agent-based model for predicting a patient’s general health in the process of aging. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2022;10(4). (In Russ.). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2022.39.4.007>

12. Neal M.L., Cooling M.T., Smith L.P. et al. A Reappraisal of How to Build Modular, Reusable Models of Biological Systems. *PLoS Computational Biology*. 2014;10(10). <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1003849>
13. Tracy M., Cerdá M., Keyes K.M. Agent-Based Modeling in Public Health: Current Applications and Future Directions. *Annual Review of Public Health*. 2018;39:77–94. <https://doi.org/10.1146/annurev-publhealth-040617-014317>
14. Koshy-Chenthittayil S., Archambault L., Senthilkumar D., Laubenbacher R., Mendes P., Dongari-Bagtzoglou A. Agent Based Models of Polymicrobial Biofilms and the Microbiome—A Review. *Microorganisms*. 2021;9(2). <https://doi.org/10.3390/microorganisms9020417>
15. Лимановская О.В., Гаврилов И.В., Мещанинов В.Н., Лисовенко А.С. Построение гендерно- и возрастзависимых моделей оценки биовозраста на основе функциональных данных организма пациента. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2024;12(2). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.45.2.012>
Limanovskaya O.V., Gavrilov I.V., Meshchaninov V.N., Lisovenko A.S. Building gender- and age-dependent models for assessing bio-age based on the functional data of the patient's body. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2024;12(2). (In Russ.). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.45.2.012>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Лисовенко Антон Сергеевич, аспирант, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Российская Федерация.
e-mail: anton.lisovenko.researcher@mail.ru
ORCID: [0000-0001-9127-0820](https://orcid.org/0000-0001-9127-0820)

Anton S. Lisovenko, postgraduate Student, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, the Russian Federation.

Лимановская Оксана Викторовна, кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории антивозрастных технологий Центра специализированных видов медицинской помощи «Институт медицинских клеточных технологий», Екатеринбург, Российская Федерация.
e-mail: limanovskaya@mail.ru
ORCID: [0000-0002-2084-3916](https://orcid.org/0000-0002-2084-3916)

Oksana V. Limanovskaya, Candidate of Chemical Sciences, Senior Researcher at the Laboratory of Anti-Aging Technologies of Specialized Medical Care Center of Medical Cell Technology Institute, Yekaterinburg, the Russian Federation.

Тарасов Дмитрий Александрович, кандидат физико-математических наук, доцент департамента информационных технологий и автоматике Института радиоэлектроники и информационных технологий Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Российская Федерация.
e-mail: datarasov@yandex.ru
ORCID: [0000-0001-6911-8371](https://orcid.org/0000-0001-6911-8371)

Dmitry A. Tarasov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Information Technology and Automation of the Institute of Radio Electronics and Information Technologies, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, the Russian Federation.

Мещанинов Виктор Николаевич, доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой биохимии Уральского

Viktor N. Meshchaninov, Doctor of Medical Sciences, Professor, Head of the Department of Biochemistry of Ural State Medical

государственного медицинского университета Министерства здравоохранения Российской Федерации, заведующий лабораторией антивозрастных технологий Центра специализированных видов медицинской помощи «Институт медицинских клеточных технологий», Екатеринбург, Российская Федерация.

e-mail: mv-02@yandex.ru

ORCID: [0000-0001-7928-2503](https://orcid.org/0000-0001-7928-2503)

University of the Ministry of Health of the Russian Federation, Head of the Laboratory of Anti-Aging Technologies of Specialized Medical Care Center of Medical Cell Technology Institute, Yekaterinburg, the Russian Federation.

Гаврилов Илья Валерьевич, кандидат биологических наук, доцент кафедры биохимии Уральского государственного медицинского университета Министерства здравоохранения Российской Федерации, старший научный сотрудник лаборатории антивозрастных технологий Центра специализированных видов медицинской помощи «Институт медицинских клеточных технологий», Екатеринбург, Российская Федерация.

e-mail: iliagavrilov18@yandex.ru

ORCID: [0000-0003-0806-1177](https://orcid.org/0000-0003-0806-1177)

Piya V. Gavrilov, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor at the Department of Biochemistry of Ural State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation, Senior Researcher at the Laboratory of Anti-Aging Technologies of Specialized Medical Care Center of Medical Cell Technology Institute, Yekaterinburg, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 22.10.2024; одобрена после рецензирования 06.11.2024; принята к публикации 11.11.2024.

The article was submitted 22.10.2024; approved after reviewing 06.11.2024; accepted for publication 11.11.2024.