

УДК 57.045:612.1

Форма визуализации индивидуальной динамики функционального состояния участника Российской Антарктической экспедиции с использованием дискриминантного анализа

Панкова Н.Б.¹, Кутузова И.А.², Котенев А.В.³, Ратманова П.О.³, Крганов М.Ю.¹

¹Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский институт общей патологии и патофизиологии»

125315, Москва, ул. Балтийская, д. 8

²Факультет почвоведения Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

119234, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12

³Биологический факультет Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

119234, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12

В работе представлены результаты оценки 18-недельной динамики функционального состояния человека в экстремальных климатогеографических условиях Антарктиды с визуализацией полученных результатов на основе сложных индексов. Использована собственная модификация модели Р.М. Баевского, основанная на результатах дискриминантного анализа состояний человека в трёх заведомо различающихся условиях, использующая не только показатели вариабельности сердечного ритма, но и систолическое артериальное давление. Результаты представлены на фазовой плоскости, с разбивкой на четыре квадранта: физиологическая норма, донозологические состояния, преморбидные состояния, патологические состояния. Приведенные иллюстрации позволяют считать, что такой подход является перспективным в мониторинговых проектах и в области экологической физиологии.

Ключевые слова: вариабельность сердечного ритма; артериальное давление; дискриминантный анализ; фазовая плоскость; мониторинговые исследования

Для цитирования: Панкова Н.Б., Кутузова И.А., Котенев А.В., Ратманова П.О., Крганов М.Ю. Форма визуализации индивидуальной динамики функционального состояния участника Российской Антарктической экспедиции с использованием дискриминантного анализа. *Патогенез*. 2026; 24(1): 97–102

DOI: 10.48612/path/2310-0435.2026.01.97-102

Для корреспонденции: Панкова Наталия Борисовна, e-mail: nbpankova@gmail.com

Финансирование. Исследование выполнялось в рамках 70-й РАЭ, научного проекта государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова №121032500081-5 и государственного задания ФГБНУ «НИИОПП» Оценка физиологического баланса организма при воздействии экстремальных факторов среды (FGFU-2025-0003).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Данные наблюдений, использованные при написании статьи, были получены в 70-й Российской антарктической экспедиции, организованной ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт» (ФГБУ «ААНИИ») Росгидромета. Авторы выражают глубокую признательность членам экспедиции за всестороннюю помощь при проведении исследовательских работ, а также сотрудникам ФГБНУ «НИИОПП» за участие в контрольных измерениях.

Поступила: 01.02.2026.

Discriminant analysis application for the visualization of the functional state individual dynamics of the Russian Antarctic Expedition participant

Pankova N.B.¹, Kutuzova I.A.², Kotenev A.V.³, Ratmanova P.O.³, Karganov M.Yu.¹

¹Institute of General Pathology and Pathophysiology

Baltiyskaya St. 8, Moscow 125315, Russian Federation

²M.V. Lomonosov Moscow State University, Soil Science Faculty

Leninskie Gory 1, Bldg. 12, Moscow 119234, Russian Federation

³M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Biology

Leninskie Gory 1 Bldg. 12, Moscow 119234, Russian Federation

The article presents the results of an assessment of the 18-week dynamics of the functional state of a person in the extreme climatic and geographical conditions of Antarctica with visualization of the results obtained based on complex indices. A modification of R.M. Baevsky's model is used, based on the results of a discriminant analysis of human states under three distinctly different conditions, incorporating not only heart rate variability but also systolic blood pressure. The results are presented on a phase plane, divided into four quadrants: physiological norm, pre-clinical conditions, pre-morbid conditions, and pathological conditions. The provided illustrations suggest that this approach has potential for monitoring projects and in the field of environmental physiology.

Key words: heart rate variability; blood pressure; discriminant analysis; phase plane; monitoring studies

For citation: Pankova N.B., Kutuzova I.A., Kotenev A.V., Ratmanova P.O., Karganov M.Yu. [Discriminant analysis application for the visualization of the functional state individual dynamics of the Russian Antarctic Expedition participant]. *Patogenez [Pathogenesis]*. 2026; 24(1): 97–102 (in Russian)

DOI: 10.48612/path/2310-0435.2026.01.97-102

For correspondence: Pankova Nataliya Borisovna, e-mail: nbpankova@gmail.com

Funding. The study was realized within the framework of the 70th RAE, and as a part of scientific project of the State Assignment of M.V. Lomonosov Moscow State University #121032500081-5 and a State Assignment of Institute of General Pathology and Pathophysiology on the topic: «Assessment of the physiological balance of the body under the influence of extreme environmental factors» (FGFU-2025-0003).

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgments. The observation data used in writing the article were obtained during the 70th Russian Antarctic Expedition organized by the Arctic and Antarctic Research Institute (AARI). The authors express their deep gratitude to the expedition members for their comprehensive assistance in realizing research work, as well as to the staff of Institute of General Pathology and Pathophysiology for participating in control measurements.

Received: 01.02.2026.

Изучение закономерностей адаптивных перестроек организма человека в экстремальных климатогеографических условиях имеет значение как для фундаментальной науки, так и для прикладных исследований, в контексте расширения ареала трудовой деятельности человека на Земле и, возможно, в космосе. Удобным объектом для таких исследований являются участники длительных антарктических экспедиций. Так, было показано, что после прибытия на ледовый континент в течение месяца у экспедиционеров выявляются сдвиги в состоянии систем эндокринной и нервной регуляции [1, 2]. При более длительном (год и более) пребывании в Антарктиде отмечаются признаки возрастания симпатических влияний на сердечно-сосудистую систему [3, 4].

В настоящее время идёт период накопления массива данных по этому направлению, активно отрабатываются различные методические подходы. Так, в отношении сердечно-сосудистой системы, помимо традиционного тонометра, хорошо зарекомендовали себя различные приборные комплексы, позволяющие оценивать вариабельность сердечного ритма (ВСР). Было эмпирически доказано, что информативными в экстремальных условиях экспедиций являются не только рекомендуемые профессиональными сообществами 5-минутные записи [5], но и короткие (2 мин) регистрации ЭКГ или фотоплетизмограммы [6]. При этом результат анализа ВСР мало зависит от метода его регистрации [7, 8]. Более того, регистрация ВСР методом фотоплетизмографии предпочтительна в суровых климатических условиях, поскольку данный метод, основанный на работе с мелкими сосудами, более чувствителен к состоянию автономной регуляции [9].

При любом техническом решении регистрации ВСР неоспоримой является возможность косвенной оценки данным методом состояния регуляторных систем: вовлечённость различных структур головного мозга в автономную регуляцию сердечного ритма не только основывается на данных об их анатомических связях, но и доказана методами функциональной нейровизуализации [10, 11].

Однако длинный список регистрируемых такими методами параметров приводит к формированию больших массивов данных, трудно воспринимаемых в полном объёме. Это делает актуальным разработку методов визуализации

полученных результатов с использованием сложных индексов. Одним из таких подходов является использование фазовой плоскости с координатами «функциональные резервы» (ФР) и «степень напряжения» (СН). Координаты рассчитывают с использованием наиболее чувствительных показателей ВСР, отобранных при анализе результатов регистрации параметров сердечно-сосудистой системы в заведомо разных функциональных состояниях [12]. ФР является индикатором мобилизующей функции регуляторных механизмов, которые могут быстро истощаться при росте симпатической активности; СН отражает защитную функцию регуляторных механизмов и состояние вегетативного баланса по изменению активности парасимпатического отдела вегетативной нервной системы. Такой подход был успешно апробирован для представления динамики функционального состояния космонавтов [13]. Нами был предложен модифицированный вариант данного метода, включающий не только параметры ВСР, но и показатели артериального давления (АД) [14], что оказалось информативным в визуализации динамики функционального состояния организма зимовщиков на дрейфующей полярной станции «Северный Полюс 41».

Целью данного исследования было применение модифицированного метода в отслеживании 18-недельной динамики функционального состояния участника Российской Антарктической экспедиции РАЭ-70 (<https://www.aari.ru/press-center/news/novosti-aari/startovala-70-ya-rossiyskaya-antarkticheskaya-ekspeditsiya>), во время пребывания на антарктической станции Прогресс.

Материалы и методы исследования

Участник исследования: мужчина 28,5 лет, длина тела 182 см, масса тела – 73 кг. Его участие в исследовании было основано на информированном согласии, и проведено в соответствии с международными (в том числе Хельсинкской декларации в редакции 2013 г.) и российскими нормативными документами о правовых и этических принципах проведения научных исследований с участием человека; заявка одобрена Комиссией по биоэтике МГУ имени М.В. Ломоносова (протокол заседания №166-д-з от 28.11.2024).

Весь период наблюдения с 24.12.2024 по 25.04.2025 был разбит на 9 двухнедельных интервалов, в каждом периоде было по 8–14 измерений, в анализ брали усреднённые за двухнедельный период величины.

Измерения базовых показателей сердечно-сосудистой системы (частота сердечных сокращений – ЧСС, артериальное давление – АД) в Антарктиде проводили при помощи тонометра Omron R3 (Omron Healthcare Co. LTD, Япония). Оценивали частоту сердечных сокращений, систолическое и диастолическое АД. ВСП оценивали с использованием метода вариационной пульсометрии (программно-аппаратный комплекс «БиоМышь», модель KFP-01b (ООО НейроЛаб, Россия). Измерения проводили в рабочее время, обычно в первой половине дня. Длительность регистрации кардиоинтервалов составляла 2 мин.

Контрольные измерения проведены в Москве, в период с февраля по май, в форме однократных ежемесячных тестирований. В выборку вошли 6 мужчин в возрасте $51,2 \pm 2,6$ лет, длина тела 175 ± 4 см, масса тела $84,5 \pm 2,9$ кг. Регистрации показателей сердечно-сосудистой системы проводили при помощи тонометра UA-777 (A&D Medical, Япония) и прибора «спироартериокардиоритмограф» (ООО «ИНТОКС», Россия).

Для расчёта координат фазовой плоскости использовали следующие формулы [14]:

$$\text{ФР} = -0,044 \cdot \text{АДС} + 0,50 \cdot \text{ЧСС} - 0,112 \cdot \text{pNN50} + 0,008 \cdot \text{HF\%} + 3,745$$

$$\text{СН} = -0,008 \cdot \text{АДС} + 0,035 \cdot \text{ЧСС} - 0,191 \cdot \text{pNN50} + 0,042 \cdot \text{HF\%} - 4,100$$

где: АДС – систолическое АД; ЧСС – частота сердечных сокращений; pNN50 – доля (в %) пар соседних кардиоинтервалов, различия в длительности которых превышает 50 мс; HF% – относительная (в %) мощность диапазона высоких частот в спектре ВСП.

Результаты исследования и обсуждение

В нашем исследовании проводили измерения базовых параметров сердечно-сосудистой системы (ЧСС, АД), и оценивали показатели ВСП – статистические, геометрические и спектральные. Обнаружено, что в контрольной группе за время наблюдения не произошло статистически значимых изменений ни по одному из оцениваемых показателей. Расчёт величин ФР и СН (рис. 1) свидетельствует о том, что в контроле за 4 месяца наблюдения усреднённая оценка функционального состояния участников исследования не вышла из квадранта «физиологическая норма».

У участника РАЭ-70 за время наблюдения выявлено снижение систолического АД ($H(9, 103) = 36,11$; $p < 0,001$), пульсового АД ($F(9, 105) = 4,652$; $p < 0,001$), отношения LF/HF ($H(9, 103) = 21,67$; $p = 0,010$) и стресс-индекса ($H(9, 103) = 39,13$; $p < 0,001$). В целом, такие изменения могут отражать снижение симпатических влияний на работу сердечно-сосудистой системы, и на фазовой плоскости проявиться как сдвиг величины ФР влево. Однако из приведенного списка изменившихся параметров в расчёт величины ФР входит только систолическое АД. И, по нашим данным, некоторый дрейф ФР влево (рис. 1) оказался статистически незначим ($H(9, 103) = 7,63$; $p < 0,470$).

Вместе с тем, мы отмечаем, что у участника РАЭ-70 в квадранте «физиологическая норма» была только первая точка (усреднённые данные за первые две недели наблюдений – во второй половине декабря и начале января). В последующем отмечено возрастание координаты СН, имеющее нелинейный характер, с переходом вели-

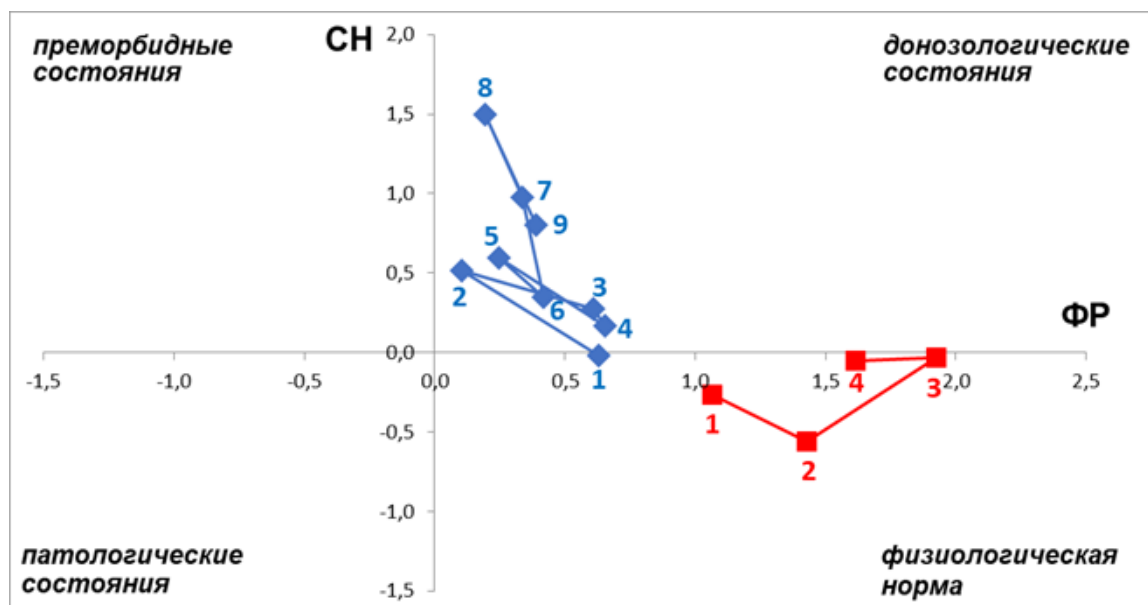


Рис. 1. Усреднённые величины ФР и СН, характеризующие динамику функционального состояния участника РАЭ-70 (синие ромбы) и контрольной группы (красные квадраты). Цифрами обозначены номера тестирований: в контроле – ежемесячные, у участника РАЭ-70 – 2-недельные. Усреднения: у участника РАЭ-70 – по числу измерений за 2-недельный период наблюдения (от 8 до 14), в контрольной группе – по числу участников ежемесячных тестирований ($n = 6$).

чин в квадрант «донозологические состояния». Хотя данный процесс также не достиг уровня статистической значимости ($H(9, 103) = 18,40; p < 0,180$). Такая динамика была описана нами ранее для участников длительной арктической экспедиции [14]. Однако в Арктике тестирования проводили в условиях нагрузочной пробы с дыханием 6 циклов в мин, что усилило выраженность сдвигов в уровне активности регуляторных систем до статистически значимых.

Особо отметим, что проведенное исследование показало возможность визуального представления динамики функционального состояния человека в экстремальных климатических условиях – на фазовой плоскости с услов-

ными градациями согласно концепции Р.М. Баевского [13]. Однако для выявления физиологических механизмов данного процесса необходим более подробный анализ всех оцениваемых параметров.

Заключение

Полученные результаты показали перспективность использования дискриминантного анализа и фазовой плоскости для визуализации динамики функционального состояния человека в экстремальных климатогеографических условиях – в мониторинговых проектах и в области экологической физиологии.

Список литературы

1. Moraes M.M., Bruzzi R.S., Martins Y.A.T., Mendes T.T., Maluf C.B., Ladeira R.V.P., Núñez-Espinosa C., Soares D.D., Wanner S.P., Arantes R.M.E. Hormonal, autonomic cardiac and mood states changes during an Antarctic expedition: From ship travel to camping in Snow Island. *Physiol. Behav.* 2020; 224: 113069. DOI: 10.1016/j.physbeh.2020.113069
2. Harinath K., Malhotra A.S., Pal K., Prasad R., Kumar R., Sawhney R.C. Autonomic nervous system and adrenal response to cold in man at Antarctica. *Wilderness Environ. Med.* 2005; 16(2): 81–91. DOI: 10.1580/pr30-04.1
3. Кальниш В.В., Пишнов Г.Ю., Моисеенко Е.В., Опанасенко В.В., Алексеева Л.М., Висоцька Л.Г. Особливості регуляції ритму серця при адаптації людини до умов Антарктики. *Фізіол. журн.* 2016; 62(3): 20–29. DOI: 10.15407/fz62.03.020
4. Maggioni M.A., Merati G., Castiglioni P., Mendt S., Gunga H.C., Stahn A.C. Reduced vagal modulations of heart rate during overwintering in Antarctica. *Sci. Rep.* 2020; 10(1): 21810. DOI: 10.1038/s41598-020-78722-3
5. Heart rate variability. Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. *Eur. Heart J.* 1996; 17(3): 354–381.
6. Boos C.J., Bakker-Dyos J., Watchorn J., Woods D.R., O'Hara J.P., Macconnachie L., Mellor A. A comparison of two methods of heart rate variability assessment at high altitude. *Clin. Physiol. Funct. Imaging.* 2017; 37(6): 582–587. DOI: 10.1111/cpf.12334
7. Antali F., Kulin D., Lucz K.I., Szabó B., Szűcs L., Kulin S., Miklós Z. Multimodal Assessment of the Pulse Rate Variability Analysis Module of a Photoplethysmography-Based Telemedicine System. *Sensors (Basel).* 2021; 21(16): 5544. DOI: 10.3390/s21165544
8. Coste A., Millour G., Hauswirth C. A Comparative Study Between ECG- and PPG-Based Heart Rate Sensors for Heart Rate Variability Measurements: Influence of Body Position, Duration, Sex, and Age. *Sensors (Basel).* 2025; 25(18): 5745. DOI: 10.3390/s25185745
9. Mejía-Mejía E., Budidha K., Abay T.Y., May J.M., Kyriacou P.A. Heart Rate Variability (HRV) and Pulse Rate Variability (PRV) for the Assessment of Autonomic Responses. *Front. Physiol.* 2020; 11: 779. DOI: 10.3389/fphys.2020.00779
10. Ruffle J.K., Hyare H., Howard M.A., Farmer A.D., Apkarian A.V., Williams S.C.R., Aziz Q., Nachev P. The autonomic brain: Multi-dimensional generative hierarchical modelling of the autonomic connectome. *Cortex.* 2021; 143: 164–179. DOI: 10.1016/j.cortex.2021.06.012
11. Matusik P.S., Zhong C., Matusik P.T., Alomar O., Stein P.K. Neuroimaging Studies of the Neural Correlates of Heart Rate Variability: A Systematic Review. *J. Clin. Med.* 2023; 12(3): 1016. DOI: 10.3390/jcm12031016
12. Баевский Р.М., Черникова А.Г. К проблеме физиологической нормы: математическая модель функциональных состояний на основе анализа вариабельности сердечного ритма. *Авиакосмическая и экологическая медицина.* 2002; 36(5): 34–37.
13. Баевский Р.М., Черникова А.Г. Оценка адаптационного риска в системе индивидуального донозологического контроля. *Российский физиологический журнал имени И.М. Сеченова.* 2014; 100(10): 1180–1194.
14. Панкова Н.Б., Карганов М.Ю. Новая модель дискриминантного анализа для оценки динамики адаптации организма человека к разным условиям жизнедеятельности. *Патогенез.* 2025; 23(2): 65–71. DOI: 10.48612/path/2310-0435.2025.02.65-71

References

1. Moraes M.M., Bruzzi R.S., Martins Y.A.T., Mendes T.T., Maluf C.B., Ladeira R.V.P., Núñez-Espinosa C., Soares D.D., Wanner S.P., Arantes R.M.E. Hormonal, autonomic cardiac and mood states changes during an Antarctic expedition: From ship travel to camping in Snow Island. *Physiol. Behav.* 2020; 224: 113069. DOI: 10.1016/j.physbeh.2020.113069
2. Harinath K., Malhotra A.S., Pal K., Prasad R., Kumar R., Sawhney R.C. Autonomic nervous system and adrenal response to cold in man at Antarctica. *Wilderness Environ. Med.* 2005; 16(2): 81–91. DOI: 10.1580/pr30-04.1
3. Kalnish V.V., Pyshnov G.Y., Moiseyenko E.V., Opanasenko V.V., Alekseyeva L.M., Vysotska L.G. [Heart rate regulation during adaptation to conditions in Antarctica]. *Fiziol. Zh. (1994).* 2016; 62(3): 20–29. DOI: 10.15407/fz62.03.020 (in Ukrainian)
4. Maggioni M.A., Merati G., Castiglioni P., Mendt S., Gunga H.C., Stahn A.C. Reduced vagal modulations of heart rate during overwintering in Antarctica. *Sci. Rep.* 2020; 10(1): 21810. DOI: 10.1038/s41598-020-78722-3
5. Heart rate variability. Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. *Eur. Heart J.* 1996; 17(3): 354–381.
6. Boos C.J., Bakker-Dyos J., Watchorn J., Woods D.R., O'Hara J.P., Macconnachie L., Mellor A. A comparison of two methods of heart rate variability assessment at high altitude. *Clin. Physiol. Funct. Imaging.* 2017; 37(6): 582–587. DOI: 10.1111/cpf.12334

-
7. Antali F., Kulin D., Lucz K.I., Szabó B., Szűcs L., Kulin S., Miklós Z. Multimodal Assessment of the Pulse Rate Variability Analysis Module of a Photoplethysmography-Based Telemedicine System. *Sensors (Basel)*. 2021; 21(16): 5544. DOI: 10.3390/s21165544
 8. Coste A., Millour G., Hausswirth C. A Comparative Study Between ECG- and PPG-Based Heart Rate Sensors for Heart Rate Variability Measurements: Influence of Body Position, Duration, Sex, and Age. *Sensors (Basel)*. 2025; 25(18): 5745. DOI: 10.3390/s25185745
 9. Mejía-Mejía E., Budidha K., Abay T.Y., May J.M., Kyriacou P.A. Heart Rate Variability (HRV) and Pulse Rate Variability (PRV) for the Assessment of Autonomic Responses. *Front. Physiol.* 2020; 11: 779. DOI: 10.3389/fphys.2020.00779
 10. Ruffle J.K., Hyare H., Howard M.A., Farmer A.D., Apkarian A.V., Williams S.C.R., Aziz Q., Nachev P. The autonomic brain: Multi-dimensional generative hierarchical modelling of the autonomic connectome. *Cortex*. 2021; 143: 164–179. DOI: 10.1016/j.cortex.2021.06.012
 11. Matusik P.S., Zhong C., Matusik P.T., Alomar O., Stein P.K. Neuroimaging Studies of the Neural Correlates of Heart Rate Variability: A Systematic Review. *J. Clin. Med.* 2023; 12(3): 1016. DOI: 10.3390/jcm12031016
 12. Baevsky R.M., Chernikova A.G. [On the problem of physiological norm: a mathematical model of functional states based on the analysis of heart rate variability]. *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina [Aerospace and Environmental Medicine]*. 2002; 36(5): 34–37. (in Russian)
 13. Baevsky R.M., Chernikova A.G. [Assessment of adaptation risk in the system of individual pre-clinical control]. *Rossiiskii fiziologicheskii zhurnal imeni I.M. Sechenova [I.M. Sechenov Russian Physiological Journal]*. 2014; 100(10): 1180–1194. (in Russian)
 14. Pankova N.B., Karganov M.Yu. [A new model of discriminant analysis for assessing the dynamics of human body adaptation to different living conditions]. *Patogenez [Pathogenesis]*. 2025; 23(2): 65–71. DOI: 10.48612/path/2310-0435.2025.02.65-71 (in Russian)

Сведения об авторах:

Панкова Наталия Борисовна — доктор биологических наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории физико-химической и экологической патофизиологии Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Научно-исследовательский институт общей патологии и патофизиологии»; <https://orcid.org/0000-0002-3582-817X>

Курузова Ирина Алексеевна — кандидат биологических наук, младший научный сотрудник кафедры общего земледелия и агроэкологии факультета почвоведения Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»; <https://orcid.org/0000-0002-0993-493X>

Котенев Алексей Валерьевич — научный сотрудник кафедры высшей нервной деятельности биологического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»; <https://orcid.org/0009-0004-6800-3504>

Ратманова Патриция Олеговна — кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник кафедры высшей нервной деятельности биологического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»; <https://orcid.org/0000-0003-0354-5527>

Карганов Михаил Юрьевич — доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник, и.о. заведующего лабораторией физико-химической и экологической патофизиологии Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Научно-исследовательский институт общей патологии и патофизиологии»; <https://orcid.org/0000-0002-5862-8090>