

ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА ГРАФЕНА НА ФУНКЦИОНАЛЬНУЮ АКТИВНОСТЬ КЛЕТОК ЛИНИИ JURKAT

Усанина Д.И.^{1,2}, Бочкова М.С.^{1,2}, Тимганова В.П.¹, Заморина С.А.^{1,2}

¹ Институт экологии и генетики микроорганизмов Уральского отделения Российской академии наук – филиал ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр» Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь, Россия

² ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», г. Пермь, Россия

Резюме. Оксид графена обладает рядом характеристик, благодаря которым он представляет собой перспективный материал, который может быть использован для ряда биомедицинских приложений, в том числе для различных стратегий борьбы с раковыми заболеваниями. Использование наноматериалов позволяет преодолеть многие ограничения, возникающие при применении традиционных химиотерапевтических методов. Для изучения противоопухолевых препаратов широко используются раковые клеточные линии, в том числе Jurkat, представляющая собой клетки острого Т-лимфобластного лейкоза. Ранее было исследовано влияние наночастиц пегилированного оксида графена на ряд характеристик клеток линии Jurkat, включая метаболизм и апоптоз. Цель данного исследования – изучение влияния наночастиц пегилированного оксида графена с различными параметрами (размер, тип поверхностной функционализации, концентрация) на функциональную активность клеток линии Jurkat, оценивая такие параметры, как жизнеспособность, продукция ИЛ-2 и экспрессия CD69 при наличии либо отсутствии внешней активации.

Клетки линии Jurkat в присутствии разных типов наночастиц оксида графена (100-200 нм и 1-5 мкм; функционализация линейным и разветвленным полиэтиленгликолем (ПЭГ)) в концентрациях 5 мкг/мл и 25 мкг/мл культивировали в течение 24 часов. Для оценки параметров клеток в условиях внешней стимуляции были подготовлены аналогичные пробы со всеми типами частиц, в которые дополнительно вносили фитогемагглютинин (ФГА) в концентрации 50 мкг/мл. После этого клетки окрашивали красителем Zombie Aqua и антителами к CD69-APC, после чего анализировали на проточном цитометре CytoFlex S. Определяли процент живых клеток, а также экспрессирующих CD69. Далее в супернатантах культур измеряли уровень ИЛ-2 при помощи иммуноферментного анализа.

Установлено, что низкие концентрации частиц не оказывают цитотоксического воздействия, а в условиях внешней активации способны достоверно повышать жизнеспособность клеток. При исполь-

Адрес для переписки:

Усанина Дарья Игоревна
Институт экологии и генетики микроорганизмов
Уральского отделения Российской академии наук
614081, Россия, г. Пермь, ул. Голева, 13.
Тел.: 8 (342) 280-77-94.
Факс: 8 (342) 280-92-11.
E-mail: usanina_d@mail.ru

Address for correspondence:

Daria I. Usanina
Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms,
Ural Branch, Russian Academy of Sciences
13 Golev St
Perm
614081 Russian Federation
Phone: +7 (342) 280-77-94.
Fax: +7 (342) 280-92-11.
E-mail: usanina_d@mail.ru

Образец цитирования:

Д.И. Усанина, М.С. Бочкова, В.П. Тимганова, С.А. Заморина «Влияние наночастиц оксида графена на функциональную активность клеток линии Jurkat» // Российский иммунологический журнал, 2025. Т. 28, № 1. С. 33-38.
doi: 10.46235/1028-7221-16996-IOG

© Усанина Д.И. и соавт., 2025
Эта статья распространяется по лицензии
Creative Commons Attribution 4.0

For citation:

D.I. Usanina, M.S. Bochkova, V.P. Timganova, S.A. Zamorina "Influence of graphene oxide nanoparticles on functional activity of Jurkat cell line", Russian Journal of Immunology/Rossiyskiy Immunologicheskii Zhurnal, 2025, Vol. 28, no. 1, pp. 33-38.
doi: 10.46235/1028-7221-16996-IOG

© Usanina D.I. et al., 2025
The article can be used under the Creative
Commons Attribution 4.0 License

DOI: 10.46235/1028-7221-16996-IOG

зовании функционализации линейным ПЭГом частицы размерами 100–200 нм повышают уровень IL-2 и CD69. В условиях стимуляции наблюдается снижение уровня CD69 (при использовании частиц размерами 1–5 мкм, функционализированных разветвленным ПЭГом, в концентрации 25 мкг/мл).

Данное исследование впервые демонстрирует эффекты, оказываемые на функциональную активность клеток линии Jurkat наночастицами пегилированного оксида графена. Показана зависимость от размеров, концентрации и поверхностной функционализации частиц, а также наличия внешнего активатора.

Ключевые слова: оксид графена, Jurkat, CD69, IL-2, ФГА, жизнеспособность

INFLUENCE OF GRAPHENE OXIDE NANOPARTICLES ON FUNCTIONAL ACTIVITY OF JURKAT CELL LINE

Usanina D.I.^{a, b}, Bochkova M.S.^{a, b}, Timganova V.P.^a, Zamorina S.A.^{a, b}

^a Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation

^b Perm State University, Perm, Russian Federation

Abstract. Graphene oxide offers properties that make it a promising material for numerous biomedical applications, including various cancer treatment methods. Nanomaterials may overcome certain limitations of conventional chemotherapy. In cancer research, cell lines like Jurkat (T cell acute lymphoblastic leukemia cells) serve as models for investigating tumor treatment strategies. Previous studies have explored the effect of pegylated graphene oxide nanoparticles on some parameters of Jurkat cells, such as metabolism and apoptosis. This study aims to investigate how pegylated graphene oxide nanoparticles, varying in size, surface functionalization, and concentration, influence the functional activity of Jurkat cells, including cell viability, IL-2 production, and CD69 expression, both spontaneously, and following external activation.

Jurkat cells were cultured with different types of graphene oxide nanoparticles (100–200 nm and 1–5 μm; functionalized with linear and branched polyethylene glycol (PEG)) at concentrations of 5 μg/mL and 25 μg/mL for 24 hours. For assessment of cell parameters under stimulation with different types of particles, phytohemagglutinin (PHA, 50 μg/mL) was used. Subsequently, the cells were stained with Zombie Aqua and CD69-APC antibody, followed by flow cytometry analysis (CytoFlex S) to determine the percentage of viable cells and CD69-expressing cells. The presence of IL-2 in cell culture supernatants was quantified using ELISA tests.

It was observed that nanoparticles at low concentrations did not induce cytotoxic effects; cell viability improved after PHA stimulation. Small particles (100–200 nm) coated with linear PEG induced IL-2 production and CD69 expression. However, 1–5 μm graphene oxide modified with branched PEG at a concentration of 25 μg/mL led to a decrease in CD69 expression following PHA-stimulation.

It was shown for the first time that pegylated graphene oxide nanoparticles affect the functional activity of Jurkat cells. The influence of particles is dependent on the size, concentration, surface functionalization of graphene oxide, and activation by PHA.

Keywords: graphene oxide, Jurkat cells, CD69, IL-2, phytohemagglutinin, cell viability

Работа выполнена в рамках государственного задания «Исследование функциональной активности лейкоцитов и клеток опухолевых линий в условиях хронических инфекций и под влиянием соединений химического и биологического происхождения», номер государственной регистрации темы: 124021900006-5.

Введение

Линия Jurkat представляет собой Т-лимфоцитарную линию клеток, полученную в 1977 году

из периферической крови 14-летнего мальчика с острым лимфобластным лейкозом [11]. Эти клетки широко используются как модель для изучения Т-клеточного рецептора, передачи сигналов, ВИЧ, а также различных методов борьбы со злокачественными опухолями [7]. В настоящее время для лечения различных типов раковых заболеваний используется химиотерапия, однако ее неизбирательная цитотоксичность приводит к нежелательным побочным эффектам, например ингибированию роста некоторых тканей (воло-

сяные фолликулы, клетки желудочно-кишечного тракта, костный мозг) [5]. Кроме того, современные химиотерапевтические методы сталкиваются с такими проблемами, как короткий период полувыведения лекарственных препаратов, их плохая растворимость, а также риск возникновения множественной лекарственной устойчивости [12]. Для преодоления данных трудностей предлагается использовать наноматериалы для таргетной, фотодинамической, фототермической, хемодинамической и сонодинамической терапии [5].

В качестве терапевтического агента при лечении раковых заболеваний возможно использование наночастиц различной природы, в том числе углеродных [10]. Они обладают рядом преимуществ: возможность модификации параметров (форма, размер, функционализация поверхности), загрузки лекарственных препаратов для таргетного и продолжительного воздействия, хорошая биосовместимость и пр. [10]. Некоторые из углеродных наноматериалов, такие как нанотрубки и графен, демонстрируют способность к интенсивному поглощению излучения в ближнем инфракрасном диапазоне, что позволяет использовать их для фототермической абляции опухолей [9].

Ранее было изучено воздействие наночастиц пегелированного оксида графена (ОГ) на клетки линии Jurkat в системе прижизненного наблюдения Cell-IQ [1], а также получены данные о метаболизме данной клеточной линии под влиянием ОГ [2]. **Целью данной работы** является продолжение изучения данной темы, а именно – исследование влияния наночастиц пегелированного ОГ с различными параметрами (размер, концентрация, тип поверхностной функционализации) на жизнеспособность, экспрессию CD69 и продукцию клетками Jurkat IL-2 в условиях спонтанной и стимулированной активации.

Материалы и методы

Для исследования были использованы наночастицы оксида графена (Ossila Ltd, Великобритания). До проведения процедур функционализации размеры частиц составляли 100-200 нм (ОГм) и 1-5 мкм (ОГб). Функционализация полиэтиленгликолем (ПЭГ) осуществлялась для снижения цитотоксических эффектов частиц. Для сравнения использовали 2 разновидности ПЭГ: линейный (П-ОГ) и разветвленный (рП-ОГ). Процедура модификации описана в предыдущей работе [8].

В качестве объекта исследования использовали иммортализованную клеточную линию Jurkat 5332 (Российская коллекция клеточных культур позвоночных Института цитологии РАН,

Санкт-Петербург). Клетки культивировали в среде RPMI-1640 с добавлением 2 mM L-глутамин, 100 Ед пенициллина, 0,1 мг/мл стрептомицина, 2,5 мкг/мл амфотерицина В и 10% инактивированной эмбриональной телячьей сыворотки. Клетки в концентрации 1 млн/мл помещали в 96-луночный планшет ($n = 4$) и добавляли различные виды пегелированного оксида графена в концентрациях 5 мкг/мл и 25 мкг/мл. Контролем служили клетки без добавления частиц. Для оценки параметров клеток в условиях внешней стимуляции были подготовлены аналогичные пробы со всеми типами частиц ОГ, в которые дополнительно вносили фитогемагглютинин (ФГА) в концентрации 50 мкг/мл.

Клетки культивировали в течение 24 часов во влажной атмосфере CO₂-инкубатора (37 °C, 5% CO₂). После окончания инкубации оценивали жизнеспособность и активацию клеток путем окрашивания красителем Zombie Aqua (BioLegend, США) и антителами к CD69-APC (Miltenyi Biotec, Германия). Для оценки адгезии наночастиц измеряли флуоресценцию в канале для PE-Cy7 ($\lambda_{ex} = 488$ нм; фильтр: 720-840 нм). Анализ проводили с использованием проточного цитофлуориметра Cytometer Flex S (Beckman Coulter, США). Полученные результаты обрабатывали с использованием программы KALUZA (Beckman Coulter, США).

После окончания инкубации в супернатантах культур оценивали уровень IL-2 методом иммуноферментного анализа (АО «Вектор-Бест», Россия).

Статистическую обработку данных проводили в программе GraphPad Prism 8.0.1. Для оценки использовали тест Фридмана и post-hoc тест Данна для множественных сравнений. Результаты представляли в виде медианы, нижнего и верхнего квартилей – Me (Q_{0,25}-Q_{0,75}). Уровень значимости принимали за 0,05.

Результаты и обсуждение

Фитогемагглютинин (ФГА) используется для экзогенной активации Т-клеток путем связывания гликопротеинов на Т-клеточном рецепторе [4]. При активации клетки линии Jurkat экспрессируют CD69 и продуцируют IL-2 [6].

Полученные в ходе исследования данные по влиянию наночастиц пегелированного ОГ на жизнеспособность клеток линии Jurkat, экспрессию ими CD69 и продукцию IL-2 представлены в таблице 1.

При отсутствии внешней активации клеток обнаружено, что наночастицы пегелированного оксида графена в концентрации 5 мкг/мл не оказывали статистически значимого влияния на

ТАБЛИЦА 1. ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА ГРАФЕНА НА ПАРАМЕТРЫ КЛЕТОК ЛИНИИ JURKAT
(n = 4; Me (Q_{0,25}-Q_{0,75}))

TABLE 1. EFFECT OF GRAPHENE OXIDE NANOPARTICLES ON JURKAT CELL LINE'S PARAMETERS (n = 4; Me (Q_{0,25}-Q_{0,75}))

Тип наночастиц Type of nanoparticles	Концентрация наночастиц Concentration of nanoparticles	Без ФГА Without PNA	С ФГА With PNA
Жизнеспособность, % / Viability, %			
Контроль / Control		97,49 (95,76-99,21)	92,05 (91,38-93,90)
П-ОГм / P-GOs	5 мкг/мл 5 µg/mL	97,63 (95,91-99,36)	93,64 (92,22-94,39)
рП-ОГм / bP-GOs		97,43 (95,70-99,15)	94,90 (93,22-96,58)
П-ОГб / P-GOb		97,53 (95,81-99,26)	95,15** (94,68-98,57)
рП-ОГб / bP-GOb		97,54 (95,82-99,27)	95,35 (92,91-97,78)
П-ОГм / P-GOs	25 мкг/мл 25 µg/mL	97,34 (95,62-99,06)	90,47 (88,96-92,14)
рП-ОГм / bP-GOs		97,55 (95,83-99,28)	94,54 (92,86-96,21)
П-ОГб / P-GOb		97,46 (95,73-99,18)	94,83 (94,35-96,74)
рП-ОГб / bP-GOb		96,40 (94,20-99,34)	95,37* (93,68-97,05)
Экспрессия CD69, % / CD69 expression, %			
Контроль / Control		3,45 (1,69-4,41)	80,64 (69,23-83,48)
П-ОГм / P-GOs	5 мкг/мл 5 µg/mL	4,18 (3,47-8,08)	76,58 (66,99-82,12)
рП-ОГм / bP-GOs		8,20 (4,03-10,48)	74,70 (64,13-77,33)
П-ОГб / P-GOb		6,07 (5,04-11,74)	73,71 (64,48-79,04)
рП-ОГб / bP-GOb		2,64 (1,30-3,37)	72,65 (62,37-75,21)
П-ОГм / P-GOs	25 мкг/мл 25 µg/mL	9,73* (8,08-15,60)	75,77 (66,28-81,25)
рП-ОГм / bP-GOs		3,76 (1,85-4,80)	77,08 (66,17-79,80)
П-ОГб / P-GOb		7,77 (6,45-15,02)	79,72 (69,74-85,49)
рП-ОГб / bP-GOb		1,91 (1,58-3,69)	64,85** (55,67-67,13)
IL-2, нг/мл / IL-2, ng/mL			
Контроль / Control		1,33 (1,11-1,55)	90,40 (89,08-91,71)
П-ОГм / P-GOs	5 мкг/мл 5 µg/mL	4,50* (4,40-4,52)	53,84 (52,08-58,23)
рП-ОГм / bP-GOs		2,01 (1,47-2,84)	80,84 (78,70-84,16)
П-ОГб / P-GOb		1,86 (1,45-2,13)	91,66 (90,25-93,37)
рП-ОГб / bP-GOb		1,57 (1,38-1,62)	97,71 (92,88-99,90)
П-ОГм / P-GOs	25 мкг/мл 25 µg/mL	4,74** (4,64-4,80)	59,69 (52,52-62,47)
рП-ОГм / bP-GOs		1,57 (1,38-1,62)	100,80 (99,56-101,80)
П-ОГб / P-GOb		1,86 (1,67-1,91)	87,57 (87,47-87,96)
рП-ОГб / bP-GOb		2,01 (1,69-2,62)	98,78 (96,98-104,70)

Примечание. * – p < 0,05; ** – p < 0,01.

Note. *, p < 0.05; **, p < 0.01.

жизнеспособность и активацию клеток, а также продукцию ими ИЛ-2.

В предыдущих исследованиях было показано, что при суточном сокультивировании наночастиц ОГ с клетками Jurkat низкие концентрации (5 мкг/мл) подавляют рост, не оказывая при этом влияния на метаболизм, жизнеспособность и апоптоз клеток [1, 2, 3].

При увеличении концентрации наночастиц ОГ до 25 мкг/мл наблюдается достоверное повышение флуоресценции в канале для PE-Cy7 (вне зависимости от размера частиц и их функционализации); ранее были получены данные об увеличении числа высокогранулярных клеток под воздействием наночастиц ОГ, что подтверждает данные об адгезии либо интернализации клетками наночастиц [1]. При этом лишь частицы размерами 100-200 нм, покрытые линейным ПЭГом (П-ОГм), приводили к усилению экспрессии CD69 и секреции ИЛ-2 клетками.

При изучении метаболизма клеток линии Jurkat было установлено, что именно эти частицы стимулировали базальный гликолиз, снижая при этом интенсивность компенсаторного [2]. На фоне повышения уровня ИЛ-2 и CD69 это может свидетельствовать о чрезмерной активации клеток. Кроме того, в присутствии высоких концентраций частиц (25 мкг/мл) клетки образуют агрегаты, а прирост клеточной массы снижается [1].

В условиях стимуляции клеток ФГА наблюдается повышение жизнеспособности клеток при добавлении крупных (1-5 мкм) частиц: покрытых линейным ПЭГом в концентрации 5 и покрытых разветвленным ПЭГом в концентрации 25 мкг/мл.

Несмотря на присутствие в культурах ФГА, выступающего в качестве активатора, не было обнаружено воздействия наночастиц ОГ на секрецию ИЛ-2. Кроме того, экспрессия CD69 достоверно изменилась лишь при воздействии одного типа частиц (рП-ОГб в концентрации 25 мкг/мл), однако произошло ее понижение. Вероятно, наночастицы ОГ способны нивелировать стимулирующее действие ФГА.

Полученные данные свидетельствуют о том, что наночастицы ОГ в концентрации 5 мкг/мл не являются токсичными для леток линии Jurkat, а в условиях внешней стимуляции оказывают положительное влияние на жизнеспособность. Ранее нами также была показана биосовместимость частиц в низких дозах в отношении здоровых Т-клеток [3].

В то же время высокие концентрации ОГ приводят к активации клеток. Примечательно, что тип ПЭГ на поверхности частиц, а также их размеры имели значение.

Заключение

Итак, нами впервые изучено влияние наночастиц пегилированного ОГ на жизнеспособность клеток линии Jurkat, экспрессию ими CD69 и продукцию ИЛ-2 в условиях спонтанной и стимулированной активации. Установлена зависимость оказываемых эффектов от размера, типа поверхностной функционализации и концентрации частиц, а также наличия внешней стимуляции. Полученные данные углубляют наше понимание воздействия частиц на раковые клетки, что поможет в разработке новых стратегий борьбы с опухолями.

Список литературы / References

1. Заморина С.А., Храмов П.В., Раев М.Б., Тимганова В.П., Бочкова М.С., Нечаев А.И., Шунькин Е.О., Хазиахматова О.Г., Малащенко В.В., Литвинова Л.С. Взаимодействие наночастиц оксида графена с клетками линии Jurkat в системе Cell-IQ // Доклады Российской академии наук. Науки о жизни, 2021. Т. 501, № 1. С. 573-579. [Zamorina S.A., Khrantsov P.V., Rayev M.B., Timganova V.P., Bochkova M.S., Nechaev A.I., Shunkin E.O., Khaziakhmatova O.G., Malaschenko V.V., Litvinova L.S. Graphene oxide nanoparticles interaction with Jurkat cell line in Cell-IQ system. *Doklady Rossiyskoy akademii nauk. Nauki o zhizni = Reports of the Russian Academy of Sciences. Life Sciences*, 2021, Vol. 501, no. 1, pp. 438-443. (In Russ.)]
2. Тимганова В.П., Власова В.В., Бочкова М.С., Шардина К.Ю., Ужвийук С.В., Храмов П.В., Раев М.Б., Заморина С.А. Влияние пегилированного оксида графена на метаболизм клеток линии Jurkat // Доклады российской академии наук. Науки о жизни, 2023. Т. 512, № 1. С. 288-291. [Timganova V.P., Vlasova V.V., Bochkova M.S., Shardina K.Yu., Uzhviyuk S., Khrantsov P.V., Rayev M.B., Zamorina S.A. Effect of PEGylated graphene oxide nanoparticles on the metabolism of jurkat cells. *Doklady Rossiyskoy akademii nauk. Nauki o zhizni = Reports of the Russian Academy of Sciences. Life Sciences*, 2023, Vol. 512, pp. 288-291. (In Russ.)]
3. Усанина Д.И., Ужвийук С.В., Заморина С.А. Влияние наночастиц оксида графена на апоптоз Т-лимфоцитов и клеток линии Jurkat // Российский иммунологический журнал, 2023. Т. 26, № 3. С. 409-414. [Usanina D.I., Uzhviyuk S.V., Zamorina S.A. Effect of graphene oxide nanoparticles on apoptosis of T-lymphocytes and Jurkat cells. *Rossiyskiy immunologicheskiy zhurnal = Russian Journal of Immunology*, 2023, Vol. 26, no. 3, pp. 409-414. (In Russ.)] doi: 10.46235/1028-7221-9635-EOG.
4. Alhallak K., Sun J., Muz B., Jeske A., O'Neal J., Ritchey J.K., Achilefu S., DiPersio J.F., Azab A.K. Liposomal phytohemagglutinin: In vivo T-cell activator as a novel pan-cancer immunotherapy. *J. Cell. Mol. Med.*, 2022, Vol. 26, no. 3. pp. 940-944.

5. Cheng Z., Li M., Dey R., Chen Y. Nanomaterials for cancer therapy: current progress and perspectives. *J. Hematol. Oncol.*, 2021, Vol. 14, no. 1, 85. doi: 10.1186/s13045-021-01096-0.
6. Duong C.P., Westwood J.A., Yong C.S., Murphy A., Devaud C., John L.B., Darcy P.K., Kershaw M.H. Engineering T cell function using chimeric antigen receptors identified using a DNA library approach. *PLoS One*, 2013, Vol. 8, no. 5, e63037. doi: 10.1371/journal.pone.0063037.
7. Gioia L., Siddique A., Head S.R., Salomon D.R., Su A.I. A genome-wide survey of mutations in the Jurkat cell line. *BMC Genomics*, 2018, Vol. 19, no. 1, 334. doi: 10.1186/s12864-018-4718-6.
8. Khrantsov P., Bochkova M., Timganova V., Nechaev A., Uzhviyuk S., Shardina K., Maslennikova I., Rayev M., Zamorina S. Interaction of graphene oxide modified with linear and branched PEG with monocytes isolated from human blood. *Nanomaterials*, 2022, Vol. 12, no. 1, 126. doi: 10.3390/nano12010126.
9. Liu Z., Robinson J.T., Tabakman S.M., Yang K., Dai H. Carbon materials for drug delivery & cancer therapy. *Mater. Today*, 2011, Vol. 14, no. 7-8, pp. 316-323.
10. Priyam J., Saxena U. Therapeutic applications of carbon nanomaterials in renal cancer. *Biotechnol. Lett.*, 2023, Vol. 45, no. 11-12, pp. 1395-1416.
11. Schneider U., Schwenk H.-U., Bornkamm G. Characterization of ebv-genome negative null and t cell lines derived from children with acute lymphoblastic leukemia and leukemic transformed non-hodgkin lymphoma. *Int. J. Cancer*, 1977, Vol. 19, no. 5, pp. 621-626.
12. Wu Q., Yang Z., Nie Y., Shi Y., Fan D. Multi-drug resistance in cancer chemotherapeutics: mechanisms and lab approaches. *Cancer Lett.*, 2014, Vol. 347, no. 2, pp. 159-166.

Авторы:

Усанина Д.И. — младший научный сотрудник лаборатории молекулярной иммунологии Институт экологии и генетики микроорганизмов Уральского отделения Российской академии наук — филиал ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр» Уральского отделения Российской академии наук; аспирант кафедры микробиологии и иммунологии биологического факультета ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», г. Пермь, Россия

Бочкова М.С. — к.б.н., научный сотрудник лаборатории клеточной иммунологии и нанобиотехнологии, Институт экологии и генетики микроорганизмов Уральского отделения Российской академии наук — филиал ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр» Уральского отделения Российской академии наук; старший преподаватель кафедры микробиологии и иммунологии биологического факультета ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», г. Пермь, Россия

Тимганова В.П. — к.б.н., научный сотрудник лаборатории клеточной иммунологии и нанобиотехнологии, Институт экологии и генетики микроорганизмов Уральского отделения Российской академии наук — филиал ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр» Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь, Россия

Заморина С.А. — д.б.н., ведущий научный сотрудник лаборатории клеточной иммунологии и нанобиотехнологии Институт экологии и генетики микроорганизмов Уральского отделения Российской академии наук — филиал ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр» Уральского отделения Российской академии наук; профессор кафедры микробиологии и иммунологии биологического факультета ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», г. Пермь, Россия

Authors:

Usanina D.I., Junior Research Associate, Laboratory of Molecular Immunology, Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms, Ural Branch, Russian Academy of Sciences; Postgraduate Student, Department of Microbiology and Immunology, Faculty of Biology, Perm State University, Perm, Russian Federation

Bochkova M.S., PhD (Biology), Research Associate, Laboratory of Cellular Immunology and Nanobiotechnology, Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms, Ural Branch, Russian Academy of Sciences; Senior Lecturer, Department of Microbiology and Immunology, Faculty of Biology, Perm State University, Perm, Russian Federation

Timganova V.P., PhD (Biology), Research Associate, Laboratory of Cellular Immunology and Nanobiotechnology, Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation

Zamorina S.A., PhD, MD (Biology), Leading Research Associate, Laboratory of Cellular Immunology and Nanobiotechnology, Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms, Ural Branch, Russian Academy of Sciences; Professor, Department of Microbiology and Immunology, Faculty of Biology, Perm State University, Perm, Russian Federation