

Реорганизация цитоскелета лимфоцитов, вызванная кратковременным действием электромагнитного поля сверхнизкой частоты (50 Гц) на кровь *in vitro*

© А. Н. Шклярова¹, Е. В. Цуканова¹, М. Н. Стародубцева^{1,2}, И. А. Чешик¹

¹ГНУ «Институт радиобиологии НАН Беларуси», г. Гомель, Республика Беларусь

²УО «Гомельский государственный медицинский университет», г. Гомель, Республика Беларусь

РЕЗЮМЕ

Цель исследования: выявить изменения параметров структуры и механических свойств поверхностного слоя лимфоцитов крови крысы после однократного действия (30 мин и 2 ч) электромагнитного поля сверхнизкой частоты (ЭМП-СНЧ) на цельную кровь крысы *in vitro*.

Материал и методы. Цельную кровь крысы линии Wistar (возраст — 4,5 мес.) подвергали действию ЭМП-СНЧ (50 Гц, В = 0,79 мТл), производимого экспериментальной установкой на основе катушки Гельмгольца. Лимфоциты выделяли из крови с помощью метода седиментации в градиенте плотности Histopaque-1077, помещали на поверхность предметных стекол, фиксировали глутаровым альдегидом и высушивали. Атомно-силовую микроскопию (АСМ) проводили на атомно-силовом микроскопе Bioscope Resolve в режиме PeakForce QMN на воздухе.

Результаты. По результатам анализа АСМ-изображений лимфоциты были классифицированы на несколько морфологических типов в зависимости от размера ламеллоподий. Для лимфоцитов с ламеллоподиями от 400 до 1100 нм были проанализированы механические свойства малых участков их поверхности размером 250 × 250 нм. Выявлено увеличение модуля упругости поверхности лимфоцитов после кратковременного действия (30 мин) ЭМП-СНЧ. С увеличением времени действия ЭМП-СНЧ до 2 ч упругие (модуль упругости) и адгезионные (сила адгезии между острием АСМ-зонда и поверхностью клетки) свойства лимфоцитов существенно ослабляются.

Заключение. Впервые методом АСМ выявлены наномасштабные изменения структуры и механических свойств поверхности лимфоцитов крысы после кратковременного действия ЭМП-СНЧ (50 Гц, 0,79 мТл, 30 мин), которые свидетельствуют об активации функций лимфоцитов как компонента иммунной системы в ответ на действие ЭМП-СНЧ.

Ключевые слова: атомно-силовая микроскопия, электромагнитное поле, лимфоциты, кровь, механические свойства, крыса.

Вклад авторов: Стародубцева М.Н., Чешик И.А.: разработка концепции и дизайна исследования; Стародубцева М.Н.: написание основных частей статьи и корректировка окончательного текста; Шклярова А.Н., Цуканова Е.В.: подготовка образцов, получение экспериментальных данных, статистический анализ данных, подготовка иллюстраций и текста статьи. Все авторы участвовали в обсуждении и утверждении окончательного варианта рукописи для публикации.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования: ГПНИ «Природопользование и экология» (задание 3.02).

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Шклярова АН, Цуканова ЕВ, Стародубцева МН, Чешик ИА. Реорганизация цитоскелета лимфоцитов, вызванная кратковременным действием электромагнитного поля сверхнизкой частоты (50 Гц) на кровь *in vitro*. *Проблемы здоровья и экологии*. 2020;4:92–98.

Lymphocyte cytoskeleton reorganization caused by a short-term action of an extremely low frequency electromagnetic field (50 Hz) on the blood *in vitro*

© Anastasia N. Shklyarova¹, Elena V. Tsukanova¹, Maria N. Starodubtseva^{1,2}, Igor A. Cheshik¹

¹Institute of Radiobiology of the NAS of Belarus, Gomel, Republic of Belarus

²Gomel State Medical University, Gomel, Republic of Belarus

ABSTRACT

Objective: to detect changes in the parameters of the structure and mechanical properties of the surface layer of lymphocytes in the blood of a rat after a single action (30 min and 2 h) of an extremely low frequency electromagnetic field (ELF EMF) on the rat's whole blood *in vitro*.

Material and methods. We exposed the whole blood of a Wistar rat (4.5 months) to the effect of ELF EMF (50 Hz, В = 0.79 mT), generated by an experimental setup based on a Helmholtz coil. Lymphocytes were isolated from the blood using the Histopaque-1077 density gradient sedimentation method, then were placed on the surface of glass slides and fixed with glutaraldehyde, and finally were dried. We performed atomic force microscopy (AFM) using the atomic force microscope Bioscope Resolve in the PeakForce QMN mode in air.

Results. On the basis of the results of the analysis of the AFM images, we classified the lymphocytes into several morphological types depending on the size of the lamellopodium. We analyzed the mechanical properties of the surface areas sized 250 nm × 250 nm for lymphocytes with the lamellopodium sized 400–1100 nm. The analysis found an rise in the elastic modulus of the lymphocyte surface after a short-term action (30 min) of ELF EMF. When the time of the ELF EMF exposure was increased up to 2 hours, the elastic (elastic modulus) and adhesive properties (the adhesion force between the AFM probe tip and cell surface) of the lymphocytes were significantly weakened.

Conclusion. For the first time using the AFM method we have detected nanoscale changes in the structure and mechanical properties of the surface of the rat's lymphocytes after a short-term action of ELF EMF (50 Hz, 0.79 mT, 30 min), which are indicative of the activation of the functions of lymphocytes as an immune system component in response to the short-term exposure of ELF EMF.

Key words: atomic force microscopy, electromagnetic field, lymphocytes, blood, mechanical properties, rat.

Author contributions: Starodubtseva M. N. and Cheshik I. A. developed the concept and design of the study, Starodubtseva M. N. wrote the main parts of the article and corrected the final text; Shklyarova N. N. and Tsukanova A. U. prepared samples, obtained experimental data, analyzed statistical data, prepared illustrations and the text of the article. All the authors participated in the discussion and approval of the final version of the manuscript for publication.

Conflict of interests: authors declare no conflict of interest.

Funding: State Research Program «Nature Management and Ecology» (task 3.02).

FOR CITATION:

Shklyarova AN, Tsukanova EV, Starodubtseva MN, Cheshik IA. Lymphocyte cytoskeleton reorganization caused by a short-term action of an extremely low frequency electromagnetic field (50 Hz) on the blood *in vitro*. *Health and ecology Issues*. 2020;4:92–98. (In Russ.)

Введение

Электромагнитные поля сверхнизкой частоты (50 Гц) являются важным экологическим фактором, под влиянием которого протекает трудовая деятельность и повседневная жизнь современного человека. Низкочастотные электромагнитные поля были классифицированы Международным агентством по изучению рака как предполагаемый канцероген для человека. Однако в настоящее время в открытых источниках имеются противоречивые данные об эффектах, вызываемых низкочастотными электромагнитными полями на биологические системы: от клеток до целых организмов. Эти противоречия связаны как с различиями в аппаратуре, используемой для создания электромагнитных полей, и экспериментальных конструкций, так и временем действия, клеточными линиями, видами животных, штаммов и возрастом [1]. Эффекты низкочастотных электромагнитных полей на клетки, установленные экспериментально, многообразны и включают в себя увеличение продукции свободных радикалов, изменение генного материала клеток (различные модификации нуклеиновых кислот), увеличение уровня пролиферации клеток, изменение механизмов внутриклеточной сигнализации, модификацию цитоскелета. Во многих исследованиях выявлено, что электромагнитное поле низкой частоты *in vivo* и *in vitro* вызывает увеличение продукции активных форм кислорода, свобод-

ных радикалов и двойные разрывы ДНК [2, 3]. Низкочастотные электромагнитные поля оказывают влияние на цитоскелет. Так, показано, что слабое электромагнитное поле частотой 50 Гц изменяет состояние и структуру актинового цитоскелета, способствуя миграции клеток, с возможным механизмом вовлечения рецептора эпидермального фактора роста (EGFR). Кроме этого установлено, что электромагнитное поле частотой 50 Гц и индукцией 0,4 мТл подавляет динамику микротрубочек, способствует кластеризации EGFR и запускает фосфорилирование EGFR по сайтам Y1173 и S1046/1047. Эти эффекты зависят от Ca²⁺-зависимых сигнальных путей с вовлечением кальциевых каналов L-типа и повышением внутриклеточной концентрации ионов кальция. Полученные данные свидетельствуют об активации низкочастотным электромагнитным полем всей системы цитоскелета в отсутствие EGF, механизмы которой включают EGFR и LTCC/Ca²⁺-сигнальные пути [4].

Анализ данных научных публикаций показывает возможность существенного изменения состояния поверхности (поверхностного слоя, включающего кортикальный актиновый цитоскелет) клеток при действии низкочастотного электромагнитного поля с вовлечением различных путей клеточной сигнализации. Выраженность изменений зависит от условий воздействия, параметров поля и типов клеток. При этом вопросы изменения механических свойств клеток, состава и состояния их поверхностного

слоя при действии низкочастотного электромагнитного поля, особенно на наномасштабном уровне, не изучались. Технически подобного рода исследование можно осуществить с помощью новейших методов атомно-силовой микроскопии, например, с помощью метода количественного картирования наномеханических свойств поверхности клеток PeakForce QNM.

Тканью организма, интегрально связывающей все его органы и системы, является кровь, относящаяся к тканям внутренней среды. Основными форменными элементами крови являются эритроциты, тромбоциты и лейкоциты. В отличие от эритроцитов и тромбоцитов, лейкоциты являются полноценными клетками с основными органеллами, включая иерархическую трехмерную систему цитоскелета. Лимфоциты занимают второе место по численности среди лейкоцитов крови взрослого человека (после нейтрофильных гранулоцитов) и первое место — среди лейкоцитов крови половозрелой крысы.

Цель исследования

Выявить изменения параметров структуры и механических свойств поверхностного слоя лимфоцитов крови крысы после однократного действия (30 мин и 2 ч) электромагнитного поля частотой 50 Гц на цельную кровь крысы *in vitro*.

Материал и методы

Исследования выполнены на крови самца крысы линии Wistar возрастом 4,5 месяца. Все экспериментальные работы с лабораторным животным проводили в соответ-

ствии с общепринятыми нормами обращения с животными и правилами Директивы 2010/63/EU Европейского Парламента и Совета Европейского Союза по охране животных, используемых в научных целях, от 22 сентября 2010 года.

Венозную кровь получали путем отбора из воротной вены, вскрывая брюшную полость, на фоне глубокого наркоза. Полученную кровь объемом 5 мл помещали в пробирку с 1 мл антикоагулянта (3,2 % двузамещенный цитрат натрия), далее образец разделялся на опытный и контрольный в равных объемах.

Опытный образец крови крысы подвергали действию электромагнитного поля частотой 50 Гц, производимого экспериментальной установкой на основе катушки Гельмгольца. Индукция магнитного поля была 0,79 мТл. Опытный образец крови инкубировали в ЭМП-СНЧ в течение 30 мин или 2 ч при комнатной температуре (17–20 °С) и влажности ($\varphi = 79\%$). Контрольный образец крови выдерживали при тех же условиях, исключая действие электромагнитного поля.

Лимфоциты выделяли из крови с помощью метода седиментации в градиенте плотности Histopaque-1077 (400 g, 20 °С, 30 мин). Суспензию клеток (100 мкл) наносили на предметные стекла с адгезивным покрытием и оставляли в термостате на 15 минут при 37 °С. Для фиксации клеток использовали 1 % раствор глутарового альдегида (15 мин при 37 °С). Время после облучения до фиксации лимфоцитов для всех образцов было одинаковым и равнялось 130 минутам. Образцы клеток дважды отмывали в дистиллированной воде и высушивали при комнатных условиях (рисунок 1).

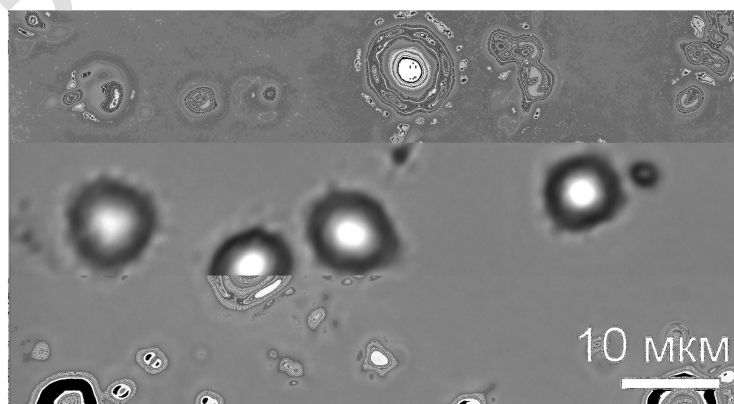


Рисунок 1 — Световая микрофотография образцов лимфоцитов крови после действия ЭМП-СНЧ в течение 30 мин. Неокрашенный препарат

АСМ проводили на приборном комплексе, включающим атомно-силовой

микроскоп Bioscope Resolve фирмы Bruker с инвертированным световым микроско-

пом Axio Observer фирмы Zeiss. Сканирование осуществляли в режиме PeakForce QMN на воздухе при комнатных условиях (зонд — Scan Asyst-Air (Bruker), $k = 0,4$ N/m, радиус острия зонда — 2 nm). Записывали АСМ-изображения целых клеток и участков их поверхности размером 250×250 нм с разрешением 256×256 пикселей со скоростью 0,3 Гц одновременно по нескольким каналам (рисунок 2). Для каждого АСМ-изображения участка поверхности клетки, содержащего 65536 точек, рассчитывали медиану записываемого параметра. Результаты статистического анализа медиан для разных экспериментальных групп ($n = 3-12$) представлены в виде медианы и границ интерквартильного интервала (Me (LQ; UQ)). Сравнение средних выборочных показателей проводили с использованием критерия Уалда-Вольфовица.

Результаты и обсуждение

АСМ позволяет проводить исследование свойств отдельных клеток и даже малых участков их поверхности. Популяция лимфоцитов крови является неоднородной. По размерам, определяемым по световым микрофотографиям, лимфоциты делят на малые, средние и большие. По функциональному признаку выделяют Т-, В- и НК-лимфоциты. По процентному содержанию в популяции лимфоцитов крови основными являются малые (по размерам) и Т-лимфоциты (по функции).

По АСМ-данным лимфоциты, адгезированные к поверхности стекла, представляют собой куполообразные клетки с крупной ядерной областью и выраженными в разной степени краевыми структурами: филоподиями и ламеллоподиями (рисунок 3).

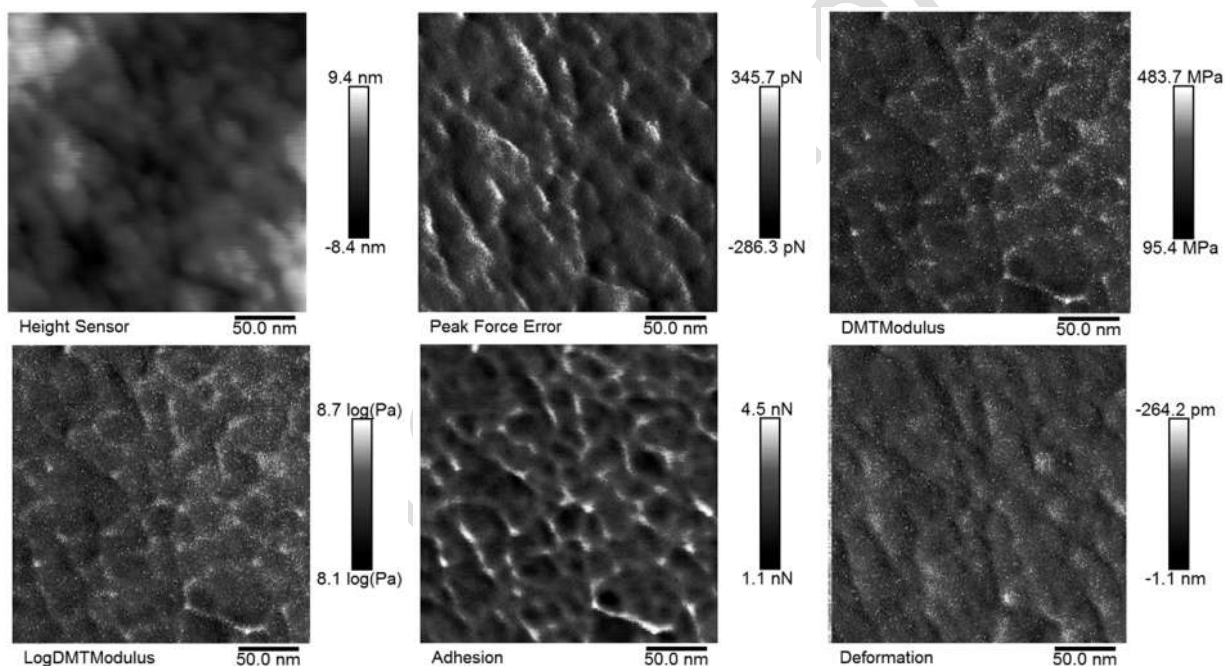


Рисунок 2 — Типичные карты (АСМ-изображения) структурных и механических свойств поверхности лимфоцита образца клеток, приготовленных из крови, подвергшейся действию ЭМП-СНЧ в течение 2 ч

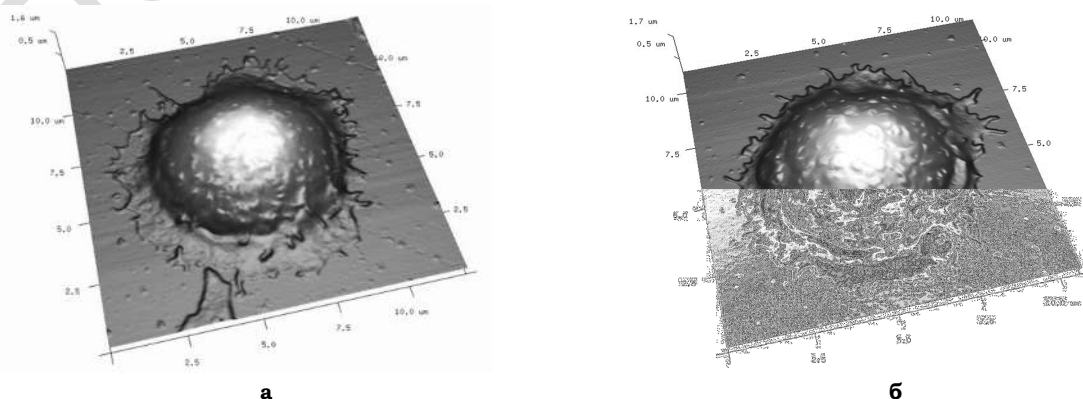


Рисунок 3 — Трехмерные топографические АСМ-изображения лимфоцитов: а — контроль — 30 мин; размер области сканирования — 12×12 мкм, 256×256 пикселей; б — ЭМП-СНЧ — 30 мин; размер области сканирования — 11×11 мкм, 256×256 пикселей

Средний диаметр лимфоцитов, измеренный с учетом краевых структур, находится в диапазоне 8–10 мкм и не зависит существенно от экспериментальных условий

(рисунок 4). По результатам анализа морфологии клеток все лимфоциты были сгруппированы в несколько групп в зависимости от развитости их краевых структур (рисунок 4).

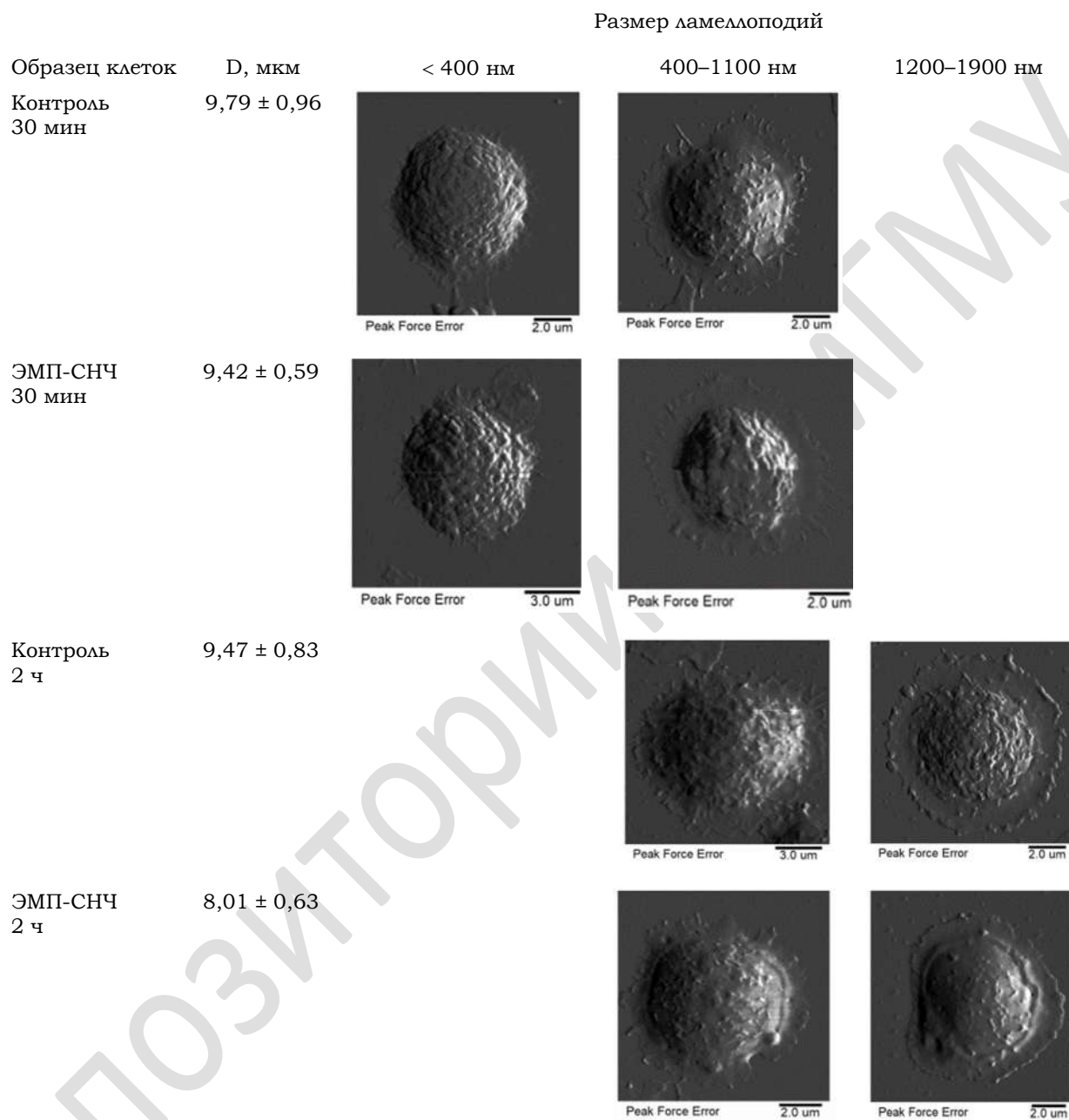


Рисунок 4 — Классификация лимфоцитов по размеру ламеллоподий для разных выборок (данные представлены как границы 95 % доверительного интервала)

Самой многочисленной и присутствующей во всех исследуемых образцах лимфоцитов была группа клеток с размером ламеллоподий от 400 до 1100 нм. Именно для этой группы было проведено сравнительное изучение механических характеристик поверхности клеток в образцах крови без и после действия ЭМП-СВЧ. В исследовании записывали карты свойств поверхности клет-

ки (топографические изображения поверхности и карты адгезионных и упругих свойств) для участков размером 250 × 250 нм с разрешением 256 × 256 пикселей (рисунок 2). В таблице 1 представлены средние значения параметров, характеризующих механические свойства этих малых участков поверхности лимфоцитов: модуль упругости (E) и силу (неспецифической) адгезии (F_a).

Таблица 1 — Сравнительная характеристика механических свойств поверхности лимфоцитов разных выборок с размером ламеллоподий 400–1100 нм

Параметр	Контроль — 30 мин	ЭМП-СНЧ — 30 мин	Контроль — 2 ч	ЭМП-СНЧ — 2 ч
E, МПа	348,5 (227,4; 370,5)*	672,0 (316,7; 1168,5)	340,7 (330,5; 379,4)*	342,7 (338,1; 352,4)*
F _a , нН	3,39 (1,63; 4,18)	4,96 (3,18; 8,96)***	7,36 (6,78; 7,52)**	2,41 (2,40; 2,46)****

* — $p < 0,05$ в сравнении с ЭМП-СНЧ — 30 мин; ** — $p = 0,036$ в сравнении с контролем — 30 мин; *** — $p = 0,004$ в сравнении с ЭМП-СНЧ — 2 ч; **** — $p = 0,039$ в сравнении с контролем — 2 ч, критерий Уалда-Вольфовица

Данные таблицы указывают на наличие существенных изменений параметров механических свойств поверхности лимфоцитов на наномасштабе, индуцированные как действием электромагнитного поля низкой частоты, так и «старением» *in vitro* — хранением крови при комнатных условиях в течение 2 ч. Модуль упругости поверхности лимфоцитов существенно увеличивается после кратковременного (30 мин) нахождения крови в ЭМП-СНЧ. Жесткость поверхности лимфоцитов снижается с увеличением времени пребывания крови в электромагнитном поле до 2 ч (таблица 1). Кратковременное действие (30 мин) ЭМП-СНЧ ведет также к увеличению силы адгезии между острием АСМ-зонда и поверхностью клетки. Но, благодаря увеличению также и степени гетерогенности распределения механических свойств в этом случае, изменение параметра не является статистически значимым. С увеличением времени пребывания крови в электромагнитном поле (2 ч) сила адгезии существенно снижается и становится меньше силы адгезии, характерной для контрольных образцов, хранимых при тех же условиях в отсутствии поля (таблица 1).

Увеличение жесткости и «липкости» поверхности клеток при кратковременном действии ЭМП-СНЧ на кровь свидетельствует об активации цитоскелетной системы лимфоцитов (кортикальный цитоскелет). Данные литературных источников указывают на активацию сигнальных путей и повышение концентрации внутриклеточного кальция, что может являться механизмами реорганизации цитоскелета. Эти изменения носят временной характер при условиях эксперимента ($B = 0,79$ мТл). С увеличением времени пребывания крови в ЭМП-СНЧ имеет место значительное снижение активности цитоскелета (жесткости поверхности клеток), а также поверхность клеток становится существенно менее липкой.

Динамические перестройки актинового цитоскелета важны для выполнения Т-лимфоцитами их основных функций. Они необходимы для миграции клеток по орга-

низму, для узнавания антигенов, для формирования и стабилизации иммунологического синапса на границе раздела между антигенпрезентирующими клетками и Т-лимфоцитами [5]. Полимеризация актина, приводящая к образованию ламеллоподий и дистального полюса, облегчает распознавание Т-клетками антигенпрезентирующих клеток [6]. Согласно полученным нами данным, кратковременное действие ЭМП-СНЧ (30 мин) с индукцией 0,79 мТл ведет к активации актинового цитоскелета лимфоцитов и, следовательно, основных функций лимфоцитов как компонента иммунной системы. Эта активация лимфоцитов пропадает при более продолжительном воздействии (2 ч) поля с изучаемыми характеристиками.

Заключение

Впервые методом атомно-силовой микроскопии выявлены изменения структуры кортикального цитоскелета лимфоцитов крови крысы после кратковременного действия ЭМП-СНЧ (50 Гц) с индукцией 0,79 мТл, которые свидетельствуют об активации функций лимфоцитов как компонента иммунной системы в ответ на действие электромагнитного поля. Эти изменения свойств лимфоцитов зависят от времени нахождения крови в ЭМП-СНЧ. Дальнейшие исследования в данном направлении целесообразны и помогут лучше понять потенциальные риски, которые несет увеличение использования электрических устройств — излучателей ЭМП-СНЧ на кровь.

ЛИТЕРАТУРА

1. Diab KA, The Impact of the Low Frequency of the Electromagnetic Field on Human. *Adv Exp Med Biol.* 2020;1237:135-149. doi: 10.1007/5584_2019_420
2. Buldak RJ, Polaniak R, Buldak L, Zwirska-Korczala K, Skonieczna M, Monsiol A et al. Short-Term Exposure to 50 Hz ELF-EMF Alters the Cisplatin-Induced Oxidative Response in AT478 Murine Squamous Cell Carcinoma Cells. *Bioelectromagnetics.* 2012 Dec;33(8):641-51. doi: 10.1002/bem.21732
3. Esmaeili T, Majd A, Irian S, Nabiuni M, Ghahremaninejad F Assessment of DNA Damage Using Random Amplified Polymorphic DNA in Vegetative-Stage Bean (*Phaseolus Vulgaris L.*) Grown

- Under a Low Frequency Electromagnetic Field. *Appl Ecol Environ Res.* 2017;15(4):729-39. doi:10.15666/aeer/1504_729739
4. Wu X, Du J, Song W, Cao M, Chen S, Xia R Weak Power Frequency Magnetic Fields Induce Microtubule Cytoskeleton Reorganization Depending on The Epidermal Growth Factor Receptor and the Calcium Related Signaling. *PLoS One.* 2018 Oct 12;13(10):e0205569. doi: 10.1371/journal.pone.0205569
 5. Samstag Y, Eibert SM, Klemke M, Wabnitz GH. Actin Cytoskeletal Dynamics in T Lymphocyte Activation and Migration. *J Leukoc Biol.* 2003 Jan;73(1):30-48. doi: 10.1189/jlb.0602272. PMID: 12525560
 6. Billadeau D, Nolz, J, Gomez T Regulation of T-cell Activation by the Cytoskeleton. *Nat Rev Immunol.* 2007 Feb;7(2):131-43. doi: 10.1038/nri2021
- REFERENCES**
1. Diab KA, The Impact of the Low Frequency of the Electromagnetic Field on Human. *Adv Exp Med Biol.* 2020;1237:135-149. doi: 10.1007/5584_2019_420
 2. Buldak RJ, Polaniak R, Buldak L, Zwirska-Korczała K, Skonieczna M, Monsiol A et al. Short-Term Exposure to 50 Hz ELF-EMF Alters the Cisplatin-Induced Oxidative Response in AT478 Murine Squamous Cell Carcinoma Cells. *Bioelectromagnetics.* 2012 Dec;33(8):641-51. doi: 10.1002/bem.21732
 3. Esmaeili T, Majd A, Irian S, Nabiuni M, Ghahremaninejad F Assessment of DNA Damage Using Random Amplified Polymorphic DNA in Vegetative-Stage Bean (*Phaseolus Vulgaris L.*) Grown Under a Low Frequency Electromagnetic Field. *Appl Ecol Environ Res.* 2017;15(4):729-39. doi:10.15666/aeer/1504_729739
 4. Wu X, Du J, Song W, Cao M, Chen S, Xia R Weak Power Frequency Magnetic Fields Induce Microtubule Cytoskeleton Reorganization Depending on The Epidermal Growth Factor Receptor and the Calcium Related Signaling. *PLoS One.* 2018 Oct 12;13(10):e0205569. doi: 10.1371/journal.pone.0205569
 5. Samstag Y, Eibert SM, Klemke M, Wabnitz GH. Actin Cytoskeletal Dynamics in T Lymphocyte Activation and Migration. *J Leukoc Biol.* 2003 Jan;73(1):30-48. doi: 10.1189/jlb.0602272. PMID: 12525560
 6. Billadeau D, Nolz, J, Gomez T Regulation of T-cell Activation by the Cytoskeleton. *Nat Rev Immunol.* 2007 Feb;7(2):131-43. doi: 10.1038/nri2021

Поступила 06.11.2020

Received 06.11.2020

Принята в печать 22.12.2020

Accepted 22.12.2020

Сведения об авторах:

ШклярOVA Анастасия Николаевна — младший научный сотрудник лаборатории экспериментальных биологических моделей Института радиобиологии НАН Беларуси; e-mail: anshklyarava@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-6365-3856>

Цуканова Елена Владимировна — младший научный сотрудник лаборатории экспериментальных биологических моделей Института радиобиологии НАН Беларуси; e-mail: elenatsukanova14@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5535-9294>

Стародубцева Мария Николаевна — доктор биологических наук, доцент, профессор кафедры медицинской и биологической физики УО «Гомельский государственный медицинский университет», ведущий научный сотрудник лаборатории экспериментальных биологических моделей Института радиобиологии НАН Беларуси; e-mail: marysta@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8516-0884>

Чешик Игорь Анатольевич — кандидат медицинских наук, доцент, директор Института радиобиологии НАН Беларуси; e-mail: irb@irb.basnet.by, <https://orcid.org/0000-0003-4436-9371>

Автор, ответственный за переписку:

Стародубцева Мария Николаевна — e-mail: marysta@mail.ru

Information about authors:

Anastasia N. Shklyarova — junior researcher at the Laboratory of Experimental Biological Models of the Institute of Radiobiology of the NAS of Belarus; e-mail: anshklarava@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-6365-3856>

Elena V. Tsukanova — junior researcher at the Laboratory of Experimental Biological Models of the Institute of Radiobiology of the NAS of Belarus; e-mail: elenatsukanova14@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-5535-9294>

Maria N. Starodubtseva — Doctor of Biological Science, Associate Professor, Professor at the Department of Medical and Biological Physics of the EI «Gomel State Medical University», leading researcher at the Institute of Radiobiology of the NAS of Belarus; e-mail: marysta@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8516-0884>

Igor A. Cheshik — Candidate of Medical Science, Associate Professor, Director of the Institute of Radiobiology of the NAS of Belarus; e-mail: irb@irb.basnet.by, <https://orcid.org/0000-0003-4436-9371>

Corresponding author:

Maria N. Starodubtseva — e-mail: marysta@mail.ru