

Выживаемость изолированных кожных эксплантатов при дистанционном взаимодействии со слоистыми периодическими структурами

И.Е. Никитюк¹, К.А. Афоничев¹, М.С. Никитин¹, В.В. Петраш², В.А. Кубасов³

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение

"Национальный медицинский исследовательский центр детской травматологии и ортопедии имени Г.И. Турнера"

Министерства здравоохранения Российской Федерации, г. Санкт-Петербург, Россия

²Частное учреждение образовательной организации высшего образования «Университет «РЕАВИЗ», г. Санкт-Петербург, Россия

³Научно-технический центр «Синтез» АО «НИИЭФА» им. Д.В. Ефремова, г. Санкт-Петербург, Россия

Survival of isolated skin explants in remote interaction with stratiform periodic structures

I.E. Nikityuk¹, K.A. Afonichev¹, M.S. Nikitin¹, V.V. Petrash², V.A. Kubasov³

¹H. Turner National Medical Research Center for Children's Orthopedics and Trauma Surgery, Saint Petersburg, Russian Federation

²Private Institution Educational Organization of Higher Education REAVIZ University, Saint Petersburg, Russia

³D.V. Efremov Scientific Research Institute of Electrophysical Apparatus (NIEFA), Saint Petersburg, Russia

Актуальность. В современной реконструктивной хирургии не утратил значение метод пластики полнослойными кожными трансплантатами.

Цель. Исследование в эксперименте возможности длительного сохранения жизнеспособности кожных эксплантатов в условиях полного нарушения трофики при дистанционном взаимодействии со структурами, имеющими слоистое периодическое строение.

Материалы и методы. У кроликов из области спины иссекали полнослойные участки кожи, которые рассекали на фрагменты – эксплантаты размером 1,0 × 1,0 см. Все образцы (n = 81) разделили на три группы и термостатировали 2-е суток при 37 °C на различных расстояниях от металлического материала (алюминий), представленного в формах: *I серия* – пакет из 20 слоёв гладкой фольги, образующий слоистую периодическую структуру (СПС), *II серия* – спрессованная «смятая» фольга с хаотичным расположением слоёв, *III серия* – цельная пластина. После термостатирования гистологическим методом оценивали жизнеспособность эксплантатов во всех сериях наблюдений соответственно представленным формам металлического материала (ФММ). **Результаты.** Наиболее высокая выживаемость была выявлена у эксплантатов в опытах *I серии*, которые взаимодействовали с СПС, состоящей из чередующихся слоёв фольги. Предполагается волновая природа такого дистанционного взаимодействия, в результате которого замедлились дистрофические и некротические процессы в кожных образцах. Менее жизнеспособными оказались эксплантаты в *III серии* опытов. В опытах *II серии* витальность кожных образцов была резко снижена вследствие быстрого прогрессирования некротических процессов в их тканях. **Заключение.** При дистанционном взаимодействии слоистых периодических структур и кожных эксплантатов наблюдается длительное сохранение их жизнеспособности в условиях отсутствия трофики. Результаты исследования перспективны для разработки нового типа раневых покрытий, способствующих улучшению приживаемости пересаженных полнослойных кожных трансплантатов при лечении глубоких дефектов кожных покровов.

Ключевые слова: глубокие ожоговые раны, полнослойные кожные эксплантаты, эпидермис, слоистые периодические структуры, фотонные кристаллы

Full-thickness skin grafts are used in reconstructive surgeries. **Objectives** Experimental study of the possibility of long-term preservation of viable skin grafts in severely impaired trophics at remote interaction with entities having stratiform periodic structure. **Material and methods** Full-thickness skin was excised from the rabbits' backside and dissected into explants sized 1.0 × 1.0 cm. The samples (n = 81) were divided into three groups and thermostated for 2 days at 37 °C at a various distance from the metal (aluminum) presented as a 20-layer package of smooth foil forming a stratiform periodic structure (SPS) (series I), chaotic layers of squeezed foil (series II) and a single-piece sheet (series III). Histological analysis was performed for the three series to evaluate the explants' viability after the thermostating. **Results** The highest survival estimates were seen in experimental explants of series I that interacted with the SPS of stratified foil layers. The wave nature of such remote interaction was suggested with delayed dystrophic and necrotic processes developing in the skin samples. Experimental samples of series III appeared to be less viable. The explant vitality in series II was sharply reduced due to rapidly spreading necrosis. **Conclusion** Skin explants were shown to retain viability for a longer time when interacting remotely with stratiform periodic structures in the absent trophics. These promising results can be practical for the development of wound dressings to improve survival of full-thickness skin transplantation in reconstruction of deep skin defects.

Keywords: deep burns, full-thickness skin explants, epidermis, stratiform periodic structure, photonic crystal

ВВЕДЕНИЕ

Актуальной проблемой современной реконструктивной хирургии является восстановление обширных поражений кожных покровов, вызванных, в частности, глубокими ожогами. Не утратил значение метод пластики полнослойными кожными трансплантатами. Необходимость разработки эффективных методов полного восстановления дефектов кожных покровов требует продолжения поиска материалов для закрытия раневой поверхности, обладающих свойством стимулировать процессы регенерации кожи. Ранее уже предпринимались попытки использовать с лечебной целью тонкие листки

металла, изготовленные из серебра [1], алюминия, свинца, золота [2] для аппликации на неглубокие ожоговые раны. Однако в отношении глубоких ран кожи необходимы были принципиально новые подходы. Было предложено использовать многослойные тонкопленочные раневые покрытия (multilayer films), состоящие из множества чередующихся тончайших слоёв металла и диэлектрика [3]. Подобные слоистые периодические структуры (СПС) вызывают большой научный интерес благодаря их высоким потенциальным возможностям применения в биомедицине [4] и, в частности, в тканевой инженерии с це-

Выживаемость изолированных кожных эксплантатов при дистанционном взаимодействии со слоистыми периодическими структурами / И.Е. Никитюк, К.А. Афоничев, М.С. Никитин, В.В. Петраш, В.А. Кубасов // Гений ортопедии. 2021. Т. 27, № 2. С. 254-259. DOI 10.18019/1028-4427-2021-27-2-254-259

Nikityuk I.E., Afonichev K.A., Nikitin M.S., Petrash V.V., Kubasov V.A. Survival of isolated skin explants in remote interaction with stratiform periodic structures. *Genij Ortopedii*, 2021, vol. 27, no 2, pp. 254-259. DOI 10.18019/1028-4427-2021-27-2-254-259

лью улучшения регенерации биологических тканей [5, 6]. Биологические свойства СПС в настоящее время активно изучаются. В экспериментах показано, что СПС способствуют дифференцировке клеток-предшественников в зрелые клетки нервной [7] и костной [8] тканей. Однако в отношении регенерации кожи, несмотря на применение в клинике композитных каркасных матриц [9], вопросы стимулирующего воздействия СПС на клеточную активность в научной литературе практически не отражены и нуждаются в дальнейшем изучении. Это необходимо для

продолжения поиска оптимальных раневых покрытий, что отражает современные потребности медицины в высококачественной системе лечения ран и служит основой для развития новых технологий регенеративной хирургии.

Цель – исследование возможности длительного сохранения жизнеспособности кожных эксплантатов в условиях полного нарушения трофики при дистанционном взаимодействии с формами металлического материала (ФММ), имеющими, в том числе, слоистое периодическое строение.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование было проведено в экспериментальной лаборатории ФГБУ «НМИЦ детской травматологии и ортопедии имени Г.И. Турнера» Минздрава России на кроликах породы Шиншилла обоих полов в возрасте 5–6 месяцев с массой тела 2,2–2,5 кг. Проведение эксперимента было одобрено решением локального этического комитета центра и соответствовало международным и национальным нормативным актам обращения с лабораторными животными. Все манипуляции с животными осуществляли в условиях общей анестезии, для которой использовали смесь гидрохлорида тилетамина и гидрохлорида золазепама (Золетил 100, Vibrac, Франция). Дозировку для каждого животного подбирали индивидуально из расчета 15 мг/кг массы животного. Анестезию проводили путем внутримышечной инъекции.

У каждого кролика выстригали шерсть в области спины. В стерильных условиях иссекали полнослойный участок кожи размером 3,0 × 3,0 см, который разрезали на 9 фрагментов квадратной формы со сторонами 1,0 × 1,0 см. Для предотвращения высыхания полученных эксплантатов каждый по отдельности заворачивали в тонкую пищевую полиэтиленовую плёнку и помещали по одному в пластиковые контейнеры на текстолитовые подложки наружной поверхностью вверх. На дно контейнеров наливали тонкий слой дистиллированной воды для обеспечения высокой влажности воздушной среды. В сериях проводимых опытов рядом с эксплантатами на расстоянии с шагом в 1 см, начиная от 0 см, на текстолитовых подложках размещали металлические образцы испытываемой формы. Максимальное расстояние доводили до 8 см. Контейнеры закрывали герметичными крышками и помещали на двое суток в термостат, в котором сохранялась стабильная температура, сопоставимая с температурой тела теплокровных – 37 °С.

Эксперименты с эксплантатами *опытной* группы были проведены по 3 сериям. Для каждой серии изготавливали образцы испытываемых ФММ.

Для *I* серии эксперимента образцы ФММ изготавливали из длинных непрерывных лент алюминиевой фольги толщиной 20 мкм, которые сгибали в 20 слоёв “гармошкой” прямоугольной формы с размерами 6,0 × 10,0 см и толщиной 0,4 мм (рис. 1, а). Все слои фольги плотно прижимали друг к другу. Так как каждый слой алюминия покрыт тонкой естественной оксидной плёнкой Al₂O₃ толщиной около 100 нм, полученные образцы имели чередующиеся слои металла и диэлектрика, что позволяло отнести их к слоистым периодическим структурам.

Для *II* серии опыта ленту из фольги, аналогичную по размерам таковой в первой серии, сминали в комок, который затем спрессовывали в пластину прямоугольной формы, со средними размерами 6,0 × 10,0 см (рис. 1, б).

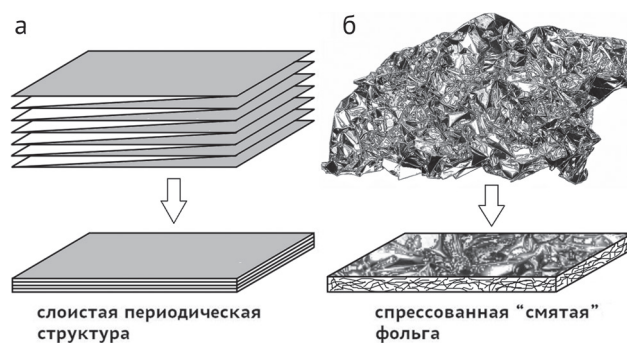


Рис. 1. Схема изготовления испытываемых образцов ФММ из алюминиевой фольги: а – слоистая периодическая структура; б – спрессованная “смятая” фольга

В *III* серии металлический образец был представлен цельной пластиной из алюминия марки А5(1050) АД1 с размерами 6,0 × 10,0 см и толщиной 0,5 мм.

Во всех опытах испытываемые образцы ФММ были размещены в одной плоскости с эксплантатами и направлены к ним своей меньшей стороной. Для каждого расстояния в каждой серии эксперименты повторяли 3 раза, таким образом, в опытной группе был использован 81 кожный эксплантат. Для повторного применения образцы ФММ кипятили в течение 5 минут в дистиллированной воде и высушивали.

Эксплантаты *контрольной* группы в количестве трёх экземпляров помещали в аналогичные условия в пластиковые контейнеры, но без взаимодействия с ФММ и подвергали термостатированию в течение 2 суток. После термостатирования кожные эксплантаты фиксировали в 10 % растворе Кайзерлинга, проводили через батарею спиртов восходящей крепости в гистологическом процессоре карусельного типа STP-120 (Thermo Fisher Scientific, Финляндия) и заливали в парафин на станции EC 350 (Thermo Fisher Scientific, Финляндия). Полученные парафиновые блоки нарезали на санном микротоме HM 430 (Thermo Fisher Scientific, Финляндия). Срезы окрашивали водноспиртовым эозином и гематоксилином Майера. Морфологическое исследование препаратов и получение их цифровых изображений осуществляли с использованием светового лабораторного микроскопа Axio Lab.A1 (Carl Zeiss, Германия).

Гистологическое исследование кожных эксплантатов позволило оценить их выживаемость в баллах после термостатирования. При этом оценивали состояние следующих 4-х структур кожи животного: слоя эпидермиса, волосяных фолликулов, слоя собственно дермы и мышечного слоя. В случае полной сохранности каждой из структур – ей давали оценку 1 балл, при частичном некрозе клеток снижали оценку до 0,5 балла, при полном некрозе клеток сохранность структуры оценивали 0 баллов. Таким образом, максимальную

сохранность жизнеспособности кожного эксплантата оценивали в 4 балла, при тотальном некрозе эксплантата его жизнеспособность составляла 0 баллов.

Для статистической обработки данных использовали непараметрический тест Крускала-Уоллиса, принимая пороговый уровень статистической значимости при значении критерия $p < 0,05$. На следующем этапе про-

водили парное сравнение выборок, применяя непараметрический критерий Манна-Уитни с использованием поправки Бонферони при оценке значения p . При этом критический уровень значимости различий рассчитывали по формуле $p = 0,05/\text{число сравнений} = 0,05/3 = 0,018$. Данные представляли в виде медианы (Me) с межквартильным интервалом 25 % – 75 % [Q_1 – Q_2].

РЕЗУЛЬТАТЫ

При гистологическом исследовании срезов интактной кожи кролика в слое эпителия выявляются крупные клетки с отчетливо различимыми ядрами. Волосяные фолликулы представлены большими скоплениями клеток округлой и овальной формы. В слое собственно дермы находится большое количество соединительнотканых клеток и коллагеновых волокон. В мышечном слое, который у кроликов находится между дермой и подкожной клетчаткой и представлен поперечнополосатой тканью, отчетливо выявляются мышечные волокна с множеством вытянутых ядер и прослойки соединительной ткани, ядра клеток которой хорошо прокрашены (рис. 2).

Гистологическая картина эксплантатов контрольной группы после двух суток термостатирования характеризовалась признаками резко выраженной дегенерации всех слоёв. На срезах определялся тотальный некроз эпителия и дермы, от волосяных фолликулов остались только контуры. Мышечный слой представлен бесформенной, практически однородной массой, плохо воспринимающей окраску. Во всех перечисленных структурах не было выявлено ни клеточных ядер, ни их элементов (рис. 3).

Во всех сериях *опытной* группы максимальный показатель выживаемости эксплантатов был выявлен при их

непосредственном контакте с образцами ФММ. Однако при сравнительной оценке групп наиболее высокую жизнеспособность продемонстрировали кожные образцы *I серии*. У эксплантатов этой серии отмечалась хорошая сохранность образующих их слоёв, структура которых не была нарушена, при этом четко определялись окрашенные клеточные ядра. Несколько ниже оказалась витальность у эксплантатов *III серии*. Самая низкая выживаемость была выявлена у эксплантатов во *II серии* опытов, несмотря на их непосредственный контакт со спрессованной алюминиевой фольгой. Гистологически это проявлялось, в первую очередь, тотальным некрозом мышечного слоя: мышечные волокна фактически отсутствовали и были представлены однородными массами без ядер. В межмышечной соединительной ткани различались только единичные ядра. В дерме выявлялись некротические процессы, в некоторых кожных образцах – обширные. Клетки с прокрашивающимися ядрами сохранились только в эпидермисе и волосяных фолликулах. Однако количество ядерных элементов было снижено по сравнению с нормой, их окраска была менее интенсивной.

При удалении кожных эксплантатов от образцов ФММ, их выживаемость снижалась во всех сериях, однако с разной степенью выраженности (рис. 4).

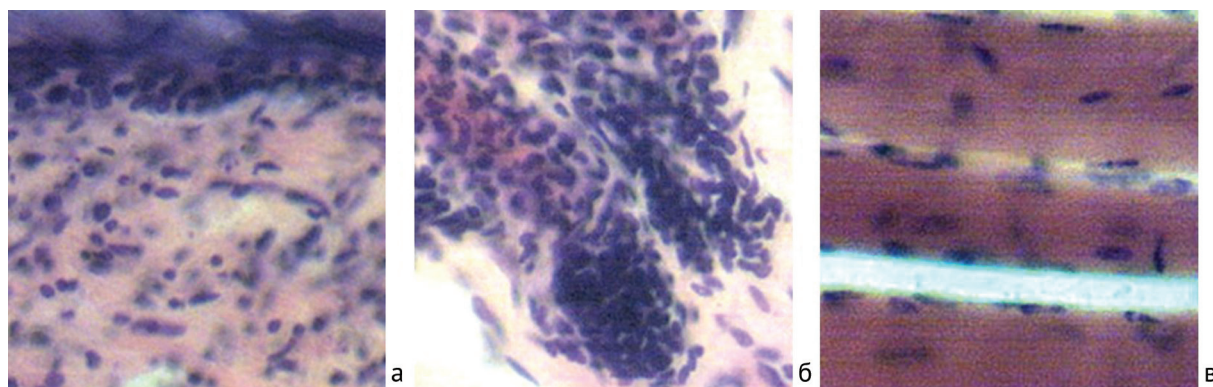


Рис. 2. Срез кожи кролика в норме: а – роговой и эпителиальный слой эпидермиса с прилегающей дермой; б – волосяной фолликул; в – мышечный слой. Ядра клеток эпидермиса, дермы, волосяных фолликулов и мышечных клеток хорошо прокрашены. Окраска гематоксилином и эозином, увеличение 400

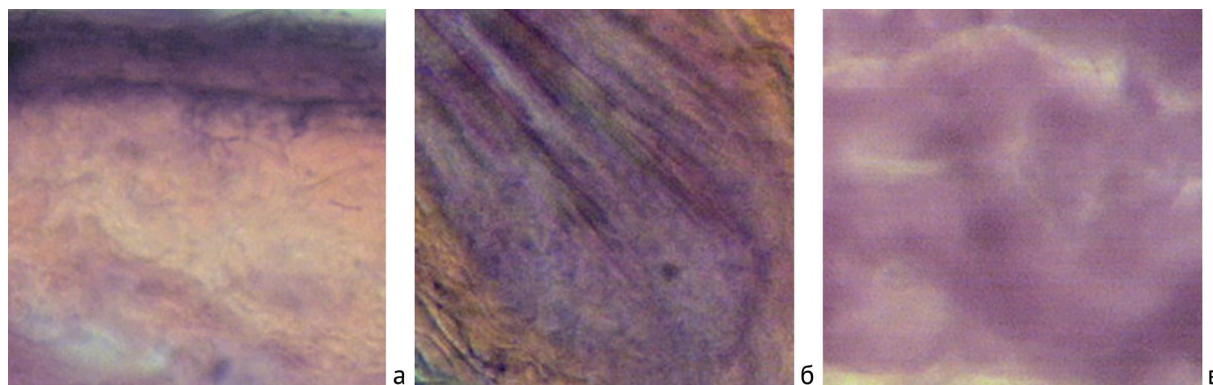


Рис. 3. Срез кожного эксплантата кролика контрольной группы через 2 дня после термостатирования: а – роговой и эпителиальный слой эпидермиса с прилегающей дермой; б – волосяной фолликул; в – мышечный слой. Лизис клеточных ядер, некроз и деструкция тканей всех слоёв. Окраска гематоксилином и эозином, увеличение 400

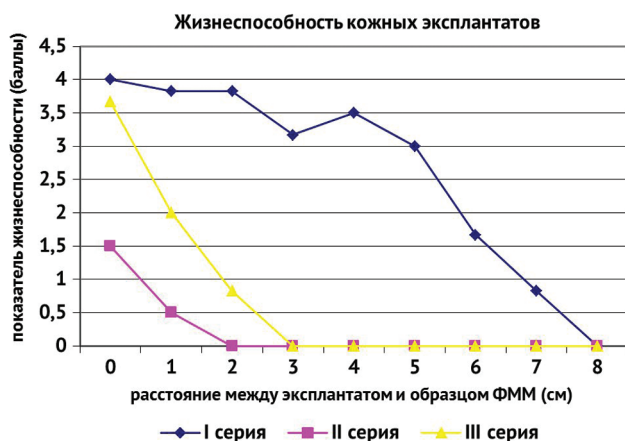


Рис. 4. Показатель жизнеспособности кожных эксплантатов в зависимости от их удаленности от образцов ФММ при термостатировании в опытах I, II и III серий

При увеличении расстояния между образцами ФММ и эксплантатами наибольшая их витальность была выявлена в первой серии по сравнению с таковой во второй и третьей сериях. Гистологически это проявлялось меньшей выраженностью признаков, указывающих на дистрофические и некротические процессы в тканях кожных образцов I серии. Увеличение дистанции в первую очередь приводило к отмиранию мышечного слоя, который превращался в скопления бесформенных слабоокрашенных масс,

лишенных клеточных ядер. При дальнейшем увеличении расстояния между ФММ и эксплантатами в дистрофические процессы начинала вовлекаться дерма, что характеризовалось снижением количества ядерных элементов и нарушением ее волокнистой структуры. Наибольшую жизнеспособность проявляли клетки эпидермиса и волосяных фолликулов, ядра которых, несмотря на снижение их количества, сохраняли восприимчивость к красителям, хотя и в меньшей степени по сравнению с нормой (рис. 5). При достижении расстояния между ФММ и эксплантатами критической величины, последние были некротизированы и деструктурированы, окрашивающиеся ядерные элементы отсутствовали во всех слоях кожи, в связи с чем показатель витальности кожных образцов соответствовал оценке 0 баллов.

В таблице 1 представлены результаты теста Крускала-Уоллиса, который проверяет нулевую гипотезу о том, что медианные значения показателей выживаемости эксплантатов внутри каждого из трёх числовых рядов одинаковы. Поскольку р-значение оказалось меньше 0,05, существует статистически значимая разница между медианами показателей выживаемости эксплантатов при взаимодействии с различными типами форм испытываемых металлических образцов.

Чтобы определить, в каких рядах медианы существенно отличаются от других, дополнительно проводили парное сравнение выборок (табл. 2).

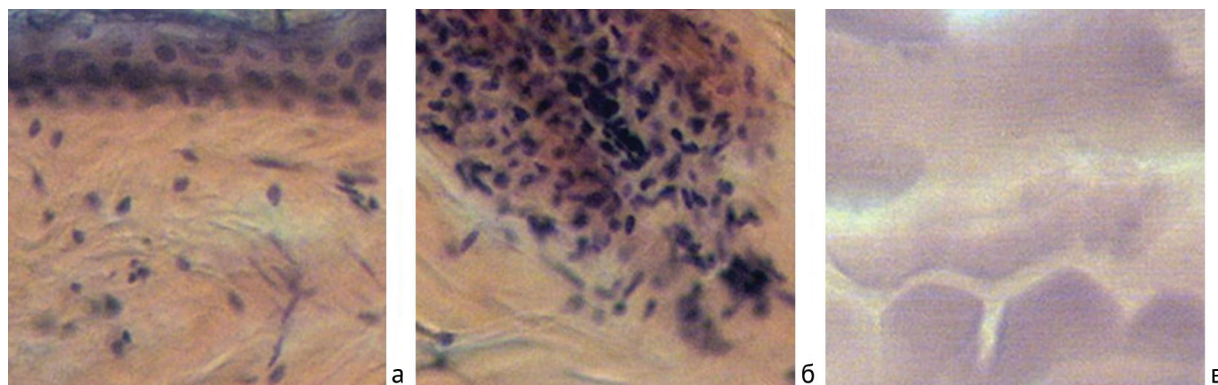


Рис. 5. Срез кожного эксплантата I серии через 2 дня после термостатирования на расстоянии 6,0 см от фольги-СПС: а – роговой и эпителиальный слой эпидермиса с прилегающей дермой; б – волосяной фолликул; в – мышечный слой. Снижено количество и интенсивность окраски ядер клеток в дерме и волосяных фолликулах. Некроз и деструкция тканей мышечного слоя с лизисом клеточных ядер. Окраска гематоксилином и эозином, увеличение 400

Таблица 1

Сравнительная оценка показателей выживаемости эксплантатов при взаимодействии с различными образцами ФММ (тест Крускала-Уоллиса)

Серии	Количество эксплантатов	Средний ранг	Медиана	p-value
I серия – фольга-СПС	27	61,0	3,0	0,000
II серия – фольга спрессованная	27	27,6	0	
III серия – пластина алюминиевая	27	34,4	0	

Таблица 2

Сравнительная оценка показателей выживаемости трансплантатов при взаимодействии с различными образцами ФММ (критерий Манна-Уитни)

Серии	Количество эксплантатов	Выживаемость эксплантатов (баллы) Ме [Q ₁ – Q ₃]	p	p-критическое
I серия – фольга-СПС	27	3,0 [0 – 4,0]	p ¹⁻² = 0,000 p ¹⁻³ = 0,000 p ²⁻³ = 0,160	0,018
II серия – фольга спрессованная	27	0 [0 – 0]		
III серия – пластина алюминиевая	27	0 [0 – 1,0]		

Примечание: p^{1-2;1-3;2-3} – уровень значимости различий между группами.

Из таблицы 2 следует, что медиана показателя выживаемости эксплантатов *I серии* значимо превышает таковую во *II* и *III сериях* опытов. В то же время значимых различий между показателями *II* и *III серий* не выявлено.

ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящее время хорошо известно, что клетки эпидермиса и дермы кожи человека продуцируют сверхслабое электромагнитное излучение в диапазоне от 300 до 800 нм [10, 11], которое регистрируется также у тканевых кожных эксплантатов [12]. Принято считать, что собственные электромагнитные излучения биологических тканей содержат информацию о функциональном состоянии их клеток [13]. В научной литературе представлены убедительные данные о биорегуляторной роли эндогенных физических полей, продуцируемых живыми клетками [14], которые могут приводить к направленному изменению свойств и жизнедеятельности других клеток [15]. В то же время показана возможность использования собственных преобразованных физических полей кожных эксплантатов для улучшения их выживаемости в условиях нарушенной трофики [16].

В настоящем исследовании показано, что при термостатировании кожных образцов вблизи с той или иной ФММ наблюдалось сохранение витальности тканей различной степени выраженности, в зависимости от структуры ФММ. Логично предположить, что при бесконтактном взаимодействии ФММ и эксплантатов, в их тканях в условиях полного нарушения трофики клеточно-гуморальные факторы могли изменить свою биологическую активность под влиянием внешнего физического воздействия, предположительно волновой природы. Это могло привести к замедлению дистрофических и некротических процессов в кожных образцах. Наиболее высокая выживаемость была выявлена у эксплантатов *I серии* после их термостатирования вблизи с ФММ, выполненной в форме слоистой периодической структуры. Объяснить полученный эффект можно следующими предположениями. В первой серии опытов кожный эксплантат взаимодействовал с ФММ, состоящей из чередующихся слоёв алюминиевой фольги, структура которой, помимо собственно металла алюминия, включает тонкую поверхностную плёнку оксида алюминия (корунд), обладающую диэлектрическими и полупроводниковыми свойствами. В СПС

Это означает, что образцы ФММ, изготовленные в виде СПС, в наибольшей степени способствуют сохранению жизнеспособности кожных эксплантатов после их термостатирования в условиях полного нарушения трофики.

подобного типа возможно присутствие нелинейно-оптических эффектов и преобразование электромагнитного излучения с изменением его спектральных характеристик [17]. В свою очередь необходимо учитывать факт, что кожные покровы млекопитающих имеют в своем составе эпидермис, который также является СПС, представленной множеством чередующихся слоев с различной способностью преобразовывать электромагнитные волны [18]. Указанное свойство эпидермиса характерно для фотонных кристаллов, которые также могут преобразовывать различные физические излучения в широком диапазоне спектра [19]. Подобные слоистые периодические структуры обладают электропроводностью [20], свойством накапливать электрическую энергию [21], биосовместимостью [22], а также способностью влиять на клеточную активность, проявляющейся повышением эффективности регенерации биологических тканей [23]. Возможно, в *I серии* проведенного исследования СПС из фольги играла роль матрицы-структуризатора, при дистанционном взаимодействии которой с СПС кожного эксплантата могли возникать электростатические резонансные явления, для которых характерно влияние на активность клеток [24]. В настоящем исследовании биологический эффект такого взаимодействия проявлялся в длительном сохранении жизнеспособности тканей эксплантатов, полностью лишенных трофики.

В опытах *II* и *III серий* образцы ФММ не имели строгой упорядоченности слоев, так как были представлены либо хаотично структурированной спрессованной фольгой, либо цельной пластиной алюминия с неупорядоченно расположенными микрокристаллами металла. Этот фактор может являться причиной значительного снижения жизнеспособности кожных эксплантатов после их термостатирования вблизи с такими ФММ. Дальнейшее изучение биологической активности материалов, имеющих строго упорядоченную периодичность их структуры, может быть актуальным в аспекте регенерации кожи и создания нового типа раневых покрытий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты настоящей работы позволяют констатировать, что между кожными эксплантатами и слоистыми периодическими структурами существует дистанционное взаимодействие, предположительно волновой природы. В результате такого взаимодействия ткани эксплантатов длительно сохраняют свою жизнеспособность, несмотря на отсутствие внешней трофики.

Изучение указанного феномена может быть перспективным в плане использования в реконструктивной хирургии химически и биологически инертных СПС в качестве раневых покрытий для совершенствования методов приживаемости пересаженных полнослойных кожных трансплантатов, что чрезвычайно актуально при лечении глубоких дефектов кожных покровов.

Источник финансирования. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Соответствие принципам этики. Все манипуляции с животными проводили в соответствии с «Методическими рекомендациями по содержанию лабораторных животных в вивариях научно-исследовательских институтов и учебных заведений» РД-АПК 3.10.07.02-09 и Директивой 2010/63/EU Европейского Парламента и Совета Европейского Союза по охране животных, используемых в научных целях. Дизайн исследования одобрен локальным этическим комитетом ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр детской травматологии и ортопедии им. Г.И. Турнера» Минздрава России.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hein W. Der heutige Stand der örtlichen Verbrennungsbehandlung // Der Chirurg. 1957. Vol. 28, No 3. P. 127-135.
2. Арьев Т.Я. Термические поражения. Л.: Медицина, Ленинградское отделение, 1966. 704 с.
3. Экспериментальное применение раневых покрытий со свойствами фотонных кристаллов для восстановления глубоких дефектов кожных покровов / И.Е. Никитюк, В.А. Кубасов, В.В. Петраш, К.А. Афоничев // Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста. 2016. Т. 4, № 3. С. 63-70.
4. Richardson J.J., Björnalm M., Caruso F. Multilayer assembly. Technology-driven layer-by-layer assembly of nanofilms // Science. 2015. Vol. 348, No 6233. P. aaa2491. DOI: 10.1126/science.aaa2491
5. Shukla A., Almeida B. Advances in cellular and tissue engineering using layer-by-layer assembly // Wiley Interdiscip. Rev. Nanomed. Nanobiotechnol. 2014. Vol. 6, No 5. P. 411-421. DOI: 10.1002/wnan.1269
6. Layer-by-layer assembly for biomedical applications in the last decade / P. Gentile, I. Carmagnola, T. Nardo, V. Chiono // Nanotechnology. 2015. Vol. 26, No 42. P. 422001. DOI: 10.1088/0957-4484/26/42/422001
7. Jan E., Kotov N.A. Successful differentiation of mouse neural stem cells on layer-by-layer assembled single-walled carbon nanotube composite // Nano Lett. 2007. Vol. 7, No 5. P. 1123-1128. DOI: 10.1021/nl0620132
8. Zhang J., Fu Y., Mo A. Multilayered titanium carbide MXene film for guided bone regeneration // Int. J. Nanomedicine. 2019. Vol. 14. P. 10091-10103. DOI: 10.2147/IJN.S227830
9. Future prospects for scaffolding methods and biomaterials in skin tissue engineering: A review / A.A. Chaudhari, K. Vig, D.R. Baganizi, R. Sahu, S. Dixit, V. Dennis, S.R. Singh, S.R. Pillai // Int. J. Mol. Sci. 2016. Vol. 17, No 12. P. 1974. DOI: 10.3390/ijms17121974
10. Tsuchida K., Iwasa T., Kobayashi M. Imaging of ultra-weak photon emission for evaluating the oxidative stress of human skin // J. Photochem. Photobiol. B. 2019. Vol. 198. P. 111562. DOI: 10.1016/j.jphotobiol.2019.111562
11. Calcerrada M., Garcia-Ruiz C. Human ultra-weak photon emission: key analytical aspects, results and future trends – a review // Crit. Rev. Anal. Chem. 2019. Vol. 49, No 4. P. 368-381. DOI: 10.1080/10408347.2018.1534199
12. Ou-Yang H. The application of ultra-weak photon emission in dermatology // J. Photochem. Photobiol. B. 2014. Vol. 139. P. 63-70. DOI: 10.1016/j.jphotobiol.2013.10.003
13. Laager F. Light based cellular interactions: hypotheses and perspectives // Front. Phys. 2015. Vol. 3. Article 55. DOI: 10.3389/fphy.2015.00055
14. Short-time fractal analysis of biological autoluminescence / M. Dłask, J. Kukal, M. Poplová, P. Sovka, M. Cifra // PLoS One. 2019. Vol. 14, No 7. P. e0214427. DOI: 10.1371/journal.pone.0214427
15. Levin M., Martyniuk C.J. The bioelectric code: An ancient computational medium for dynamic control of growth and form // Biosystems. 2018. Vol. 164. P. 76-93. DOI: 10.1016/j.biosystems.2017.08.009
16. Петраш В.В., Никитюк И.Е. Использование эффектов фотонно-волновых взаимодействий биосистем с веществом в продлении жизнеспособности изолированных кожных лоскутов // Вестник Санкт-Петербургской гос. мед. акад. им. И.И. Мечникова. 2007. Т. 8, № 1. С. 118-121.
17. Magnetization-induced second- and third harmonic generation in magnetophotonic crystals / O.A. Aktsipetrov, T.V. Dolgova, A.A. Fedyanin, T.V. Murzina, M. Inoue, K. Nishimura, H. Uchida // J. Optical Soc. Am. 2005. Vol. 22, No 1. P. 176-186. DOI: 10.1364/JOSAB.22.000176
18. Биологические структуры как фотонные объекты / А.В. Ильинский, Ф. Сильва-Андрате, Е.Б. Шадрин, В.О. Самойлов, А.Л. Орбели // Биофизика. 2006. Т. 51, № 4. С. 743-748.
19. Эпидермис – слоисто-периодическая биоструктура со свойствами фотонных кристаллов / В.А. Кубасов, И.Е. Никитюк, В.В. Петраш, Б.М. Ворошилов (Штрупп). М.: Эдитус, 2019. 236 с. DOI: 10.18720/SPBPU/2/z19-2
20. Flexible and conductive MXene films and nanocomposites with high capacitance / Z. Ling, C.E. Ren, M.Q. Zhao, J. Yang, J.M. Giammarco, J. Qiu, M.W. Barsoum, Y. Gogotsi // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2014. Vol. 111, No 47. P. 16676-16681. DOI: 10.1073/pnas.1414215111
21. Anasori B., Lukatskaya M., Gogotsi Y. 2D metal carbides and nitrides (MXenes) for energy storage // Nat. Rev. Mater. 2017. Vol. 2. P. 16098. DOI: 10.1038/natrevmats.2016.98
22. Conductive two-dimensional titanium carbide 'clay' with high volumetric capacitance / M. Ghidui, M.R. Lukatskaya, M.Q. Zhao, Y. Gogotsi, M.W. Barsoum // Nature. 2014. Vol. 516, No 7529. P. 78-81. DOI: 10.1038/nature13970
23. Zhang S., Xing M., Li B. Biomimetic layer-by-layer self-assembly of nanofilms, nanocoatings, and 3D scaffolds for tissue engineering // Int. J. Mol. Sci. 2018. Vol. 19, No 6. P. 1641. DOI: 10.3390/ijms19061641
24. Матричный гистогенез биологических тканей при их регенерации на имплантатах со слоистой периодической структурой / И.Е. Никитюк, В.В. Петраш, В.А. Кубасов, Н.Г. Захарова, Л.В. Ильина // Фундаментальные исследования. 2012. № 7-2. С. 372-376.

Рукопись поступила 28.10.2020

Сведения об авторах:

1. Никитюк Игорь Евгеньевич, к. м. н.,
ФГБУ "НМИЦ детской травматологии и ортопедии
им. Г.И. Турнера" Минздрава России, г. Санкт-Петербург, Россия,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5546-2729>,
Email: femtotech@mail.ru
2. Афоничев Константин Александрович, д. м. н.,
ФГБУ "НМИЦ детской травматологии и ортопедии
им. Г.И. Турнера" Минздрава России, г. Санкт-Петербург, Россия,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6460-2567>,
Email: afonichev@list.ru
3. Никитин Максим Сергеевич,
ФГБУ "НМИЦ детской травматологии и ортопедии
им. Г.И. Турнера" Минздрава России, г. Санкт-Петербург, Россия,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8987-3489>,
Email: doknikitin@yandex.ru
4. Петраш Владимир Валентинович, д. б. н., профессор,
ЧУООВО Университет РЕАВИЗ, г. Санкт-Петербург, Россия,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4209-3762>,
Email: vlapetrash@yandex.ru
5. Кубасов Виталий Анатольевич, к. ф.-м. н.,
НТИЦ «Синтез» АО «НИИ электрофизической аппаратуры
имени Д.В. Ефремова», г. Санкт-Петербург, Россия,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8531-4655>,
Email: kubasov@sintez.niiefa.spb.su

Information about the authors:

1. Igor E. Nikityuk, M.D., Ph.D.,
H. Turner National Medical Research Center for Children's Orthopedics
and Trauma Surgery, Saint Petersburg, Russian Federation,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5546-2729>,
Email: femtotech@mail.ru
2. Konstantin A. Afonichev, M.D., Ph.D.,
H. Turner National Medical Research Center for Children's Orthopedics
and Trauma Surgery, Saint Petersburg, Russian Federation,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6460-2567>,
Email: afonichev@list.ru
3. Maxim S. Nikitin, M.D.,
H. Turner National Medical Research Center for Children's
Orthopedics and Trauma Surgery, Saint Petersburg, Russian Federation,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8987-3489>,
Email: doknikitin@yandex.ru
4. Vladimir V. Petrash, Ph.D. of Biological Sciences, Professor,
REAVIZ University, Saint Petersburg, Russian Federation,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4209-3762>,
Email: vlapetrash@yandex.ru
5. Vitaly A. Kubasov, Ph.D. of Physico-mathematical Sciences,
Scientific and Technical Center «Synthesis», D.V. Efremov
Scientific Research Institute of Electrophysical Apparatus (NIIEFA),
Saint Petersburg, Russian Federation,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8531-4655>,
Email: kubasov@sintez.niiefa.spb.su