

ПЕРВЫЙ ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАНЕВЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ ПОЛИМЕРОВ ПОИАНИЛИНА И ПОЛИПИРРОЛА В ЛЕЧЕНИИ ОЖОГОВЫХ РАН

Зиновьев Е.В.^{1,2,3}, Солошенко В.В.¹, Сапурина И.Ю.⁴, Шишов М.А.⁴

¹ Государственное бюджетное учреждение «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт скорой помощи имени И.И. Джанелидзе»,
192242, Россия, г. Санкт-Петербург, Будапештская ул., д. 3, лит. А

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Санкт-Петербургский государственный
педиатрический медицинский университет» Министерства здравоохранения
Российской Федерации, 194100, Санкт-Петербург, Литовская ул., 2

³ Федеральное государственное бюджетное военное образовательное
учреждение высшего образования «Военно-медицинская академия имени С.М.
Кирова» Министерства обороны Российской Федерации, 194044, г. Санкт-
Петербург, ул. Академика Лебедева, 6.

⁴ Общество с ограниченной ответственностью «Полимерные
полупроводники», 199397, Санкт-Петербург, Кораблестроителей, д. 23

Резюме

Введение. Ежегодно в мире появляются десятки новых раневых покрытий, однако большинство из них состоит из хорошо известных ранее материалов. Использование недавно полученных раневых покрытий на основе электропроводящих полимеров открывает новые возможности в лечении ожоговых ран. В работе изучены раневые покрытия на основе двух представителей класса электропроводящих полимеров: полианилина и полипиррола.

Цель исследования: Оценка первого опыта применения раневых покрытий на основе полианилина и полипиррола в виде тканевых материалов в комплексном лечении ожоговых ран.

Материалы и методы. Раневые покрытия на основе электропроводящих полимеров полианилина и полипиррола изучены с точки зрения

гемостатического эффекта, антибактериальных свойств, защитной функции, адгезии к раневой поверхности, проницаемости для антисептиков и мазей. При этом были получены данные, на основании которых определены показания к использованию данного медицинского изделия. Исследование проведено на 14 пострадавших от глубоких ожогов, однако группа пациентов недостаточно велика для окончательных статистических выводов.

Результаты и обсуждение. Раневые покрытия на основе полианилина и полипиррола атравматичны, отлично моделируются на поверхности раны, обладают хорошей адгезией к раневой поверхности, сохраняют свои свойства в течение 7 суток на ране. Обладают хорошей проницаемостью для растворов и отделяемого из раны, не прилипают к аутодермотрансплантатам, однако избыточно сильно фиксируются на гранулирующей ране.

Вывод. Раневые покрытия на основе полианилина и полипиррола удобны в использовании и эффективны в лечении ожоговых ран.

Ключевые слова: ожоговая рана, раневые покрытия, полианилин, полипиррол.

THE FIRST EXPERIENCE OF USING WOUND COATINGS BASED ON ELECTRICAL CONDUCTIVE POLYMERS OF POLYANILIN AND POLYPYRROL IN THE TREATMENT OF BURN WOUNDS

Zinoviev E.V.^{1,2,3}, Soloshchenko V.V.¹, Sapurina I.Yu.⁴, Shishov M.A.⁴

¹ Saint Petersburg I.I. Dzhanelidze Research Institute of Emergency Medicine, 192242, Russia, St. Petersburg, Budapestskaya st., 3, lit. A

² Saint-Petersburg State Pediatric Medical University, 194100, St. Petersburg, Litovskaya street, 2

³ S. M. Kirov Military Medical Academy, 194044, St. Petersburg, st. Academician Lebedev, 6

⁴ Polymer Semiconductors, 199397, Saint Petersburg, Korablestroiteley, 23

Abstract

Introduction. Every year, dozens of new wounded coatings appear in the world, but most of them consist of well-known materials. The use of recently received wound coatings based on electrical conductive polymers opens up new opportunities in the treatment of burn wounds. In the work, wound coatings based on two representatives of the class of electrical conductive polymers were studied: polyaniline and polypyrrol.

Research objective: Evaluation of the first experience of using wound dressings based on polyaniline and polypyrrole in the form of fabric materials in the complex treatment of burn wounds.

Materials and methods. Wound coatings based on electrically conductive polymers and polypyrrol polymers are studied with anguish of the hemostatic effect, antibacterial properties, protective function, adhesion to the wound surface, permeability for antiseptics and ointments. At the same time, data were obtained on the basis of which indications for the use of this medical product were determined. The study was conducted on 14 victims of deep burns, but a group of patients is not large enough for the final statistical conclusion.

Results and discussion. Wound coatings based on polyaniline and polypyrrollah are athletic, perfectly modeled on the surface of the wounds, have good adhesion to the wound surface, retain their properties for 7 days on the wound. They have good permeability for solutions and separated from the wound, do not adhere to auto-proprietors, but they are excessively fixed on a granular wound.

Conclusion. Wound coatings based on polyaniline and polypyrrol are convenient to use and effective in the treatment of burn wounds.

Key words: burn wound, wound coatings, polyanilin, polypyrrol.

Введение. В настоящее время известны десятки разновидностей раневых покрытий, а если говорить о коммерческих наименованиях, то их не менее 300 [1,2]. Тем не менее, существует необходимость разработки новых раневых материалов по причине сложности и много-стадийности процессов регенерации тканей, требующей наличия у раневых материалов множества функций: гемостатика, антиоксиданта, антибактериального и противовирусного агента, и все это при наличии хорошей биосовместимости. Существующая тенденция разработки новых раневых материалов, путем насыщения инертного носителя разнообразными лекарственными препаратами: антисептиками, антибиотиками, гормонами и т.д., устарела. Данное исследование направлено на поиск новых полимерных материалов для регенерации тканей и лечения ими наиболее сложных, в плане восстановления, обширных ожоговых ран. В качестве раневых покрытий нами использованы материалы на основе полимеров с сопряженной структурой цепей или, так называемые, электропроводящие полимеры: полианилина (PANI) и полипиррола (PPy), практически не применявшиеся ранее в данном медицинском направлении.

Полимеры с сопряженной структурой цепей или так называемые электропроводящие полимеры (ЭПП) – самый «молодой» класс синтетических полимеров, за открытие которых в 2000 г присуждена Нобелевская премия по химии [3]. ЭПП отличаются регулярной структурой цепей с четким чередованием одинарных и двойных углерод-углеродных связей, благодаря чему полимеры обладают электропроводностью на уровне углеродных материалов [4]. В настоящее время ЭПП применяются в области энергосбережения, катализа, электроники, как радиопоглощающие материалы и сорбенты [4, 5]. За последние 10 лет установлена биосовместимость трех представителей класса ЭПП: PANI, PPy и политиофена, что послужило началом их биомедицинского применения [6]. Полимеры используются в качестве биосовместимых имплантируемых электродов и сенсоров [7, 8], как «умные» капсулы для целевой доставки лекарств [7], в качестве электропроводящих скаффолдов для регенерации нервных тканей и в клеточной инженерии [9, 10].

Для лечения ран полимеры применялись только в составе раневых устройств – электрических приборов для заживления трофических язв путем электростимуляции раневой поверхности слабым электрическим током. Здесь PANI, PPy выполняли функцию электродов, подводящих ток к открытой ране [11]. Как классическое раневое покрытие PANI применялся только в составе многокомпонентного геля, где основным материалом служил хитозан. [12] Детальное исследование показало преимущества композита, содержащего PANI, в сравнении с чистым хитозаном, а также коммерческим раневым Tegaderm™, что породило представление о взаимном синергетическом влиянии двух полимеров: хитозана и PANI, на заживление ран.

Задача коллектива авторов – показать возможность использования нативных полимеров PANI и PPy в качестве классических раневых покрытий. Полученные для этих целей и предварительно исследованные нами материалы представляли собой либо чистые ЭПП: PANI и PPy, либо полимеры, иммобилизованные на инертную биосовместимую матрицу. Работе, представленной в данной публикации, проведенной в ГБУ НИИ СП им. И.И. Джанелидзе, предшествовало многолетнее и всестороннее исследование свойств PANI и PPy. Проведен анализ антиоксидантной активности полимеров, позволяющей подавлять накопление токсичных перекисных радикалов [13]. In-vitro и in-vivo изучены гемостатические свойства полимеров. в сравнении с коммерческими материалами Surgicell и Cellistyp. Большое внимание уделено исследованию бактерицидных свойств PANI и PPy в отношении наиболее распространенных грамм-положительных и грамм-отрицательных бактерий [14]. На вирусах гриппа и полиомиелита изучены антивирусные свойства полимеров [15-18], показано, что PANI и PPy прочно связывают микропатоген и тем самым обеспечивают антисептическое действие не хуже, чем ионы серебра [16, 17].

Биосовместимость PANI и PPy, а также полимеров, иммобилизованных на инертный носитель изучена как in-vivo на грызунах [9], так и на клеточных культурах (фибробласты, мезенхиальные стволовые клетки) путем оценки

пролиферативной активности клеток на поверхности полимеров [16, 19, 20]. Показано, что биосовместимость наших материалов не ниже уровня общеизвестных биосовместимых полимеров, как например, полилактид, который широко используется инвазивно.

Цель исследования: Оценка первого опыта применения раневых покрытий на основе полианилина и полипиррола в виде тканевых материалов в комплексном лечении ожоговых ран.

Материалы и методы. Раневые покрытия на основе PANI (Синтеран-А) и PPy (Синтеран-П) изготовлены ООО «Полимерные полупроводники» и одобрены протоколом локальной этической комиссии ГБУ НИИ СП им. И.И. Джанелидзе. Исследование одобрено локальным этическим комитетом ГБУ СПб НИИ СП им. И.И. Джанелидзе, протокол № 1-10 от 10 октября 2024. Перед началом использования раневых покрытий были получены информированные согласия у пациентов отдела термических поражений, в комплексном лечении которых были успешно применены данные медицинские изделия. Перед применением раневые покрытия подвергались стерилизационной обработке автоклавированием и могли находиться в стерильной упаковке длительное время.

Раневые покрытия Синтеран образованы инертной матрицей типа медицинского бинта или салфетки из 100% целлюлозы, на которую поверх волокон целлюлозы нанесены электропроводящие полимеры. Содержание PANI и PPy не превышает 10% веса материала. При этом PANI и PPy покрывают всю поверхность волокон целлюлозы, слоем толщиной 30-50 нанометров, прочно связаны с носителем и не меняют механических свойств исходного медицинского изделия (рис. 1). Нативные PANI и PPy получены ООО «Полимерные полупроводники», методом окислительной полимеризации соответствующих мономеров анилина или пиррола в водных или водно-спиртовых средах.

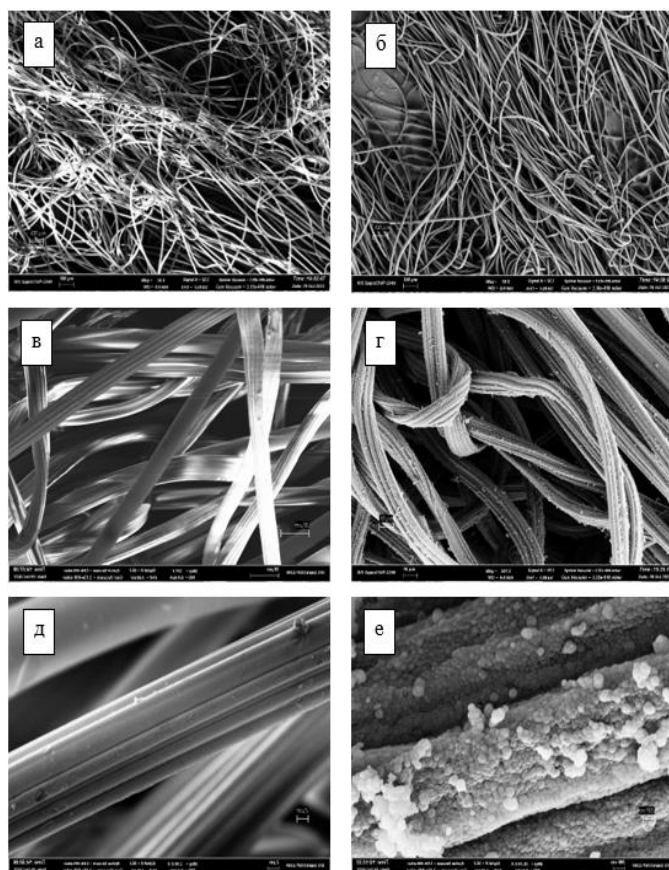


Рисунок 1. Раневые покрытия «СИНТЕРАН» электронная сканирующая микроскопия при разных увеличениях. Нетканый текстиль 100% х/б (левый столбец а, в, д); текстиль модифицирован электропроводящим полимером (правый столбец б, г, е)

В ходе исследования в НИИ СП им. И.И. Джанелидзе изучен гемостатический эффект, антибактериальные свойства, защитная функция, адгезия к раневой поверхности, проницаемость для антисептиков и мазей раневых покрытий Синтеран. При этом были получены данные, на основании которых определены показания к использованию данного медицинского изделия. Исследование проведено на 14 пострадавших от глубоких ожогов, однако группа пациентов недостаточно велика для окончательных статистических выводов.

Тканые покрытия на основе PANI и PPy использовали как после некрэктомии на раневую поверхность, так и после аутодермотрансплантации на расщепленный перфорированный/сплошной трансплантат. В обоих случаях до

наложения раневого покрытия кровотечение из сосудов останавливали при помощи электрокоагулятора. Для остановки капиллярного кровотечения достаточно было 5 минутного прижатия салфетки с 3% перекисью водорода для обеспечения гемостаза, поэтому в лечении ожоговых ран не стоял вопрос использования данного покрытия с гемостатической целью. Из положительных свойств хочется отметить, что раневые покрытия благодаря своей хорошей проницаемости позволяли своевременно диагностировать источник кровотечения. В любом случае кровотечение из мелких сосудов требовало коагуляции или прошивания.

В случае выполнения некрэктомии с одновременной аутодермотрансплантацией, рана укрывалась покрытием из PANI и PPy. Раневые покрытия обладали достаточной адгезией к ране и эластичностью, что позволило моделировать рельеф на различных участках тела. В дальнейшем при выполнении перевязок раневое покрытие не удалялось с раны, а выполняло защитную функцию. Проницаемость раневого покрытия позволяло вовремя выявить нагноение в ране. Не снимая раневого покрытия, рана была санирована путем обильного пропитывания тканного полотна раствором антисептика. Хорошая проницаемость раневого покрытия позволила проводить обработку раны водорастворимыми мазями прямо через покрытие. При полном приживлении аутодермотрансплантата покрытие свободно удалялось с раневой поверхности. В случае лизиса трансплантата раневое покрытие плотно фиксировалось на гранулирующей ране и в дальнейшем часть волокон длительно оставалась на ране. В ряде случаев потребовалось применение острого хирургического инструментария для удаления волокон от покрытия на дне раны перед аутодермотрансплантацией на открытых областях тела.

Результаты. Наиболее показательные случаи использования раневых покрытий на основе PANI и PPy представлены на клинических примерах.

Первый клинический пример. Раневое покрытие применено у пациентки П. 59 лет. Диагноз: ожог пламенем 7(6%)/II-III степени головы, туловища и левой верхней конечности). Локализация ран: шея, лицо и верхняя половина

туловища, избыточная подкожная жировая клетчатка. Выполнена операция некрэктомия через 6 суток после травмы, на площади 5% п.т. до жизнеспособных тканей, которыми являлась подкожная жировая клетчатка и глубокие слои дермы (рис. 2). Рана характеризовалась неровными контурами и неоднородностью по глубине поражения. Выполнена остановка кровотечения путем коагуляции и прошивания мелких сосудов. Раневая поверхность не была пригодна к аутодермотрансплантации. Вся раневая поверхность укрыта раневым покрытием на основе РРу (рис. 3). Гемостаз удовлетворительный. Болевой синдром в послеоперационном периоде не выражен.

В течение 10 суток после операции раневое покрытие было плотно фиксировано к ране. Свойства раневого покрытия позволяли осуществляться оттоку раневого отделяемого через поры в покрытии, а также выполнять обработку раны растворами антисептиков путем пропитывания раневого покрытия таковыми (хлоргекседин, пронтосан). Через 10 дней после выполнения некрэктомии под раневым покрытием через отдельные смотровые отверстия, выполненные на каждом сегменте, оценивали состояние подлежащих тканей. Повязки за время нахождения на ране сохранили эластичность и мягкость, что субъективно отмечено самой пациенткой.

Формирование грануляционной ткани, способной принять аутодермотрансплантат, служило сигналом к выполнению операции, в ходе которой на рану была выполнена трансплантация расщепленного кожного трансплантата. Сверху трансплантат был укрыт раневым покрытием из РРу. Через трое суток после операции трансплантаты фиксированы, отделяемого нет, так как оно свободно вышло через поры в раневом покрытии и удалялось вместе с марлевыми повязками (рис. 4).

При этом, на 10 сутки в области сформированной грануляционной ткани раневое покрытие легко удалялось. Напротив, на участках ран, где под ним началась островковая эпителизация, раневое покрытие было плотно фиксировано, во избежание травматизации неэпидермиса раневое покрытие оставлено на ране до самостоятельного отторжения в процессе заживления ран.



Рисунок 2. Пациентка П. после выполнения некрэктомии



Рисунок 3. Пациентка П. Все раны под раневым покрытием на основе полипиррола



Рисунок 4. Пациентка П. На ожоговые раны выполнена свободная аутодермотрансплантация.

Второй клинический пример. Пациент Е. 64 лет. Диагноз: Ожоговая болезнь. Термический ожог горячей водой 34% (14%)/II-III ст. туловища, нижних конечностей (рис. 5). На 7 сутки выполнена некрэктомия на площади 8% п.т. (рис. 6). Отмечалась неравномерность по глубине поражения, что не дало выполнить одновременно аутодермотрансплантацию. Подготовка раны проводилась под раневым покрытием на основе PANI, на протяжении 11 суток раневое покрытие менялось 2 раза (рис. 7). Далее выполнена аутодермотрансплантация перфорированным трансплантатом с хорошим результатом приживления, результат представлен на 5 сутки после операции (рис. 8).



Рисунок 5. Пациент Е. Ожоговая рана на 4 сутки после травмы



Рисунок 6. Вид раны после некрэктомии. Мозаичность поражения по глубине



Рисунок 7. Вся раневая поверхность укрыта раневым покрытием на основе полианилина в течение периода подготовки к аутодермотрансплантации (11 суток)



Рисунок 8. Выполнена аутодермотрансплантация. Результат на 5 сутки. Продолжалось использование раневого покрытия на основе полианилина для подготовки ран к аутодермотрансплантации



Рисунок 9. Пациент Е. 43 сутки после травмы, основные ожоговые раны ликвидированы, плотно фиксированные фрагменты раневого покрытия на отдельных участках ожоговой раны

На рисунке 9 представлен результат лечения пациента Е. через 5 недель после травмы. Основные ожоговые раны ликвидированы. Имеются участки с очень плотной фиксацией раневого покрытия к ране.

Обсуждение. Раневые покрытия на основе PANI и PPy хорошо зарекомендовали себя при подготовке ожоговой раны к аутодермотрансплантации и последующего ведения пострадавшего. Покрытия атравматичны, отлично моделируются на поверхности раны, обладают хорошей адгезией к раневой поверхности, сохраняют свои свойства в течение 7 суток на ране. Обладают хорошей проницаемостью для растворов и отделяемого из раны, но не позволяют высыхать раневой поверхности. Не прилипают к аутодермотрансплантатам, однако избыточно сильно фиксируются на гранулирующей ране, проникая волокнами вглубь грануляций. Использование с гемостатической целью преимуществ перед 3% перекисью водорода и физиологическим раствором с адреналином не получено. Воздействие на микрофлору ожоговой раны также трудно оценить, так как раневое покрытие использовалось в комплексе с водорастворимыми мазями и антисептиками.

Вывод. Раневые покрытия на основе PANI и PPy удобны в использовании и эффективны в лечении ожоговых ран.

Список литературы

1. Морозов А.М., Сергеев А.Н., Сергеев Н.А. и др. Использование современных раневых покрытий в местном лечении ран различной этиологии. *Современные проблемы науки и образования*. 2020; 2: 6.
2. Sen C.K. Human wound and its burden. *Adv. Wound Care*. 2021; 10: 281-292.
3. MacDiarmid A.G. A novel role for organic polymers (Nobel lecture). *Angew. Chem. Int. Edit.* 2001; 40: 2581-2590.
4. Skotheim T.A. *Conjugated Polymers: Theory, Synthesis, Properties and Characterization. Handbook of Conducting Polymers*. CRC Press; 2007.
5. Sapurina I.Yu., Shishov M.A., Ivanova V.T. Sorbents for water purification based on conjugated polymers. *Russ. Chem. Rev.* 2020; 89(10): 1115-1131.
6. Skopalová K., Capáková Z., Bober P. et al. In-Vitro Hemocompatibility of Polyaniline Functionalized by Bioactive Molecules. *Polymers*. 2019; 11: 1861.
7. Zare E.N., Makvandi P., Ashtari B. et al. Progress in conductive polyaniline-based nanocomposites for biomedical applications: a review. *J. Med. Chem.* 2020; 63(1): 1-22.
8. Someya T., Bao Z., Malliaras G.G. The rise of plastic bioelectronics. *Nature*. 2016; 540: 379-385.
9. Орлов В.П., Ништ А.Ю., Сапурина И.Ю. и др. Результаты замещения обширных дефектов нервов синтетическими кондуитами на основе полилактида с полипирролом в эксперименте. Оперативная хирургия и клиническая анатомия. *Пироговский научный журнал*. 2024, 8(4): 24–32.
10. Nasser R.A., Arya S.S., Alshehhi K.H. , Teo J., Pitsalidis C.. Conducting polymer scaffolds: a new frontier in bioelectronics and bioengineering. *Trends in Biotechnology*. 2023; 55: 15.
11. Yu R., Zhang H., Guo B. Conductive Biomaterials as Bioactive Wound Dressing for Wound Healing and Skin Tissue Engineering. *Nano-Micro Lett.* 2022; 14: 1.

12. Zhao X., Wu H., Guo B., Dong R., Qiu Y. Antibacterial anti-oxidant electroactive injectable hydrogel as selfhealing wound dressing with hemostasis and adhesiveness for cutaneous wound healing. *Biomaterials*. 2017; 122: 34e47
13. Kumar A., Banerjee S., Saikia J., Konwar B.K. Swift heavy ion irradiation induced enhancement in the antioxidant activity and biocompatibility of polyaniline. *Nanofibers, Nanotechnology*. 2010; 21: 175102
14. Ivanova V.T., Garina E.O., Burtseva E.I. et al. Conducting polymers as sorbents of influenza viruses. *Chemical Papers*. 2017; 71: 495-503.
15. Сапурина И.Ю., Иванова М.В., Иванова В.Т. и др. Полианилин и его композиты в качестве сорбентов вирусов гриппа. *Высокомолярные соединения*. 2014; 56: 389.
16. Гарина Е.О., Иванова В.Т., Носик Н.Н. и др. Полипиррол и его композиты как адсорбенты для вирусов. *Нанотехнологии: разработка, применение – XXI век*. 2016; 8(2): 3-13.
17. Иванова В.Т., Морозова Е.О., Николаева Т.Н. и др. Исследование конкурентной сорбции вируса гриппа и бактерий на полимерные материалы. *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2018; 18(2): 248-256.
18. Морозова Е.О., Кулик Е.А., Сапурина И.Ю. и др. Реактивация сорбентов на основе полипиррола для очистки водных растворов от микропатогенов. *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2019; 19(4): 390-398.
19. Kolbe K. A., Shishov M. A., Sapurina I. Yu. et al. Electrical stimulation of human dermal fibroblasts on conducting matrix. *Technical Physics*. 2022; 15: 2466.
20. Shishov M.A., Sapurina I.Yu., Smirnova N.V., Yudin V.E. Biocompatible Electroconductive Matrices for Tissue Engineering: A Comparative Study. *Biointerface research in applied chemistry*. 2023; 13(1): 96.

References

1. Morozov A.M., Sergeev A.N., Sergeev N.A., et al. Use of modern wound dressings in local treatment of wounds of various etiologies. *Modern problems of science and education*. 2020; 2: 6. (In Russian).
2. Sen C.K. Human wound and its burden. *Adv. Wound Care*. 2021; 10: 281-292.
3. MacDiarmid A.G. A novel role for organic polymers (Nobel lecture). *Angew. Chem. Int. Edit.* 2001; 40: 2581-2590.
4. Skotheim T.A. Conjugated Polymers: Theory, Synthesis, Properties and Characterization. *Handbook of Conducting Polymers*. CRC Press; 2007.
5. Sapurina I.Yu., Shishov M.A., Ivanova V.T. Sorbents for water purification based on conjugated polymers. *Russ. Chem. Rev.* 2020; 89(10): 1115-1131.
6. Skopalová K., Čapáková Z., Bober P. et al. In-Vitro Hemocompatibility of Polyaniline Functionalized by Bioactive Molecules. *Polymers*. 2019; 11: 1861.
7. Zare E.N., Makvandi P., Ashtari B. et al. Progress in conductive polyaniline-based nanocomposites for biomedical applications: a review. *J. Med. Chem.* 2020; 63(1): 1-22.
8. Someya T., Bao Z., Malliaras G.G. The rise of plastic bioelectronics. *Nature*. 2016; 540: 379-385.
9. Orlov V.P., Nisht A.Yu., Sapurina I.Yu., et al. Results of replacing extensive nerve defects with synthetic conduits based on polylactide with polypyrrole in the experiment. Operative surgery and clinical anatomy. *Pirogov scientific journal*. 2024, 8(4): 24–32. (In Russian).
10. Nasser R.A., Arya S.S., Alshehhi K.H., Teo J., Pitsalidis C.. Conducting polymer scaffolds: a new frontier in bioelectronics and bioengineering. *Trends in Biotechnology*. 2023; 55: 15.
11. Yu R., Zhang H., Guo B. Conductive Biomaterials as Bioactive Wound Dressing for Wound Healing and Skin Tissue Engineering. *Nano-Micro Lett.* 2022; 14:1.

12. Zhao X., Wu H., Guo B., Dong R., Qiu Y. Antibacterial anti-oxidant electroactive injectable hydrogel as selfhealing wound dressing with hemostasis and adhesiveness for cutaneous wound healing. *Biomaterials*. 2017; 122:34e47
13. Kumar A., Banerjee S., Saikia J., Konwar B.K. Swift heavy ion irradiation induced enhancement in the antioxidant activity and biocompatibility of polyaniline. *Nanofibers, Nanotechnology*. 2010; 21: 175102
14. Ivanova V.T., Garina E.O., Burtseva E.I. et al. Conducting polymers as sorbents of influenza viruses. *Chemical Papers*. 2017; 71: 495-503.
15. Sapurina I.Yu., Ivanova M.V., Ivanova V.T. et al. Polyaniline and its composites as sorbents for influenza viruses. *High-molar compounds*. 2014; 56: 389. (In Russian).
16. Garina E.O., Ivanova V.T., Nosik N.N. et al. Polypyrrole and its composites as adsorbents for viruses. *Nanotechnology: development, application – XXI century*. 2016; 8(2): 3-13. (In Russian).
17. Ivanova V.T., Morozova E.O., Nikolaeva T.N. et al. Study of competitive sorption of influenza virus and bacteria on polymeric materials. *Sorption and chromatographic processes*. 2018; 18(2): 248-256. (In Russian).
18. Morozova E.O., Kulik E.A., Sapurina I.Yu. et al. Reactivation of polypyrrole-based sorbents for purification of aqueous solutions from micropathogens. *Sorption and chromatographic processes*. 2019; 19(4): 390-398. (In Russian).
19. Kolbe K. A., Shishov M. A., Sapurina I. Yu. et al. Electrical stimulation of human dermal fibroblasts on conducting matrix. *Technical Physics*. 2022; 15: 2466.
20. Shishov M. A., Sapurina I. Yu., Smirnova N. V., Yudin V. E. Biocompatible Electroconductive Matrices for Tissue Engineering: A Comparative Study. *Biointerface research in applied chemistry*. 2023; 13(1): 96.