

DOI: 10.37988/1811-153X_2026_1_178

[Г.А. Демьяшкин](#)¹,

д.м.н., врач-патологоанатом, ведущий научный сотрудник научно-образовательного ресурсного центра инновационных технологий иммунофенотипирования, цифрового пространственного профилирования и ультраструктурного анализа (молекулярной морфологии)

[М.Ю. Дурасов](#)¹,

аспирант кафедры челюстно-лицевой хирургии и хирургической стоматологии

[А.А. Мураев](#)¹,

д.м.н., профессор кафедры челюстно-лицевой хирургии и хирургической стоматологии

[К.А. Силаков](#)¹,

м.н.с. научно-образовательного ресурсного центра инновационных технологий иммунофенотипирования, цифрового пространственного профилирования и ультраструктурного анализа (молекулярной морфологии)

[Д.Ю. Милюкова](#)²,

научный сотрудник кафедры хирургической стоматологии и челюстно-лицевой хирургии

[С.Ю. Иванов](#)^{1,2},

член-корр. РАН, д.м.н., профессор, зав. кафедрой челюстно-лицевой хирургии и хирургической стоматологии; зав. кафедрой челюстно-лицевой хирургии

[Г.Е. Дженжера](#)³,

научный сотрудник

[А.А. Ушаков](#)³,

научный сотрудник

¹ РУДН, 117198, Москва, Россия

² Первый МГМУ им. И.М. Сеченова, 119991, Москва, Россия

³ ООО «Бонабайт», 125284, Москва, Россия

Иммуногистохимическая характеристика реакций местных тканей при имплантации высокопористых имплантатов на основе полиэфирэфиркетона и полиметилметакрилата

Реферат. Разработка биосовместимых имплантационных материалов остается одной из приоритетных задач современной челюстно-лицевой хирургии и стоматологии. В статье представлена оценка тканевых реакций при подкожной имплантации изделий, изготовленных методом 3D-печати из полиэфирэфиркетона (ПЭЭК) и полиметилметакрилата (ПММА). Проведен морфологический и иммуногистохимический (ИГХ) анализ мягких тканей в различные сроки после имплантации с использованием маркеров CD3, CD20, VEGF и коллагена I типа. **Цель исследования** — оценка иммуногистохимической реакции местных тканей при подкожной имплантации изделий на основе ПЭЭК и ПММА, а также определение их биосовместимости для клинического использования. **Материалы и методы.** В исследовании использованы образцы мягких тканей экспериментальных животных после подкожной имплантации имплантатов из двух классов полимеров — ПЭЭК и ПММА. ПЭЭК был представлен тремя коммерческими вариантами (Tecafil, Vestakeep, Arium), а ПММА — одним (Bonleculle). Проводили морфологический и ИГХ-анализ с использованием антител к CD3, CD20, VEGF и коллагену I типа. Количественная оценка проводилась в стандартных полях зрения на микропрепаратах. **Результаты.** В ходе исследования установлены различия в характере воспалительного ответа, интенсивности ангиогенеза и выраженности фиброза в зависимости от состава материала. Полученные данные подтверждают высокую биосовместимость ПЭЭК и демонстрируют перспективность его применения в реконструктивной хирургии. Слабо выраженная воспалительная реакция выявлена вблизи всех типов имплантатов, однако именно в группе ПЭЭК наблюдалась наиболее стабильная тканевая реакция: плотность CD3⁺-клеток соответствовала 1—2 баллам, а уровень VEGF оставался стабильным на всех сроках (2—3 балла). В группе ПММА отмечен более выраженный иммунный ответ, особенно на 7-е сутки, где плотность CD3⁺-лимфоцитов достигала 3 баллов, что в 2,8 раза выше, чем в группе ПЭЭК ($p < 0,05$); также зарегистрировано увеличение экспрессии антител к VEGF и коллагену I типа до 3 баллов с последующим снижением к 60-м суткам. **Заключение.** Результаты подтверждают высокую биосовместимость ПЭЭК и его низкую иммуногенность, что делает его предпочтительным материалом для имплантации. ПММА и его производные могут вызывать более выраженные тканевые реакции, требующие дальнейшего изучения и оптимизации.

Ключевые слова: ПЭЭК, ПММА, биосовместимость, иммуногистохимия, имплантаты, воспаление, 3D-печать

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Демьяшкин Г.А., Дурасов М.Ю., Мураев А.А., Силаков К.А., Милюкова Д.Ю., Иванов С.Ю., Дженжера Г.Е., Ушаков А.А. Иммуногистохимическая характеристика реакций местных тканей при имплантации высокопористых имплантатов на основе полиэфирэфиркетона и полиметилметакрилата. — *Клиническая стоматология*. — 2026; 29 (1): 178—186. DOI: 10.37988/1811-153X_2026_1_178

[G.A. Demyashkin](#)¹,

Doctor of Science in Medicine, pathologist, leading researcher at the Scientific and Educational Resource Center for Innovative Technologies of Molecular Morphology

[M.Yu. Durasov](#)¹,

postgraduate student of the Maxillofacial surgery and surgical dentistry Department

[A.A. Muraev](#)¹,

Doctor of Science in Medicine, professor of the Maxillofacial surgery and surgical dentistry Department

Immunohistochemical characterization of local tissue reactions to the implantation of highly porous implants based on polyetheretherketone and polymethylmethacrylate

Abstract. The development of biocompatible implant materials remains a key priority in modern maxillofacial surgery and dental practice. This study presents an evaluation of tissue responses to subcutaneous implantation of 3D-printed constructs made from polyetheretherketone (PEEK) and polymethylmethacrylate (PMMA). A morphological and immunohistochemical analysis was performed at various time points after implantation, using markers such as CD3, CD20, VEGF, and

[K.A. Silakov](#)¹,

junior researcher of the Scientific and Educational Resource Center for Innovative Technologies of Molecular Morphology

[D.Yu. Milyukova](#)²,

researcher of the Surgical Dentistry and Maxillofacial surgery Department

[S.Yu. Ivanov](#)^{1,2},

Russian Academy of Science corresponding member, Doctor of Science in Medicine, full professor of the Maxillofacial surgery and surgical dentistry Department; full professor of the Maxillofacial surgery Department

[G.E. Dzhendzhera](#)³,

researcher

[A.A. Ushakov](#)³,

researcher

¹ RUDN University,

117198, Moscow, Russia

² Sechenov University,

119991, Moscow, Russia

³ "Bonabyte" LLC, 125284, Moscow, Russia

Collagen I. The findings revealed differences in inflammatory response, angiogenesis, and fibrosis depending on the material composition. The results confirm the high biocompatibility of PEEK and highlight its potential for use in reconstructive surgery. **Objective:** To assess the immunohistochemical response of local tissues following subcutaneous implantation of PEEK and PMMA-based materials, and to determine their biocompatibility for clinical applications. **Materials and methods.** Soft tissue samples were obtained from experimental animals after subcutaneous implantation of implants made from four different polymers. Morphological and immunohistochemical analyses were conducted using antibodies to CD3, CD20, VEGF, and Collagen I. Quantitative assessment was performed within standardized microscopic fields. **Results.** The study revealed differences in the inflammatory response, angiogenesis, and fibrosis depending on the material composition. The findings confirm the high biocompatibility of PEEK and demonstrate its potential for use in reconstructive surgery. Mild inflammatory reaction was observed near all implant types; however, the PEEK group exhibited the most stable tissue response, with CD3⁺ cell density corresponding to 1–2 scores and stable VEGF levels (2–3 scores) throughout the observation period. In contrast, the PMMA group showed a more pronounced immune response, particularly on day 7, where CD3⁺ lymphocyte density reached 3 scores, exceeding the PEEK group by 2.8-fold ($p < 0.05$); increased expression of VEGF and Collagen I (up to 3 scores) was also observed, followed by a decrease by day 60. **Conclusion.** The results demonstrate the high biocompatibility and low immunogenicity of PEEK, supporting its use as a preferred implant material. PMMA-based materials may elicit stronger tissue reactions and warrant further investigation and surface optimization.

Key words: PEEK, PMMA, biocompatibility, immunohistochemistry, implants, inflammation, 3D printing

FOR CITATION:

Demyashkin G.A., Durasov M.Yu., Muraev A.A., Silakov K.A., Milyukova D.Yu., Ivanov S.Yu., Dzhendzhera G.E., Ushakov A.A. Immunohistochemical characterization of local tissue reactions to the implantation of highly porous implants based on polyetheretherketone and polymethylmethacrylate. *Clinical Dentistry (Russia)*. 2026; 29 (1): 178–186 (In Russian). DOI: 10.37988/1811-153X_2026_1_178

ВВЕДЕНИЕ

В нейрохирургии, травматологии, челюстно-лицевой хирургии и хирургической стоматологии важной задачей остается поддержание и оптимизация репаративной регенерации костной ткани при использовании искусственных внутрикостных и на костных имплантатах. Особое внимание уделяется разработке биосовместимых материалов, способствующих восстановлению утраченных тканей и их функций. Использование полимеров, в частности индивидуальных ПЭЭК-имплантатов, значительно повысило эффективность лечения крупных костных дефектов. Метаанализ показывает, что ПЭЭК-краниопластика связана со снижением шансов послеоперационных осложнений в 7,7 раза по сравнению с аутотрансплантатом и в 7,9 раза по сравнению с титановой сеткой, а также с более низким риском отказа имплантата [1]. Клинические исследования подтверждают успешную интеграцию и костную регенерацию у 91,7–100% пациентов [2, 3]. Ключевой целью в этой сфере остается создание имплантационных материалов, сочетающих высокую механическую прочность и долговечность с минимальной реакцией окружающих тканей после установки. Это критически важно для успешной остеоинтеграции имплантата и снижения риска осложнений, включая воспаление, фиброз или отторжение.

Согласно актуальному бюллетеню ВОЗ «Охрана здоровья полости рта» (2025), заболевания полости

рта, включая полную потерю зубов, затрагивают почти 3,7 млрд человек в мире, что подтверждает глобальный масштаб этой проблемы. Распространенность полной адентии достигает 23% среди населения старше 60 лет.

В клинической практике челюстно-лицевой и травматологической хирургии переломы нижней челюсти остаются одними из самых распространенных. Согласно данным различных исследований, их доля среди всех переломов костей лицевого черепа составляет от 65,2 до 92%, в зависимости от выборки и условий наблюдения [4].

Эффективность реконструктивного лечения в любой части организма напрямую коррелирует с биосовместимостью материалов имплантатов. Как показывают исследования, в 10–15% случаев послеоперационные осложнения возникают из-за нежелательной реакции тканей на имплантат, что актуализирует создание усовершенствованных, биологически инертных материалов [5].

Полиэфирэфиркетон (ПЭЭК) и полиметилметакрилат (ПММА) считаются перспективными материалами благодаря таким характеристикам, как прочность, износостойкость и биосовместимость [6]. Имплантаты и тканевые барьерные мембраны из ПЭЭК, изготовленные методом 3D-печати, применяются для контурной пластики костей лицевого скелета, замещения позвонков, устранения дефектов черепа, направленной костной регенерации альвеолярной кости [7–9]. В то время как данных о клиническом применении ПММА значительно

меньше, его использование ограничено в основном стоматологией и ортопедией, преимущественно в виде костного цемента [9].

Исследование механизмов взаимодействия имплантатов из полимеров с мягкими тканями: кожей и слизистой оболочкой полости рта — столь же важно, как и с костной тканью, поскольку в случае их экспозиции существует риск проникновения инфекции в костные структуры [10]. Влияние имплантатов, изготовленных из ПЭЭК и ПММА методом 3D-печати, на окружающие ткани при подкожной имплантации изучено не в полной мере, особенно в аспекте воспаления, фиброза, васкуляризации и иммунного ответа. Современные данные свидетельствуют, что выраженность этих процессов зависит от структуры и состава материала. В частности, исследования подтверждают, что пористые материалы с модифицированной поверхностью уменьшают воспаление и стимулируют ангиогенез, способствуя лучшей интеграции имплантата [11].

Основными гистологическими маркерами, характеризующими интенсивность воспалительного и иммунного ответа в окружающей имплантат соединительной ткани, выступают клеточные элементы иммунной системы — Т- и В-лимфоциты. Их количественное присутствие и распределение в тканях служит объективным показателем степени лимфоцитарной инфильтрации [12]. Параллельно важными диагностическими критериями являются состояние сосудистого компонента и особенности организации коллагеновых волокон, поскольку именно эти морфологические структуры наиболее точно отражают динамику фиброзных изменений в периимплантационной зоне [13].

Создание инновационных материалов, отвечающих критериям биосовместимости и снижающих вероятность послеоперационных осложнений, представляет собой значимое направление в современной восстановительной хирургии, в том числе в стоматологии. Особую важность это приобретает для пациентов с хроническими патологиями, иммунными нарушениями или индивидуальной непереносимостью имплантационных материалов. Изучение механизмов тканевого ответа на имплантаты позволит усовершенствовать их характеристики для повышения клинической эффективности. При этом иммуногистохимические аспекты взаимодействия имплантатов с окружающими тканями требуют более детального исследования, что подчеркивает актуальность их всестороннего изучения.

Учитывая все вышесказанное, настоящее исследование посвящено актуальной проблеме стоматологии и челюстно-лицевой хирургии — разработке биосовместимых материалов, способствующих эффективной остеоинтеграции и снижению вероятности послеоперационных осложнений.

Цель — оценка иммуногистохимической реакции местных тканей при подкожной имплантации изделий на основе полиэфирэфиркетона и полиметилметакрилата, изготовленных методом 3D-печати, а также определение их биосовместимости и безопасности для целевого применения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Выборочную совокупность исследования составили экспериментальные животные, которым проводили подкожную имплантацию с дальнейшей иммуногистохимической оценкой местной воспалительной реакции. Использовали 30 самцов крыс породы Вистар возрастом 9–10 недель, и массой 220 ± 20 г. Животным подкожно в область спины имплантировали по 2 диска из разных материалов каждому животному. Диски диаметром 4 мм были напечатаны на 3D-принтере Arrium P220 (Arrium 3D Technologies, Германия) из 4 разных материалов:

- I — **Tecafil PEEK VX MT (Ensinger, Германия)** — ПЭЭК, армированный углеродным волокном, предназначенный для имплантатов и хирургических инструментов;
- II — **Vestakeep i4 3DF (Evonik, Германия)** — чистый ПЭЭК медицинского класса, выпускаемый в форме филамента для 3D-печати;
- III — **Arrium-Evonik Vestakeep i4g 3DF (Arrium, Германия)** — ПЭЭК-филамент на основе сырья Evonik, переработанный и сертифицированный компанией Arrium для аддитивного производства;
- IV — **Bonlecule (Ossfila Technology, Гонконг)** — сополимер метилметакрилата и гидроксизтилметакрилата (ПММА) с добавлением гидроксиапатита, позиционируемый производителем как биоактивный материал для костной пластики.

Выбор материалов обусловлен их коммерческой доступностью, воспроизводимостью состава и соответствием стандартам для медицинских изделий (ISO 10993). Использование трех различных марок ПЭЭК (Tecafil, Vestakeep, Arrium) позволяет оценить воспроизводимость тканевых реакций при незначительных вариациях исходного сырья, тогда как ПММА (Bonlecule) выбран как референтный материал с известными клиническими применениями в стоматологии.

Животных выводили из эксперимента путем введения высоких доз анестетиков (кетамин и ксилазин) на 7-й, 30-й и 60-й день. Далее выделяли фрагменты мягких тканей, содержащие пластиковый имплантат, отступая 5 мм от его границ.

Полученный после иссечения материал фиксировали в 10%-ном нейтральном формалине. После осмотра предварительно фиксированного материала на станции вырезки для гистологических исследований выполняли гистотопографическую вырезку изучаемых образцов/препаратов. Материал имплантата не поддавался механическому воздействию при гистологической вырезке из-за высокой плотности. Диск имплантата с прилегающими местными тканями ориентировали в поперечном направлении, далее диск извлекали из мягких тканей, при этом препарат включал в себя все слои необходимые для исследования. В одну гистологическую кассету укладывали один препарат. Материал, помещенный в гистологические кассеты, дофиксировали в соответствующих фиксаторах с общим временем до 48 часов с последующей стандартной гистологической проводкой на карусельном гистопроцессоре и их заключением в парафиновую среду на станции заливки.

Для морфологических исследований полученные на микротоме срезы толщиной 3–5 мкм окрашивали гематоксилином и эозином и по Массону. Гистологические препараты изучали под оптическим микроскопом при увеличении от 2,5 до 100, проводили микрофото съемку на цифровую камеру. Для обработки, анализа и морфометрического исследований изображений пользовались свободной программой для компьютера QuPath. Морфометрический анализ проводили в 10 случайно выбранных полях зрения микроскопа при увеличении 400.

Методами иммуногистохимического (ИГХ) анализа изучали:

- локальный клеточный иммунный ответ в тканях, окружающих имплантационное ложе, с использованием специфических антител к CD3;
- гуморальный иммунный ответ с количественной оценкой В-лимфоцитарной инфильтрации с использованием антител к CD20;
- степень ангиогенеза в периимплантационной зоне с применением моноклональных антител к фактору роста эндотелия сосудов (VEGF);
- фиброгенез в тканях, окружающих имплантат, с использованием специфических антител к коллагену I типа — основному маркеру формирования соединительной ткани.

ИГХ-исследование проводили по стандартному протоколу с первичными антителами Abcam (Великобритания) к CD3 (ab16669, 1:150), CD20 (ab64088, 1:100), VEGF (ab32152, 1:250) и коллагену I типа (ab138492, 1:1500). В качестве вторичных пользовались универсальным набором антител для мышей и крыс HiDef Detection HRP Polymer (Cell Marque, США).

Количество иммунопозитивных клеток определяли в 10 полях зрения общей площадью 1,6 мм². Ввиду потенциальной неравномерности клеточной инфильтрации в перипротезной зоне и для обеспечения корректного применения параметрических и непараметрических методов статистического анализа, абсолютные значения плотности иммунопозитивных клеток (количество на 1 мм²) были преобразованы в порядковую шкалу (баллы): 1 балл — менее 5 клеток, 2 балла — от 5 до 10 клеток, и 3 балла — более 10 клеток. Данный подход позволил сгладить влияние единичных экстремальных значений и повысить надежность межгрупповых сравнений.

Статистический анализ

Сравнение между группами проводили с использованием однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) со значимостью $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Макроскопическое описание

При макроскопическом исследовании зоны имплантации и самого имплантата на 7-е, 30-е и 60-е сутки обнаружили: подвижность имплантатов ограничена, они плотно припаяны к окружающим тканям, что указывает на успешную тканевую интеграцию и стабильность

их положения. Цвет у них полностью соответствовал первоначальному, что свидетельствует об отсутствии изменений в их структуре или состоянии. Консистенция имплантатов определялась как твердо-эластическая, что соответствует нормальным параметрам для данного типа материалов и подтверждает их функциональную пригодность. В целом, состояние имплантатов можно охарактеризовать как удовлетворительное, без видимых признаков деформации или повреждений.

Микроскопическое описание

В четырех образцах всех имплантационных периодов, подкожно в проекции холки экспериментального животного, обнаружены морфологические признаки наличия имплантата, которые отличаются в зависимости от срока и химического состава. В срезах участок имплантации был ориентирован поперечно по отношению к окружающим тканям и коже.

Имплантационное ложе образовано тубулярными и частично солидными структурами — со стромальным компонентом, представленного разрастанием рыхлой и плотной неоформленной волокнистой соединительной тканью с кровеносными сосудами; замещение имплантируемого материала не наблюдается. Строма с признаками гранулематозного воспаления — реакция на инородное тело, которое ориентировалось от периферии к центру с постепенным нарастанием васкуляризации и диффузным замещением фиброзной тканью.

При оценке ответной реакции со стороны окружающих тканей при подкожной имплантации имплантатов на основе ПЭЭК и ПММА выявили слабо выраженную очаговую преимущественно мононуклеарную (лимфоидно-гистиоцитарную) инфильтрацию вблизи имплантатов (рис. 1).

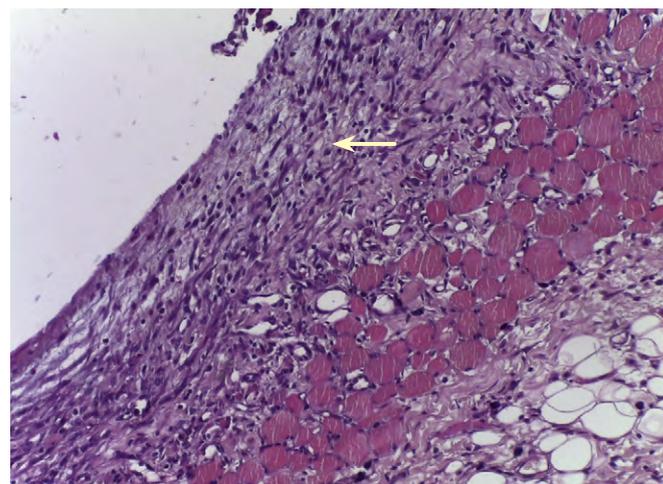


Рис. 1. Воспалительная инфильтрация в мягких тканях вблизи имплантата в группе Ариум (указана стрелкой). Окраска гематоксилином и эозином, ув. 200

Fig. 1. Inflammatory infiltration in soft tissues near the implant in the Apium group (arrow). Hematoxylin & eosin, mag. 200x

Имуногистохимическое описание

Количественный анализ выявил статистически значимые межгрупповые различия в динамике иммунного

Иммуногистохимические показатели, баллы
Immunohistochemical parameters, scores

Материал	CD3			CD20			VEGF			Collagen I		
	Срок, сутки											
	7	30	60	7	30	60	7	30	60	7	30	60
Tecafil (ПЭЭК)	1	0	0	1	1	0	3	2	2	1	1	1
Vestakeep (ПЭЭК)	2	1	0	1	1	1	3	2	2	0	0	0
Ариум-Evonik (ПЭЭК)	2	0	0	2	1	1	2	1	1	1	1	1
Bonlecule (ПММА)	3	1	1	1	1	1	3	1	1	2	2	2

ответа. Наибольшая плотность CD3⁺-лимфоцитов была зарегистрирована в группе Bonlecule на 7-е сутки эксперимента, где их количество превышало аналогичный показатель в группе ПЭЭК в 2,78 раза ($p < 0,05$; рис. 2, см. таблицу).

Анализ полученных данных выявил существенные межгрупповые различия в динамике накопления CD20-позитивных клеток. Максимальная плотность В-лимфоцитов наблюдалась в группе Ариум на 7-е сутки экспериментального периода, где их количество достоверно ($p < 0,05$) превышало аналогичный показатель в группе ПЭЭК в 1,78 раза (рис. 3, см. таблицу).

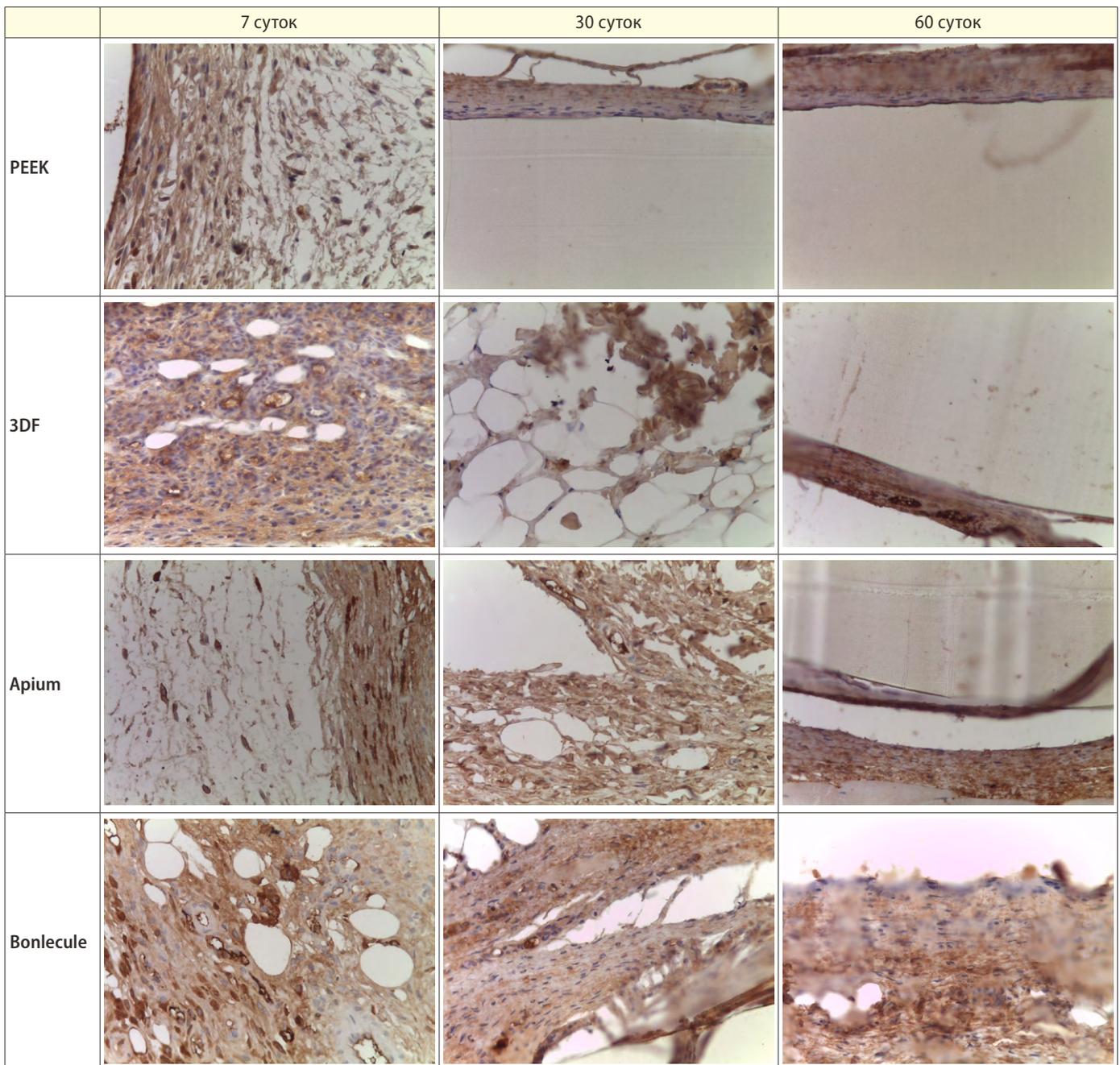


Рис. 2. Иммуногистохимическая характеристика реакции окружающих тканей при подкожной имплантации имплантатов на основе полиэфирэфиркетона и полиметилметакрилата: реакция с антителами к CD3, докрасивание гематоксилином, ув. 400

Fig. 2. Immunohistochemical analysis of tissue response to subcutaneous PEEK and PMMA implants: CD3 immunostaining, hematoxylin counterstain, mag. 400x

На начальном этапе, на 7-е сутки, количественный анализ не выявил статистически значимых различий в плотности VEGF-позитивных клеток между исследуемыми группами. Однако в динамике наблюдались существенные межгрупповые различия. В группе Bonlecule к 60-м суткам отмечалось выраженное снижение экспрессии VEGF в 1,9 раза по сравнению с показателями на 7-е сутки ($p < 0,01$). В группе ПЭЭК динамика изменения васкуляризации была менее выраженной — снижение составило лишь 1,33 раза к 60-м суткам относительно исходного уровня ($p < 0,05$; рис. 4, см. таблицу).

Результаты исследования фиброгенеза в тканях, окружающих имплантат, выявили существенные

межгрупповые различия: в группе Bonlecule на 7-е сутки наблюдения площадь экспрессии коллагена I типа была достоверно выше (в 1,78 раза, $p < 0,05$) по сравнению с группой ПЭЭК в аналогичный временной период (рис. 5, см. таблицу).

Наибольшая плотность CD3-позитивных лимфоцитов была зарегистрирована в группе Bonlecule на 7-е сутки эксперимента, составив в среднем $11,7 \pm 2,1$ клеток/ мм^2 , что в 2,78 раза превышало аналогичный показатель в группе Tesafile ($4,2 \pm 1,1$ клеток/ мм^2 ; $p < 0,05$). Плотность CD3-клеток в группах Vestakeep и Arium на этот срок составила $7,8 \pm 1,5$ и $7,5 \pm 1,4$ клеток/ мм^2 соответственно.

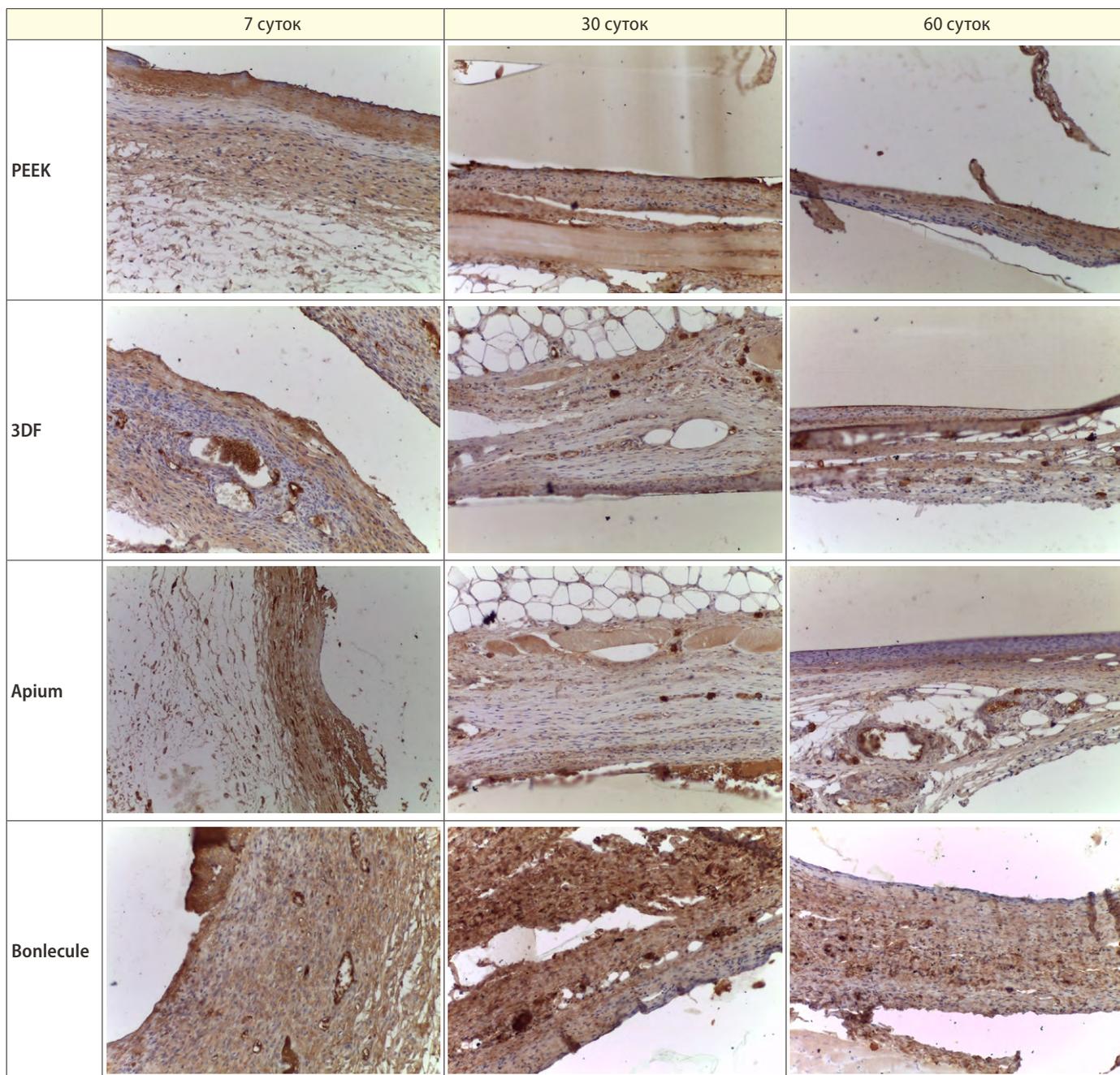


Рис. 3. Иммуногистохимическая характеристика реакции окружающих тканей при подкожной имплантации имплантатов на основе полиэфирэфиркетона и полиметилметакрилата: реакция с антителами к CD20, докрасивание гематоксилином, ув. 400

Fig. 3. Immunohistochemical analysis of tissue response to subcutaneous PEEK and PMMA implants: CD20 immunostaining, hematoxylin counterstain, mag. 400x

ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе исследования проведена комплексная оценка тканевых реакций при подкожной имплантации изделий из ПЭЭК и ПММА, а также анализ их биосовместимости для возможного применения в тканевой инженерии и костной пластике, прежде всего в нейрохирургии, челюстно-лицевой хирургии и хирургической стоматологии. Результаты исследования свидетельствуют о высокой стабильности обоих материалов и минимальной выраженности тканевых реакций, что обосновывает перспективность их клинического использования.

Результаты иммуногистохимического исследования демонстрируют значимые различия в тканевых реакциях на исследуемые материалы, что согласуется с современными данными о биосовместимости полимерных имплантатов. В группе Bonlecule зафиксирован более выраженный Т-клеточный иммунный ответ (CD3⁺-лимфоциты), что соответствует данным специализированной литературы, в которых отмечается прямая зависимость между химической структурой материала и интенсивностью раннего воспалительного ответа [14]. Аналогично, повышенная инфильтрация В-лимфоцитов (CD20⁺-лимфоциты) в группе Ариум

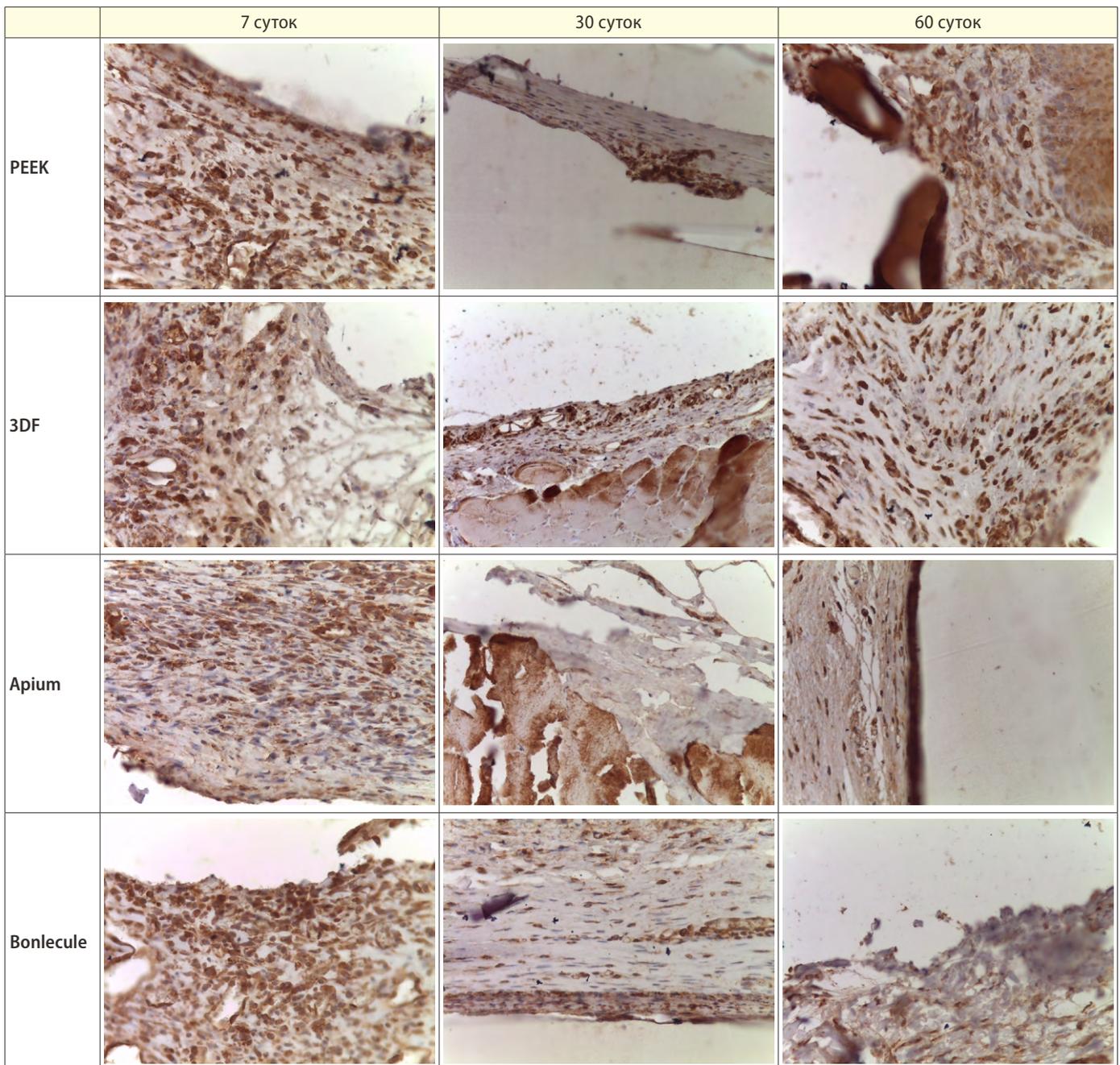


Рис. 4. Иммуногистохимическая характеристика реакции окружающих тканей при подкожной имплантации имплантатов на основе полиэфирэфиркетона и полиметилметакрилата: реакция с антителами к VEGF, докрасивание гематоксилином, ув. 400

Fig. 4. Immunohistochemical analysis of tissue response to subcutaneous PEEK and PMMA implants: VEGF immunostaining, hematoxylin counterstain, mag. 400x

согласуется с выводами исследований о роли поверхностных свойств материала в активации гуморального иммунитета [15].

Динамика ангиогенеза, характеризующаяся стабильностью в группе ПЭЭК и значительным снижением VEGF в группе Bonlecule, соответствует современным представлениям о васкуляризации периимплантационных тканей [16]. В частности, было показано, что низкая пористость и гидрофобность ПЭЭК способствуют более предсказуемому ангиогенезу, тогда как биоактивные материалы могут вызывать временное усиление васкуляризации с последующим его ремоделированием.

Усиленный фиброз в группе Bonlecule (повышенная экспрессия коллагена I типа) также находит подтверждение в работах, которые связывают этот эффект с ускоренной деградацией некоторых полимеров и высвобождением биоактивных компонентов [17]. В то же время стабильность ПЭЭК в этом аспекте соответствует его известным инертным свойствам [18].

Таким образом, полученные результаты подтверждают, что ПЭЭК остается эталоном биосовместимости благодаря сочетанию высоких механических свойств и минимального тканевого ответа, при этом 3D-печать не снижает его качественных характеристик.

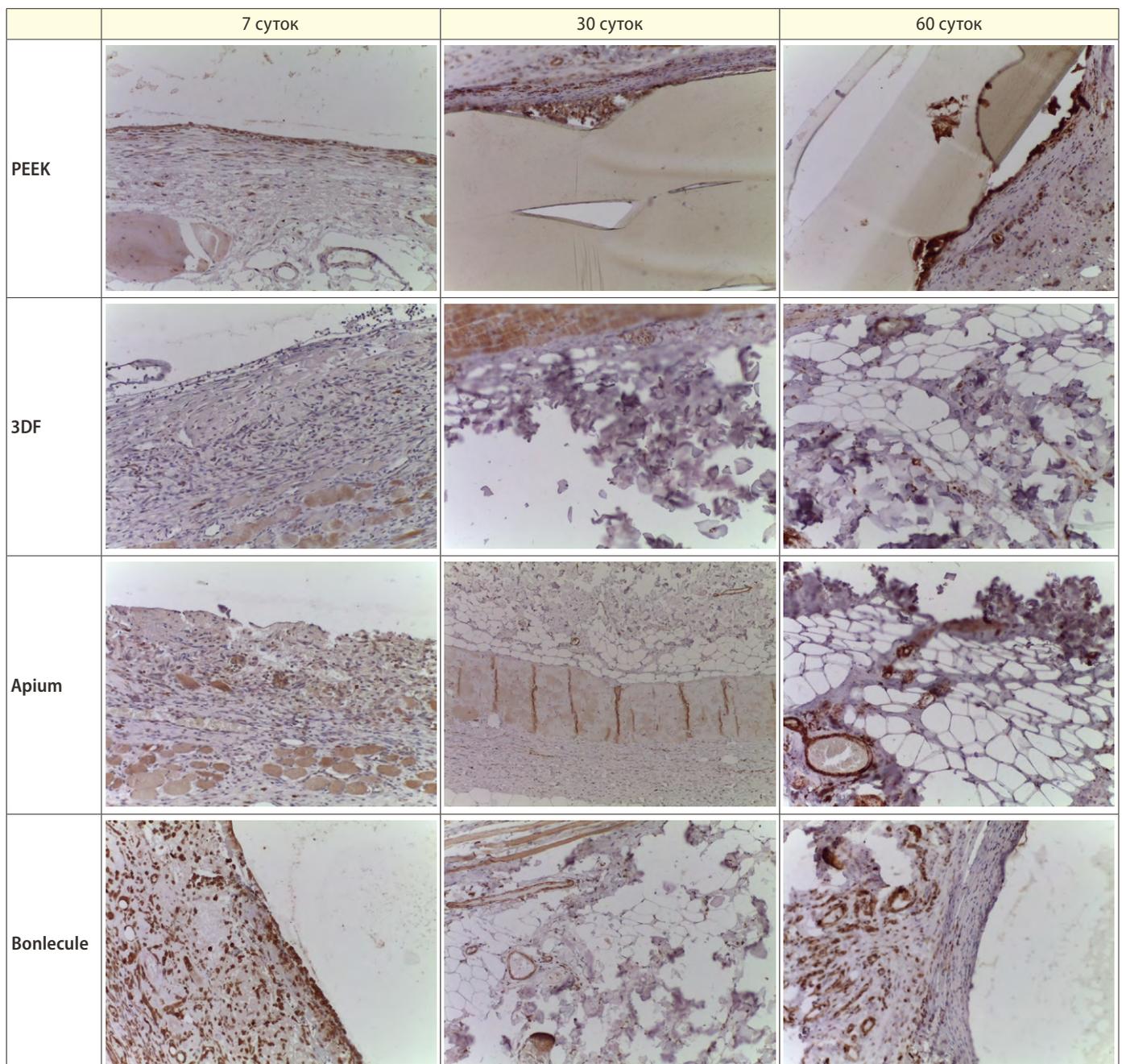


Рис. 5. Иммуногистохимическая характеристика реакции окружающих тканей при подкожной имплантации имплантатов на основе полиэфирэфиркетона и полиметилметакрилата: реакция с антителами к Collagen I, докрасивание гематоксилином, ув. 400

Fig. 5. Immunohistochemical analysis of tissue response to subcutaneous PEEK and PMMA implants: Collagen I immunostaining, hematoxylin counterstain, mag. 400x

Дальнейшие исследования должны быть направлены на оптимизацию поверхностных характеристик альтернативных материалов для снижения их иммуногенности при сохранении биоактивных свойств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование тканевых реакций на имплантационные материалы в различные сроки наблюдения позволило выявить существенные различия в характере биологического ответа. В группе Bonlecule отмечен более выраженный ранний иммунный ответ, проявляющийся значительной инфильтрацией CD3⁺ Т-лимфоцитов и CD20⁺ В-лимфоцитов, что свидетельствует об активации как клеточного, так и гуморального

звеньев иммунитета. Однако к поздним срокам наблюдения (60 суток) эти показатели значительно снижались, демонстрируя адаптацию тканей к имплантату.

В группе ПЭЭК наблюдалась более стабильная динамика всех исследуемых параметров: менее выраженная ранняя воспалительная реакция, более устойчивый ангиогенез, умеренное развитие соединительной ткани

Эти результаты согласуются с современными представлениями о биосовместимости полимерных имплантационных материалов и подтверждают перспективность применения ПЭЭК в клинической практике.

Поступила/Received: 09.10.2025

Принята в печать/Accepted: 13.03.2026

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES:

- Punchak M., Chung L.K., Lagman C., Bui T.T., Lazareff J., Rezzadeh K., Jarrahy R., Yang I. Outcomes following polyetheretherketone (PEEK) cranioplasty: Systematic review and meta-analysis. — *J Clin Neurosci.* — 2017; 41: 30—35. [PMID: 28377284](#)
- Todaro M., Saponaro G., Perquati F., Gasparini G., Signorelli F., Tartaglione T., Moro A. Bone regeneration and polyetheretherketone implants in maxillo-facial surgery and neurosurgery: A multidisciplinary study. — *Biology (Basel).* — 2024; 13 (7): 467. [PMID: 39056662](#)
- Elnaggar M.A., Elnamany H.A., Eissa M.K. Clinical evaluation of 3D PEEK implants for skull bone defects repair: a single center case series. — *Egyptian Journal of Neurosurgery.* — 2025; 1: 11. [DOI: 10.1186/s41984-025-00374-0](#)
- Маркаров А.Э., Еремин Д.А., Мартиросов А.В., Хандзрацян А.С., Оразвалиев А.И., Бугаян С.А., Халифаев О.И. Статистический анализ данных по неотложной челюстно-лицевой хирургии. — *Вестник Российского государственного медицинского университета.* — 2023; 5: 58—64. [eLibrary ID: 63703896](#)
[Markarov A.E., Eremin D.A., Martirosov A.V., Khandzratsyan A.S., Orazvaliev A.I., Bugayan S.A., Khalifaev O.I. Statistical analysis of data on emergency maxillofacial surgery. — *Bulletin of Russian State Medical University.* — 2023; (5): 56—62 (In Russian)]. [DOI: 10.24075/brsmu.2023.038](#)
- Gummadidala P. Complications in dental implantology. — *International Journal of Innovative Science and Research Technology (IJISRT).* — 2023; 8 (8): 2269—2276. [DOI: 10.5281/zenodo.8334389](#)
- Pituru S.M., Greabu M., Totan A., Imre M., Pantea M., Spinu T., Tancu A.M.C., Popoviciu N.O., Stanescu I.I., Ionescu E. A review on the biocompatibility of PMMA-based dental materials for interim prosthetic restorations with a glimpse into their modern manufacturing techniques. — *Materials (Basel).* — 2020; 13 (13): 2894. [PMID: 32605174](#)
- Xie W., Yang Z., Zhou Y., Xu X., Hu K. Research progress of 3D bioprinting PEEK scaffold material for bone regeneration. — In: proceedings of 14th China Academic Conference on Printing and Packaging. — Singapore: Springer Nature, 2024. — Pp. 136—144. [DOI: 10.1007/978-981-99-9955-2_19](#)
- Pöppe J.P., Spindel M., Griessenauer C.J., Gaggl A., Wurm W., Enzinger S. Point-of-care 3-dimensional-printed polyetheretherketone customized implants for cranioplastic surgery of large skull defects. — *Oper Neurosurg.* — 2024; 27 (4): 449—454. [PMID: 39283099](#)
- Sumarno S., Trisanti P.N., Airlangga B., Kurniasari N.M.W., Hidayat R.A., Nisa A.C., Hernugrahanto K.D., Ferdiansyah M. Setting properties along bone cement preparation and its effect on material properties. — *Advanced Materials Research.* — 2024; 1179: 19—23. [DOI: 10.4028/p-mxms2](#)
- Fons-Badal C., Labaig-Rueda C., Agustín-Panadero R., Solá-Ruiz M.F., Roig-Vanaclocha A., Fernández-Estevan L., Fons-Font A. Retrospective study of the association between peri-implantitis and keratinized mucosa. — *Applied Sciences (Switzerland).* — 2022; 14: 6980. [DOI: 10.3390/app12146980](#)
- Williams D.F. On the mechanisms of biocompatibility. — *Biomaterials.* — 2008; 29 (20): 2941—53. [PMID: 18440630](#)
- Milinkovic I., Krasavcevic A.D., Jankovic S., Sopta J., Aleksic Z. Immunohistochemical analysis of soft tissue response to polyetheretherketone (PEEK) and titanium healing abutments on dental implants: a randomized pilot clinical study. — *BMC Oral Health.* — 2022; 22 (1): 484. [PMID: 36368972](#)
- Rakic M., Canullo L., Radovanovic S., Tatic Z., Radunovic M., Souedain A., Weiss P., Struillou X., Vojvodic D. Diagnostic value of VEGF in peri-implantitis and its correlation with titanium particles: A controlled clinical study. — *Dent Mater.* — 2024; 40 (1): 28—36. [PMID: 37865576](#)
- Batool F., Özçelik H., Stutz C., Gegout P.Y., Benkirane-Jessel N., Petit C., Huck O. Modulation of immune-inflammatory responses through surface modifications of biomaterials to promote bone healing and regeneration. — *J Tissue Eng.* — 2021; 12: 20417314211041428. [PMID: 34721831](#)
- Roch T., Hahne S., Kratz K., Ma N., Lendlein A. Transparent substrates prepared from different amorphous polymers can directly modulate primary human B cell functions. — *Biotechnol J.* — 2017; 12: 1700334. [PMID: 28857458](#)
- Torstrick F.B., Lin A.S.P., Potter D., Safranski D.L., Sulchek T.A., Gall K., Guldberg R.E. Porous PEEK improves the bone-implant interface compared to plasma-sprayed titanium coating on PEEK. — *Biomaterials.* — 2018; 185: 106—116. [PMID: 30236838](#)
- Saghiri M.A., Asatourian A., Garcia-Godoy F., Sheibani N. A new era considering inorganic trace elements and biological activity of dental biomaterials (angiogenic activity). — *Acta Biomater Odontol Scand.* — 2016; 2 (1): 93—94. [PMID: 28642917](#)
- Chen Z., Chen Y., Wang Y., Deng J., Wang X., Wang Q., Liu Y., Ding J., Yu L. Polyetheretherketone implants with hierarchical porous structure for boosted osseointegration. — *Biomater Res.* — 2023; 27 (1): 61. [PMID: 37370127](#)