

Текстурный анализ цифровых изображений кожи для оценки выраженности клинических проявлений дерматозов

© Ю.И. Сурков^{1,2}, И.А. Серебрякова^{1,2}, М.Е. Лобанов¹, М.С. Савельева¹, Э.А. Генина², В.В. Тучин^{1,2,3}, Ю.И. Свенская¹

¹ Научный медицинский центр, Саратовский национальный исследовательский государственный университет, Саратов, Россия

² Институт физики, Саратовский национальный исследовательский государственный университет, Саратов, Россия

³ Институт проблем точной механики и управления, ФИЦ «Саратовский научный центр РАН», Саратов, Россия

e-mail: surkov9898@gmail.com; svenskaya@info.sgu.ru

Поступила в редакцию 21.11.2025 г.

В окончательной редакции 12.01.2026 г.

Принята к публикации 27.03.2026 г.

Предложен метод количественного анализа клинической выраженности поражений кожи на основе цифровых RGB-изображений патологического очага. На примере модели имиквимод-индуцированного псориазоподобного дерматита у лабораторных крыс разработан и апробирован подход к объективной оценке степени тяжести дерматоза с использованием текстурных признаков и сопоставлением полученного интегрального индекса с общим клиническим индексом, отражающим морфологические изменения в коже. Пораженные участки в течение шести дней формирования модельной патологии ежедневно регистрировались с помощью стандартной цифровой камеры при фиксированных условиях съемки, а также визуально оценивались с использованием стандартной бальной системы для оценки тяжести псориаза PASI. Для подтверждения развития псориазоподобного дерматита также было выполнено гистологическое исследование. Для количественного описания изображений вычислялись 87 текстурных признаков (первого и второго порядков, включая характеристики Харалика). На основе корреляционного анализа выделены шесть наиболее информативных признаков, по которым с использованием анализа главных компонент рассчитан интегральный индекс (первая главная компонента, PC1). Установлена корреляция между PC1 и суммарным баллом PASI ($r = -0.82$). Полученные результаты свидетельствуют о том, что текстурный анализ стандартных RGB-изображений может служить основой для объективной и воспроизводимой количественной оценки тяжести псориазоподобного дерматита в доклинических и клинических исследованиях.

Ключевые слова: текстурный анализ, индекс тяжести псориаза, PASI, автоматизация диагностики, воспалительные заболевания кожи, дерматология.

DOI: 10.61011/OS.2026.05.63347.64-25

Введение

Заболевания кожи, несмотря на постоянно совершенствующиеся методы их диагностики и лечения, остаются широко распространенными среди мирового населения. Согласно данным последнего государственного доклада Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, в 2024 г. в структуре заболеваемости всего населения России, ассоциированной с неудовлетворительным качеством питьевой воды, болезни кожи и подкожной клетчатки занимали третье место по абсолютному числу дополнительных случаев 13 % (184100 случаев), причем в структуре заболеваемости детского населения данный класс болезней занимал второе место — 18,9 % (93300 случаев) [1]. В мире кожные заболевания являются четвертой по распространенности причиной всех болезней человека, затрагивая почти треть всего населения [2].

Согласно библиометрическому анализу мировой дерматологической литературы, в структуре кожных заболеваний на долю атопического дерматита и псориаза

приходится наибольший процент глобального бремени болезней (22 % и 11 % соответственно) [3]. Гетерогенность патогенетических механизмов развития заболевания, широкий спектр триггеров, социальная значимость заболевания, разнообразие клинических форм, большие площади поражения, вовлечения в процесс функциональных и проблемных зон, резистентность к проводимой терапии в ряде случаев, низкая комплаентность пациентов к проводимой терапии на амбулаторном этапе — основания для оптимизации терапии псориаза и атопического дерматита [4,5].

Важную роль как в изучении патогенеза таких мультифакториальных дерматозов, так и в исследовании новых подходов к их терапии, играют различные неинвазивные методы мониторинга состояния кожного покрова, в число которых входят измерение трансэпидермальной потери воды [6], спектроскопия диффузного отражения [7], оптическая когерентная томография [6], спектроскопия комбинационного рассеяния [8], оптоакустическая мезоскопия [9] и т.д. [10]. Применение данных методов позволяет в динамике оценивать барьерную функцию

кожи, выраженность воспаления, степень васкуляризации и ремоделирования дермального матрикса, а также ответ на проводимую терапию. Внедрение методов биофотоники в дерматологическую практику существенно расширило набор объективных биомаркеров состояния кожи, уменьшив зависимость клинических решений от субъективной визуальной оценки врача [11–13]. Быстрый рост объемов цифровых данных, получаемых при использовании указанных методов визуализации, требует разработки стандартизированных алгоритмов математической обработки изображений, направленных на автоматизированное выделение информативных признаков и формирование интегральных количественных индексов для оценки тяжести кожных заболеваний. Одним из перспективных направлений в этом контексте является текстурный анализ цифровых изображений кожи [14–16], позволяющий количественно описывать пространственную неоднородность распределения яркости и оптической плотности, ассоциированную с воспалением, нарушением процессов кератинизации и ремоделированием сосудистого русла. Использование подобных подходов открывает возможности для повышения объективности мониторинга течения дерматозов и автоматизированной оценки эффективности терапии, а в перспективе — для интеграции методов машинного обучения и персонализированных прогностических моделей в рутинную дерматологическую практику.

Несмотря на широкое внедрение различных методов оптической визуализации и спектроскопии в рутинную клиническую практику, базовым и наиболее устоявшимся подходом к оценке тяжести кожных заболеваний является применение балльных систем. Визуальная оценка с помощью специальных индексов, разработанных международным медицинским сообществом, является „золотым стандартом“ определения тяжести дерматозов: например, индекс SCORAD (scoring of atopic dermatitis), применяемый для оценки степени тяжести атопического дерматита [17], или индекс PASI (psoriasis area and severity index) для оценки тяжести псориатических поражений кожи [18]. Однако тот факт, что выставление баллов в данном случае выполняется квалифицированными клиницистами, не исключает субъективности такой оценки.

Бурное развитие биомедицины и вытекающее из него расширение линейки лекарственных препаратов, находящихся на разных фазах клинических исследований, диктует необходимость обеспечения единообразия условий тестирования разрабатываемых фармацевтических субстанций. Немалую роль в решении данной задачи играет повышение объективности оценки тяжести дерматозов при исследовании терапевтической эффективности новых дерматологических препаратов. В этой связи перспективным представляется применение методов фотометрии и текстурного анализа цифровых изображений [14–16]. Отдельный класс таких подходов основан на анализе обычных клинических фотографий. В отличие от высокотехнологических методов визуализации, таких,

как оптическая когерентная томография или оптоакустическая мезоскопия, текстурный анализ цифровых изображений не требует специализированного дорогостоящего оборудования и может быть реализован на основе стандартных цифровых камер или даже смартфонов [19]. Это делает его наиболее доступным инструментом рутинной клинической практики и масштабных многоцентровых исследований [20], в том числе на этапах клинических испытаний.

Целью настоящего исследования явились разработка и экспериментальная апробация подхода к количественной оценке тяжести псориазоподобного дерматита на модели имиквимод-индуцированного поражения кожи у лабораторных крыс на основе текстурного анализа цифровых RGB-изображений. Для достижения этой цели выполнены извлечение и отбор информативных текстурных признаков с последующим построением интегрального индекса на основе метода главных компонент и сопоставлением его динамики с суммарным клиническим индексом PASI.

Материалы и методы

Лабораторные животные

Все экспериментальные процедуры выполнены с использованием аутбредных крыс-альбиносов. Возраст животных к началу эксперимента составлял 5 месяцев, масса — 300 ± 25 г. Исследования проводили на базе vivария Центра коллективного пользования Саратовского государственного медицинского университета (СГМУ) им. В.И. Разумовского Минздрава России. Животных использовали в соответствии с принципами Хельсинской декларации о гуманном отношении к животным. Все манипуляции с животными производили в строгом соответствии с протоколом исследования, одобренным Этическим комитетом СГМУ (протокол № 8 от 04.02.2025 г.).

В исследовании участвовало 20 лабораторных крыс с индуцированным модельным дерматитом и 2 крысы без патологии (контрольные). Животных содержали в индивидуальных клетках в контролируемых условиях окружающей среды (при $20\text{--}26^\circ\text{C}$) с поддержанием 12-часового цикла освещения. Еду и воду животные получали *ad libitum*.

Формирование экспериментальной модели дерматологического заболевания

В исследовании использовали модель псориазоподобного поражения кожи. В качестве индуктора патологии применяли иммуномодулятор имиквимод (имихимод). За день до формирования экспериментальных очагов осуществляли сбривание волос с поверхности спины лабораторных животных триммером без повреждения целостности кожного покрова. Формирование экспериментальной патологии выполняли путем топического

нанесения крема Кераворт (Glenmark, Индия), содержащего 5% имиквимода, на участок спины крысы согласно стандартному протоколу [21]. А именно на экспериментальный участок кожи площадью примерно 16 cm^2 ($4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$), в течение 5 дней ежедневно наносили 125 mg крема Кераворт, дожидаясь полного впитывания.

Выбор имиквимод-индуцированной модели обусловлен ее способностью воспроизводить основные внешние и морфологические проявления бляшечного псориаза человека, включая эритему, шелушение и утолщение эпидермиса, а также характерные гистологические изменения в виде акантоза, паракератоза и выраженной воспалительной инфильтрации, связанной с активацией оси IL-23/IL-17 [22]. Следует отметить, что данная модель относится к острым воспалительным моделям и не отражает в полной мере хроническое рецидивирующее течение псориаза у человека. Однако она идеально подходит для разработки алгоритмов анализа цифровых изображений кожи с целью оценки выраженности внешних дерматологических признаков псориаза.

Мониторинг формирования патологии и оценка выраженности ее клинических проявлений

Визуальную оценку степени тяжести имиквимод-индуцированного псориазоподобного поражения кожи выполняли с помощью адаптированного для животных индекса площади и тяжести псориаза (PASI). Осмотр животных проводили перед первым нанесением индуктора патологии и далее ежедневно в течение 6 дней. Согласно общепринятым протоколам [23], оценку протекания патологического процесса выполняли по степени эритемы (erythema), шелушения (scaling) и огрубения (induration) пораженного участка кожи спины крыс по шкале от 0 до 4, где 0 — отсутствие проявления признака (норма), 1 — легкое проявление, 2 — умеренное, 3 — выраженное, 4 — сильно выраженное. Оценку площади пораженного участка кожи в данном случае не проводили, поскольку область патологии была фиксированной и определялась площадью области нанесения имиквимода.

С целью повышения точности и объективности оценки выставление баллов проводилось двумя независимыми экспертами, после этого рассчитывали средний балл. В результате суммирования баллов эритемы, шелушения и огрубения далее получали суммарные баллы (cumulative scores), иллюстрирующие совокупную степень тяжести протекания псориазоподобного дерматита. Согласованность оценок двух экспертов дополнительно оценивали с использованием коэффициента взвешенной капли Коэна для порядковой шкалы 0–4 (по каждому признаку отдельно).

Также осуществляли ежедневную фотофиксацию пораженного участка кожи лабораторных животных с помощью цифровой 8-битной RGB-камеры. Цифровые изображения получали при фиксированных условиях: камера устанавливалась на штативе, расстояние до объекта

и угол съемки поддерживались постоянными, использовалось стабильное освещение. Съемку проводили в ручном режиме (фиксированные ISO/выдержка/диафрагма, отключены автоэкспозиция и автоматический баланс белого), что снижало междневную вариабельность яркостных характеристик изображений и позволяло отказаться от цветовой калибровки. Далее с помощью специально разработанного программного обеспечения на языке Python выполняли текстурный анализ полученных изображений. Для анализа формировали область интереса (ROI), соответствующую зоне нанесения имиквимода. Область ROI выделяли полуавтоматически — фиксированный квадрат $3 \times 3 \text{ cm}$, позиционирование которого выполняли по анатомическим ориентирам таким образом, чтобы в него попадал участок кожи, соответствующий зоне нанесения индуктора дерматита. Для оценки текстурных характеристик патологического участка проводили разделение изображения на три цветовых канала: красный (R), зелёный (G) и синий (B). Для каждого канала вычисляли статистические признаки второго порядка, основанные на матрице совместной встречаемости градаций серого (GLCM), рассчитанной для пяти межпиксельных расстояний ($d = 1, 5, 9, 15, 29$ пикселей) и четырёх углов ($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$). Матрицу GLCM строили для области интереса как матрицу $P(i, j, d, \theta)$, элементы которой равны числу пар пикселей с уровнями яркости i и j , разделенных вектором смещения, задаваемым межпиксельным расстоянием d и направлением θ . Перед извлечением признаков матрицы выполняли нормировку (переход к вероятностям) и усреднение по четырём направлениям ($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$), чтобы снизить зависимость от ориентации текстуры, поскольку кожные структуры не имеют выделенного предпочтительного направления. Из усредненных GLCM извлекали следующие текстурные характеристики: контраст (contrast), несходство (dissimilarity), однородность (homogeneity), энергию (energy) и корреляцию (correlation). Кроме того, для каждого канала в области патологии рассчитывали дополнительные статистические характеристики первого порядка, такие, как среднее значение яркости (mean), стандартное отклонение (std), куртозис (kurtosis) и асимметрия распределения яркости (skewness).

Набор межпиксельных расстояний $d = 1, 5, 9, 15, 29$ выбирали для анализа текстуры на нескольких пространственных масштабах: малые d отражали микронеднородности (шероховатость, мелкое шелушение), большие — макроструктурные изменения (скопления чешуек/корок, крупномасштабная пятнистость яркости). Размер одного пикселя, определенный по калибровочному объекту, составлял $77 \mu\text{m}$. Таким образом, были проанализированы текстуры масштабом от нескольких сотен микрометров до 2 mm. Такой выбор обеспечивал чувствительность признаков как к мелким, так и к крупным структурным изменениям кожи в ходе прогрессирования дерматита.

Таким образом, для каждого изображения был сформирован вектор текстурных признаков, количественно

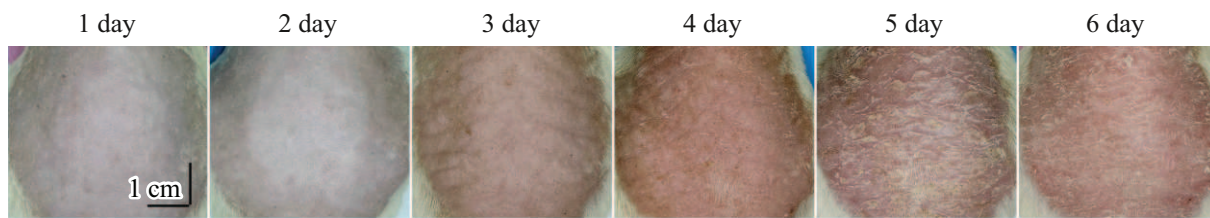


Рис. 1. Типичные фотографии спины лабораторной крысы из экспериментальной группы, отражающие динамику изменения очага псориазоподобного дерматита в процессе его формирования (1–6 дни).

описывающий структуру кожи в области патологии. Для снижения избыточности признакового пространства оценивали взаимную корреляцию между рассмотренными признаками. В результате параметры с коэффициентом корреляции Пирсона $|r| > 0.9$ исключали из дальнейшего анализа. Для выделения признаков, чувствительных к изменению состояния кожи при индуцировании дерматита, рассчитывали коэффициенты корреляции Пирсона между значениями текстурных характеристик и номером дня эксперимента (дни эксперимента 1–6). Признаки ранжировали по модулю коэффициента корреляции. Для анализа и визуализации динамики изменения текстурных характеристик далее применяли метод главных компонент (PCA, principal component analysis). При описании вариации данных на основании результатов PCA использовали две первые главные компоненты. В завершение с целью оценки чувствительности текстурных характеристик к развитию дерматита рассчитывали коэффициенты корреляции между двумя главными компонентами и суммарным индексом PASI.

Гистологическое исследование

С целью верификации формирования очагов псориазоподобного дерматита на шестой день исследования выполняли отбор биоптата кожи из экспериментальных (животные с моделью дерматита) и контрольных (животные без патологии) областей для последующего гистологического анализа. При заборе биопсийного материала животных подвергали предварительной анестезии с использованием смеси препаратов золетил (Virbac, Франция) и ксиланит (Нита-Фарм, Россия) путем однократной инъекции в бедренную мышцу. После отбора биоптата осуществляли фиксацию с помощью 10%-раствора формалина, а затем выполняли этапы гистологической проводки, пропитывания парафином и нарезки при помощи микротомы. Полученные срезы окрашивали гематоксилином и эозином и визуализировали с использованием микроскопа Olympus IX73 (Olympus, Япония).

Результаты и обсуждение

Исследование выполняли на модели псориазоподобного поражения кожи. Псориаз является мультифакторальным дерматологическим заболеванием, характери-

зующимся высокой популяционной частотой, которая в среднем составляет 2–3% от общего количества населения планеты, а в некоторых регионах достигает 11% [24]. Многие аспекты патогенеза псориаза остаются малоизученными, однако его современное понимание указывает на нарушение иммунной регуляции Т-хелперов 17 как на причину гиперпролиферации и метаболической активации клеток эпидермиса, приводящих к появлению на коже красных пятен с серебристыми чешуйками [9,25]. Патогенез заболевания проявляется утолщением эпидермиса (акантоз), гиперкератозом и выраженной клеточной инфильтрацией воспалительного характера [26]. Кроме того, псориазная кожа характеризуется повышенной васкуляризацией и увеличением числа извилистых капилляров в верхних слоях дермы [9,26].

Отбор методики формирования модели псориазоподобного дерматита осуществляли на основе литературных данных, делая акцент на простоту, воспроизводимость и финансовую оправданность. В результате была выбрана модель имиквимод-индуцированного дерматита [22], предполагающая применение иммуномодулирующего крема с 5%-содержанием имиквимода (имихимода) в качестве индуктора патологии. Протокол формирования модели включает кожное нанесение такого крема один раз в день в течение не менее 5 дней. Согласно литературным данным, имиквимод является лигандом толл-подобных рецепторов (TLR7 и TLR8), активирующих продукцию провоспалительных цитокинов и хемокинов, что приводит к притоку клеток иммунного ответа к месту его нанесения [27]. Применение данного препарата приводит к увеличению толщины эпидермиса за счет гиперпролиферации кератиноцитов, а также к периваскулярной инфильтрации воспалительными клетками.

В нашем исследовании длительность формирования модели составляла 5 дней, длительность наблюдения — 6 дней. Результаты ежедневной фотофиксации, а также визуальной оценки с помощью индекса PASI, адаптированного для животных, представлены на рис. 1 и 2. Важно отметить, что уровень согласованности двух экспертов при оценке индексов PASI был высоким. Так, коэффициент взвешенной капшы Коэна для оценки эритемы (erythema) составил 0.96, шелушения (scaling) 0.97, огрубения (induration) 0.95 и cumulative scores 0.98.

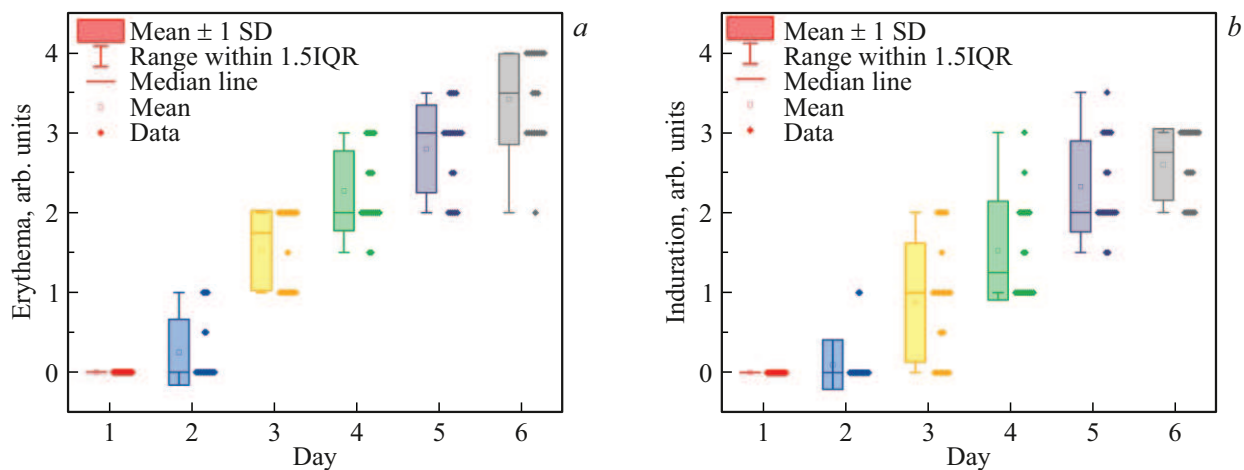


Рис. 2. Результаты визуальной оценки протекания патологического процесса с помощью индекса PASI, адаптированного для животных: степень эритемы (а), огрубения (b), шелушения (c) и суммарные баллы (d) для пораженного участка кожи спины крыс. Оценка выполнена по шкале от 0 до 4, где 0 — отсутствие проявления признака, 1 — легкое проявление, 2 — умеренное, 3 — выраженное, 4 — сильно выраженное.

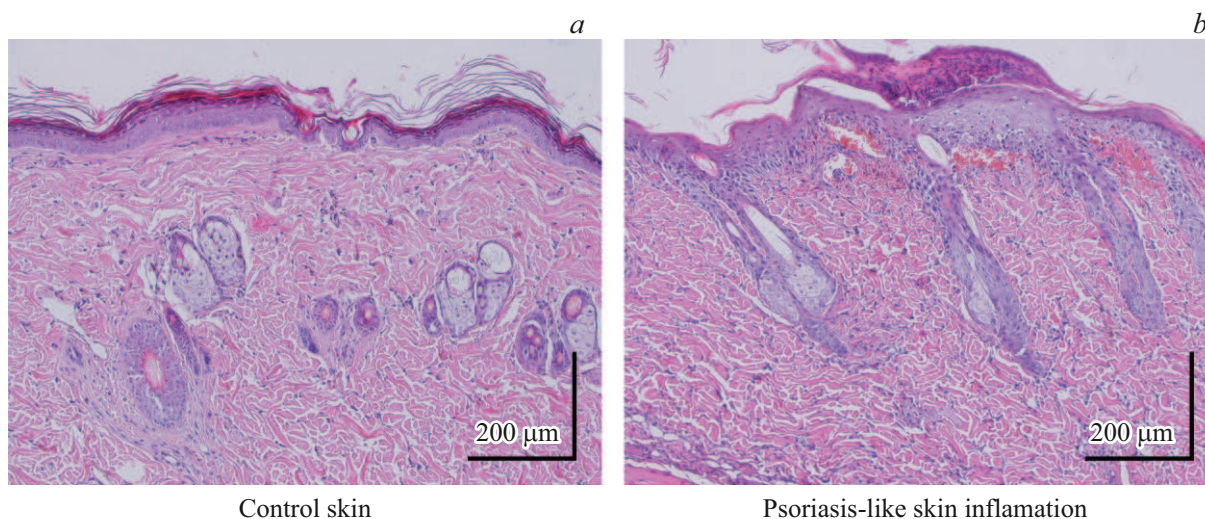


Рис. 3. Типичные микрофотографии гистологических препаратов биоптата кожи крыс из экспериментальной и контрольной групп.

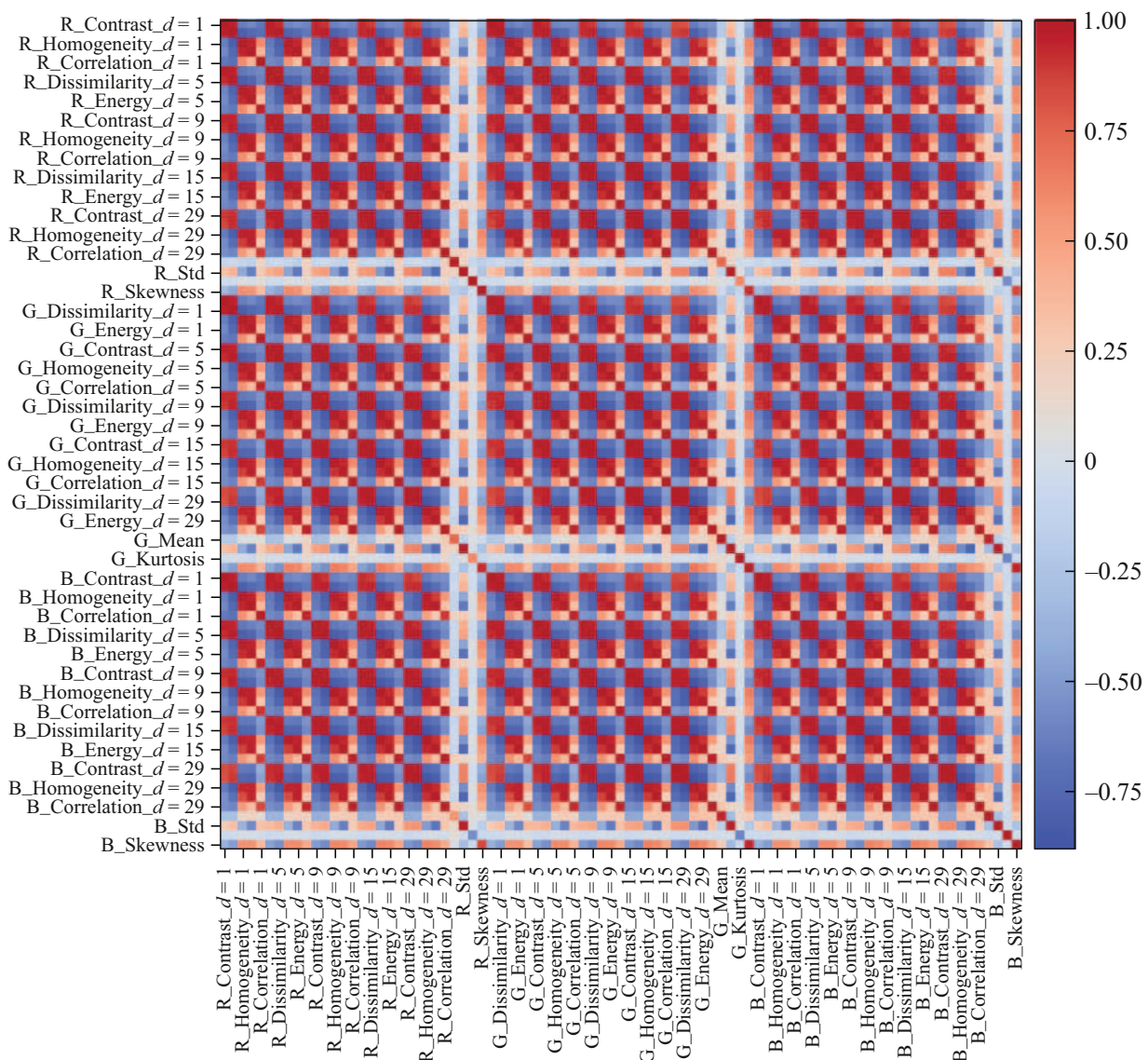


Рис. 4. Матрица взаимных коэффициентов корреляции текстурных признаков, рассчитанных по цифровым RGB-изображениям псориазоподобного поражения кожи. Обозначения: R, G, B — цветовые каналы; Contrast, Dissimilarity, Homogeneity, Energy, Correlation — признаки, вычисленные на основе матрицы совместной встречаемости уровней яркости (GLCM); d — межпиксельное расстояние ($d = 1, 5, 9, 15, 29$), использованное при расчете GLCM; Mean, Std, Kurtosis, Skewness — статистические параметры первого порядка в области интереса.

При наблюдении за животными в течение 6 дней после начала формирования модели псориазоподобного дерматита отмечали прогрессирование заболевания, сопровождаемое интенсификацией воспалительного процесса и нарастанием выраженности клинических признаков (эритемы, шелушения и огрубения) (рис. 1 и 2). Данные гистологического исследования биоптатов кожи, забранных у животных из экспериментальной группы на шестой день исследования (рис. 3), подтвердили факт формирования псориазоподобной модели при применении крема-индуктора с имиквимодом. Так, на микрофотографиях препаратов кожи крыс совершенно явно отмечали утолщение эпидермиса, а также выраженную

воспалительную инфильтрацию, являющиеся причиной наблюдаемого шелушения и огрубения кожи.

Для подтверждения результатов визуального осмотра был выполнен текстурный анализ полученных цифровых фотографий с помощью специально разработанного программного обеспечения на языке Python, позволивший количественно оценить изменения структуры кожи во времени. На рис. 4 представлена корреляционная матрица всех рассчитанных текстурных признаков ($n = 87$), полученных на основе цифровых RGB-изображений очага дерматита. Можно заметить, что значительная часть параметров образует группы с очень высокой взаимной корреляцией, что указывает на существенную

избыточность исходного признакового пространства. На основании анализа корреляционной матрицы выполняли отбор независимых текстурных признаков. Из дальнейшего рассмотрения исключали параметры с высокой взаимной корреляцией (коэффициент корреляции Пирсона по модулю $|r| > 0.9$). Затем для каждого признака рассчитывали коэффициент корреляции Пирсона с номером дня эксперимента (1–6 дни после начала формирования псориазоподобного дерматита). В результате из 87 исходных текстурных параметров было отобрано 6 наиболее информативных признаков, чувствительных к изменениям состояния кожи при развитии дерматита (рис. 5).

На рис. 5 представлены коэффициенты корреляции Пирсона между отобранными текстурными признаками и номером дня прогрессирования дерматоза. Наиболее выраженную зависимость от времени демонстрируют, в частности, признаки $G_Dissimilarity_d = 29$ и G_Std , а также параметры синего канала $B_Homogeneity_d = 29$, $B_Correlation_d = 29$, B_Mean и $B_Skewness$, что указывает на высокую чувствительность данных текстурных характеристик и распределения яркости в зеленом и синем каналах к структурным изменениям кожи. Отобранные признаки отражают мультифакторные изменения структуры и оптического отклика кожи при развитии дерматита. Физическая интерпретация отобранных признаков согласуется с морфологией развивающегося воспалительного поражения. Изменения параметров, отражающих неоднородность (например, рост Std и $Dissimilarity$ и снижение $homogeneity/correlation$), соответствует появлению и нарастанию шелушения и изменений микрорельефа, приводящих к чередованию участков различной яркости и локальной тени. Признаки, вычисленные при больших d , являются более чувствительными к крупномасштабным структурам (скопления чешуек), тогда как малые d преимущественно отражают мелкозернистую текстуру и оказались менее диагностически значимыми. Изменения в синем канале (например, B_Mean , $B_Skewness$) ассоциированы с увеличением поглощения света в поверхностных слоях кожи по мере развития эритемы, что меняет распределение яркости в ROI.

Для наглядной оценки динамики текстурных характеристик в координатах главных компонент были построены диаграммы распределения значений первой и второй главных компонент ($PC1$ и $PC2$) по дням эксперимента (рис. 6). Первая главная компонента ($PC1$) объясняет 69.5% общей дисперсии признаков и, таким образом, отражает основное направление изменения текстуры кожи при развитии псориазоподобного дерматита. Вторая главная компонента ($PC2$), на долю которой приходится 17.1% дисперсии, характеризует дополнительные, менее выраженные вариации текстуры. Распределения значений $PC2$ по дням частично перекрываются, однако также отражают временные изменения структуры кожи и внутригрупповую вариабельность. Значения $PC1$ демонстрируют выраженную монотонную тенденцию к снижению

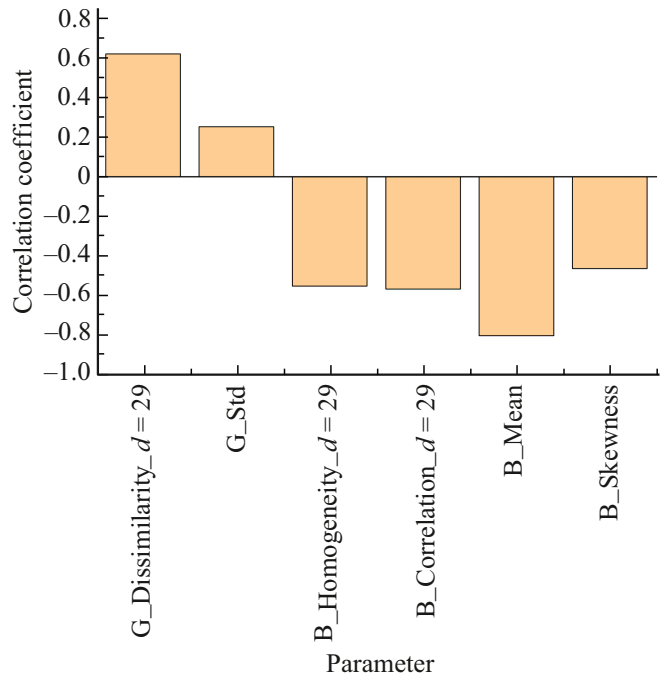


Рис. 5. Коэффициенты корреляции Пирсона между отобранными текстурными признаками, рассчитанными по цифровым RGB-изображениям, и номером дня прогрессирования дерматита (1–6 дни). Показаны признаки, сохранившиеся после исключения параметров с высокой взаимной корреляцией.

с первого по шестой дни исследования: на ранних сроках (1–2 дни) медианные значения $PC1$ положительны и существенно выше, тогда как к четвертому–шестому дням распределение смещается в область отрицательных значений. Это указывает на последовательное изменение совокупности текстурных параметров по мере прогрессирования воспалительного процесса в коже.

Сопоставление динамики клинических баллов PASI (рис. 2) с изменениями главных компонент текстурных признаков (рис. 6) показывает качественно сходную динамику: рост частных и суммарного PASI-баллов сопровождается уменьшением значений первой главной компоненты $PC1$, которая объясняет основную долю дисперсии признаков. На ранних сроках (1–2 дни) высокие значения $PC1$ соответствуют минимальным клиническим баллам, тогда как на поздних сроках (5–6 дни) наблюдаются максимальные значения суммарного PASI на фоне минимальных значений $PC1$. Это указывает на то, что первая главная компонента, рассчитанная по текстурным параметрам, отражает тяжесть дерматита, согласующуюся с клинической оценкой индекса PASI.

Для количественной оценки согласованности текстурного анализа с клинической оценкой тяжести дерматита была рассмотрена зависимость первой главной компоненты $PC1$ от суммарного балла по PASI и рассчитаны коэффициенты линейной корреляции Пирсона (рис. 7). Диаграмма рассеяния (рис. 7, а) демонстрирует выраженное уменьшение значений $PC1$ по мере роста

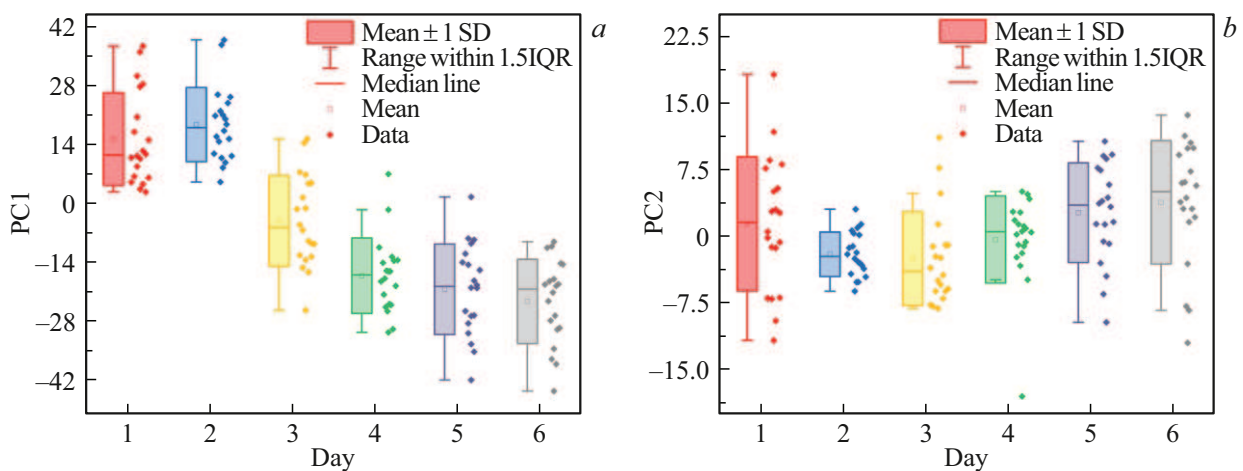


Рис. 6. Распределение значений первой (а) и второй (b) главных компонент (PC1 и PC2, объясняющих 69.5% и 17.1% общей дисперсии соответственно) по дням развития псориазоподобного дерматита, рассчитанное по данным текстурного анализа цифровых RGB-изображений.

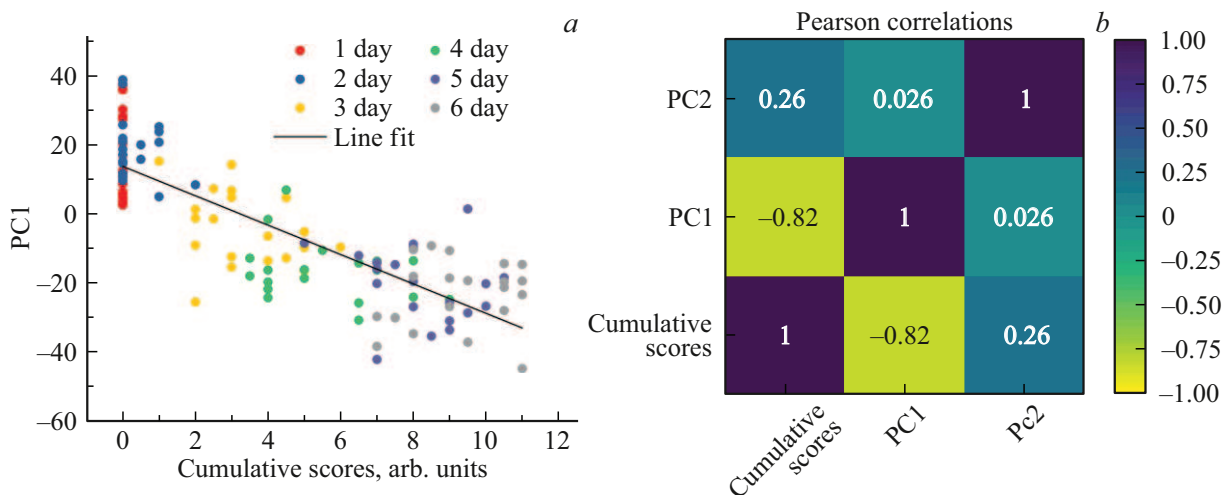


Рис. 7. Связь главных компонент текстурных признаков с суммарными баллами для индекса PASI в очаге псориазоподобного поражения кожи: а — диаграмма рассеяния значений первой главной компоненты (PC1, 69.5% общей дисперсии) в зависимости от суммарного PASI-балла, цветом обозначены дни наблюдения (1–6 дни), сплошная линия — результат линейной аппроксимации; б — матрица коэффициентов корреляции Пирсона между суммарным PASI-баллом, PC1 и PC2.

суммарного PASI-балла: облако точек вытянуто вдоль нисходящей аппроксимирующей прямой. Цветовое кодирование по дням наблюдения (1–6 дни) показывает, что ранние сроки соответствуют высоким значениям PC1 и минимальным клиническим баллам, тогда как поздние сроки — низким значениям PC1 и максимальным PASI-баллам. Матрица корреляции (рис. 7, б) подтверждает наличие сильной связи между PC1 и суммарным клиническим индексом ($r = -0.82$, $p < 0.0001$). Вторая главная компонента PC2, напротив, демонстрирует умеренную положительную корреляцию с PASI ($r = 0.26$, $p = 0.004$) и практически не связана с PC1 ($r = 0.026$, $p = 0.77$). Это указывает на то, что PC1 отражает основное направление вариаций текстурных признаков, ассоциированное с тяжестью дерматита, тогда как PC2

описывает дополнительные индивидуальные характеристики структуры кожи.

Выводы

В настоящей работе на модели имиквимод-индуцированного псориазоподобного дерматита у лабораторных крыс продемонстрирована возможность количественной оценки выраженности клинических проявлений дерматоза на основе текстурного анализа цифровых RGB-изображений кожи. Отобранные шесть текстурных признаков оказались чувствительны к динамике развития воспалительного процесса в коже и показали хорошее соответствие с изменением суммарного клинического балла PASI ($r = -0.82$), что свидетельствует о потен-

циальной пригодности предлагаемого подхода для повышения объективности визуальной оценки тяжести псориаза. Подход на основе текстурных признаков может быть адаптирован к другим воспалительным дерматозам, однако для каждого нозологического типа требуется отдельная валидация, а также проверка устойчивости признаков к условиям съемки и клинической вариабельности.

В нашей работе применение метода главных компонент к набору информативных текстурных характеристик позволило получить интегральный индекс, монотонно изменяющийся по мере развития патологического процесса. Полученные результаты указывают на перспективность интеграции цифрового анализа клинических изображений с современными оптическими методами визуализации в единую мультипараметрическую систему мониторинга состояния кожи, пригодную для стандартизированной оценки терапевтической эффективности новых дерматологических препаратов как в доклинических, так и в клинических исследованиях.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Н.А. Шушуновой и А.Б. Бучарской за помощь в подготовке лабораторных животных к эксперименту.

Финансирование работы

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-73-10194-П).

Соблюдение этических стандартов

Все исследования с участием лабораторных животных выполнены в соответствии с принципами Хельсинкской декларации о гуманном отношении к животным, а также в строгом соответствии с протоколом исследования, одобренным Этическим комитетом СГМУ (протокол № 8 от 04.02.2025).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. Государственный доклад О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2024 г. (М., 2025). [Электронный ресурс]. URL: https://www.rosпотребнадzor.ru/upload/iblock/b8a/u6lsxjabw032jkd837nlaezxu3ue09m/GD_SEB.pdf?ysclid=mob5to0hys264808921
- [2] C. Flohr, R. Hay. Br. J. Dermatol., **184** (2), 189 (2021). DOI: 10.1111/bjd.19704
- [3] K.J. Pulsipher, M.D. Szeto, C.W. Rundle, C.L. Presley, M.R. Laughter, R.P. Dellavalle. JMIR Dermatology, **4** (2), e29282 (2021). DOI: 10.2196/29282
- [4] A.L. Bakulev, E.E. Talnikova. Curr. Pediatr., **19** (6), 496 (2020). DOI: 10.15690/vsp.v19i6.2150
- [5] W.-H. Boehncke. Rheum. Dis. Clin. North Am., **41** (4), 665 (2015). DOI: 10.1016/j.rdc.2015.07.013
- [6] D. Winkler, T. Eyssele, A. Glanzer, H. Wirsching, E. Klein, J. Welzel, S. Schuh. JDDG, **23** (11), 1430 (2025). DOI: 10.1111/ddg.15980
- [7] D.A. Davydov, G.S. Budylin, A.V. Baev, D.V. Vaypan, E.M. Seredenina, S.T. Matskeplishvili, S.A. Evlashin, A.A. Kamalov, E.A. Shirshin. J. Biomed. Opt., **28** (5), 057002 (2023). DOI: 10.1117/1.JBO.28.5.057002
- [8] M. Zolotas, J. Schleusener, J. Lademann, M.C. Meinke, G. Kokolakis, M.E. Darwin. Int. J. Mol. Sci., **24** (19), 14636 (2023). DOI: 10.3390/ijms241914636
- [9] J. Aguirre, M. Schwarz, N. Garzorz, M. Omar, A. Buehler, K. Eyerich, V. Ntziachristos. Nat. Biomed. Eng., **1** (5), 0068 (2017). DOI: 10.1038/s41551-017-0068
- [10] O. Yélamos, B. Alejo, S.S. Ertekin, L. Villa-Crespo, S. Zamora-Barquero, N. Martinez, M. Domínguez, P. Iglesias, A. Herrero, J. Malvey, S. Puig. J. Eur. Acad. Dermatology Venereol., **35** (1), 143 (2021). DOI: 10.1111/jdv.16559
- [11] Е.Н. Римская, А.О. Щадко, И.А. Аполлонова, А.П. Николаев, А.Н. Брико, И.А. Дешин, П.Ю. Бережной, К.Г. Кудрин, К.И. Зайцев, В.В. Тучин, И.В. Решетов. Опт. и спектр., **126** (5), 584 (2019). [E.N. Rimskaya, A.O. Schadko, I.A. Apollonova, A.P. Nikolaev, A.N. Briko, I.A. Deshin, P.U. Bereshnoy, K.G. Kudrin, K.I. Zaytsev, V.V. Tuchin, I.V. Reshetov. Opt. Spectrosc., **126** (5), 503 (2019). DOI: 10.1134/S0030400X19050230].
- [12] С.Н. Шельгина, Е.Н. Римская, А.Б. Тимурзиева, И.Н. Сараева, К.Г. Кудрин, А.Е. Рупасов, А.А. Настулявичус. Опт. и спектр., **132** (1), 88 (2024). DOI: 10.61011/OS.2024.01.57556.14-24
- [13] К.Г. Кудрин, Е.Н. Римская, И.А. Аполлонова, А.П. Николаев, Н.В. Черномырдин, Д.С. Святославов, Д.В. Давыдов, И.В. Решетов. Опт. и спектр., **128** (6), 820 (2020). [K.G. Kudrin, E.N. Rimskaya, I.A. Apollonova, A.P. Nikolaev, N.V. Chernomyrdin, D.S. Svyatoslavov, D.V. Davydov, I.V. Reshetov. Opt. Spectrosc., **128** (6), 824 (2020). DOI: 10.1134/S0030400X20060132].
- [14] V.R. Balaji, S.T. Suganthi, R. Rajadevi, V. Krishna Kumar, B. Saravana Balaji, S. Pandiyan. Measurement, **163**, 107922 (2020). DOI: 10.1016/j.measurement.2020.107922
- [15] L. Wei, Q. Gan, T. Ji. Comput. Math. Methods Med., **2018** (1), 8145713 (2018). DOI: 10.1155/2018/8145713
- [16] A. Medela, T. Mac Carthy, S.A. Aguilar Robles, C.M. Chiesa-Estomba, R. Grimalt. JID Innov., **2** (3), 100107 (2022). DOI: 10.1016/j.xjidi.2022.100107
- [17] J. Schmitt, S. Langan, S. Deckert, A. Svensson, L. von Kobyletzki, K. Thomas, P. Spuls. J. Allergy Clin. Immunol., **132** (6), 1337 (2013). DOI: 10.1016/j.jaci.2013.07.008
- [18] E. Puzenat, V. Bronsard, S. Prey, P. Gourraud, S. Aractingi, M. Bagot, B. Cribier, P. Joly, D. Jullien, M. Le Maitre, C. Paul, M.-A. Richard-Lallemand, J.-P. Ortonne, F. Aubin. J. Eur. Acad. Dermatology Venereol., **24**, 10 (2010). DOI: 10.1111/j.1468-3083.2009.03562.x
- [19] Z. Ali, K.M. Joergensen, A.D. Andersen, A. Chiriac, T. Bjerre-Christensen, I. Manole, A.-M. Dutei, I. Deaconescu, A. Suru,

- A. Serban, J.R. Zibert. *JMIR Form. Res.*, **5** (5), e24766 (2021). DOI: 10.2196/24766
- [20] H. Dumbuya, Z.D. Draclos, E. Cassar, C. Peucat, C. Le Floch, K. Podimatis. *J. Drugs Dermatol.*, **23** (7), 557 (2024). DOI: 10.36849/JDD.8371
- [21] A. Smajlović, A. Haverić, A. Alić, M. Hadžić, A. Smajlović, I. Mujezinović, N. Lojo-Kadrić, J. Ramić, N. Elez-Burnjaković, S. Haverić, L. Pojskić. *Mol. Biol. Rep.*, **48** (5), 4295 (2021). DOI: 10.1007/s11033-021-06445-3
- [22] L. van der Fits, S. Mourits, J.S.A. Voerman, M. Kant, L. Boon, J.D. Laman, F. Cornelissen, A.-M. Mus, E. Florencia, E.P. Prens, E. Lubberts. *J. Immunol.*, **182** (9), 5836 (2009). DOI: 10.4049/jimmunol.0802999
- [23] Y. Manchanda, A. De, S. Das, D. Chakraborty. *Indian J. Dermatol.*, **68** (3), 278 (2023). DOI: 10.4103/ij.d.ij.d_420_23
- [24] A.A. Kubanov, E.E. Bogdanova. *Vestn. Dermatol. Venerol.*, **96** (5), 7 (2020). DOI: 10.25208/vdv1171-2020-96-5-07-18
- [25] W.-H. Boehncke, M.P. Schön. *Psoriasis. Lancet*, **386**, 983 (2015). DOI: 10.1016/S0140-6736(14)61909-7
- [26] F.O. Nestle, D.H. Kaplan, J. Barker, N. *Engl. J. Med.*, **361**, 496 (2009). DOI: 10.1056/NEJMra0804595
- [27] A.A. Zueva, K.L. Kryshen, M.N. Makarova, V.G. Makarov. *Transl. Med.*, **6** (4), 50 (2019). DOI: 10.18705/2311-4495-2019-6-4-50-58