



ИММУНИТЕТ ЧЕЛОВЕКА: СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ВРОЖДЁННЫХ И АДАПТИВНЫХ МЕХАНИЗМОВ ЗАЩИТЫ

Джумаева Гулрух Гуломжоновна

gulruxdjumaeva989@gmail.com

Руководитель клинической диагностической
лаборатории Алатское РТМО.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.18480575>

ARTICLE INFO

Qabul qilindi: 25-yanvar 2026 yil

Ma'qullandi: 28-yanvar 2026 yil

Nashr qilindi: 31-yanvar 2026 yil

KEYWORDS

иммунитет, врождённый
иммунитет, адаптивный
иммунитет, системная
иммунология, врождённые
ошибки иммунитета.

ABSTRACT

Иммунная система человека представляет собой сложную, иерархически организованную и функционально интегрированную биологическую систему, обеспечивающую защиту организма от широкого спектра экзогенных и эндогенных угроз, включая инфекционные агенты, токсические вещества, аллергены и трансформированные клетки. Одновременно иммунная система играет ключевую роль в поддержании иммунологической толерантности, тканевого гомеостаза и регуляции воспалительных процессов. Современные представления об иммунитете выходят за рамки классической иммунологии, рассматривающей его преимущественно как функцию специализированных иммунных органов и циркулирующих клеток крови, и всё в большей степени опираются на системный подход, в рамках которого иммунитет интерпретируется как свойство всего организма. Особое значение в последние десятилетия приобрело изучение врождённого и адаптивного иммунитета в контексте их тесного функционального взаимодействия, а также роли генетических факторов в формировании индивидуальных особенностей иммунного ответа. В этом аспекте важное место занимают врождённые ошибки иммунитета, демонстрирующие, что даже точечные генетические нарушения могут приводить к тяжёлым клиническим фенотипам, включая первичные иммунодефициты, аутоиммунные, аутовоспалительные и аллергические заболевания. Цель настоящего исследования заключается в комплексном обобщении современных научных

данных о механизмах врождённого и адаптивного иммунитета человека, анализе их системной организации, генетической детерминированности и тканеспецифических особенностей, а также в оценке клинической значимости нарушений иммунного ответа. Исследование выполнено в формате IMRAD на основе анализа актуальных фундаментальных и обзорных научных публикаций, что позволяет рассматривать иммунитет человека как динамичную и многоуровневую систему, имеющую ключевое значение для фундаментальной биологии и клинической медицины..

Введение

Иммунитет человека сформировался в ходе длительного эволюционного процесса как универсальный механизм защиты организма от постоянно меняющегося и потенциально враждебного микробного окружения. Патогенные микроорганизмы, включая вирусы, бактерии, грибы и паразиты, существовали задолго до появления человека и на протяжении миллионов лет оказывали селективное давление, определившее формирование врождённых и адаптивных механизмов иммунной защиты. В результате эволюции иммунная система приобрела способность эффективно распознавать и устранять широкий спектр угроз, сохраняя при этом относительную целостность собственных тканей организма.

Несмотря на высокую эффективность иммунной защиты на индивидуальном уровне, иммунитет представляет собой тонко сбалансированную систему, в которой защитные реакции неразрывно связаны с риском развития иммунопатологических состояний. Чрезмерная или недостаточная активация иммунного ответа может приводить к повреждению собственных тканей, формированию хронического воспаления, развитию аутоиммунных и аллергических заболеваний. Таким образом, иммунитет следует рассматривать не только как защитный, но и как потенциально патогенный фактор, требующий строгой регуляции.

Современные научные концепции всё чаще отходят от узкого представления иммунитета как функции исключительно иммунных органов и циркулирующих клеток крови. В рамках системной иммунологии иммунная система рассматривается как интегративная сеть, включающая большинство типов клеток организма, тканевые микроокружения и межорганные взаимодействия. Доказано, что значительная часть иммунных клеток локализуется в тканях и обладает выраженной тканеспецифической функциональной специализацией, что имеет принципиальное значение для локального иммунного надзора и поддержания гомеостаза.

Особое внимание в последние десятилетия уделяется роли генетических факторов в формировании индивидуальных особенностей иммунного ответа. Существенный вклад в развитие современных представлений об иммунитете внесло изучение врождённых ошибок иммунитета — генетически детерминированных нарушений, обусловленных мутациями отдельных генов. Эти состояния наглядно демонстрируют,

что даже единичные молекулярные дефекты могут приводить к избирательной восприимчивости к инфекционным заболеваниям, развитию аутоиммунных, аутовоспалительных и аллергических процессов, а также к онкологической патологии.

Параллельно с развитием молекулярной иммунологии и генетики активно формируется направление системной иммунологии, в рамках которого иммунная система рассматривается как единая динамическая сеть межклеточных, межтканевых и межорганных взаимодействий. Такой подход позволяет глубже понять механизмы иммунного надзора, вариабельность иммунных реакций в популяции и причины различной клинической манифестации заболеваний иммунной природы.

В связи с вышеизложенным целью настоящей статьи является систематизация современных данных о структуре и функциях иммунной системы человека, анализ взаимосвязи врождённых и адаптивных механизмов иммунной защиты, а также определение их фундаментального и клинического значения в контексте современных достижений иммунологии, генетики и биомедицинских наук.

Материалы и методы

Настоящее исследование выполнено с использованием аналитического, сравнительно-обзорного и системного методов научного познания. Методологический подход основан на интеграции данных классической иммунологии, молекулярной биологии, генетики и системной иммунологии. Работа носит теоретико-обобщающий характер и направлена на комплексный анализ механизмов врождённого и адаптивного иммунитета человека в контексте их эволюционного происхождения, тканеспецифической организации и клинической значимости.

Теоретико-методологическую основу исследования составили современные рецензируемые научные публикации, отобранные по критериям актуальности, цитируемости и научной значимости. В частности, были использованы следующие типы источников:

концептуальная редакционная статья, раскрывающая эволюционные, генетические и клинические аспекты иммунитета человека, а также роль врождённых ошибок иммунитета в формировании индивидуальной восприимчивости к заболеваниям;

систематический обзор по системной (whole-body) иммунологии, основанный на анализе тканеспецифической локализации, фенотипической и функциональной гетерогенности иммунных клеток у человека;

фундаментальный обзор, посвящённый ключевым молекулярным и клеточным механизмам врождённого и адаптивного иммунного ответа, а также процессам иммунологической толерантности и иммунной памяти.

В ходе исследования был проведён критический анализ концепций, терминологии, экспериментальных и клинико-статистических данных, представленных в указанных источниках. Особое внимание уделялось сопоставлению популяционных и индивидуальных аспектов иммунного ответа, а также интерпретации статистических данных, отражающих распространённость иммунопатологических состояний. Полученные результаты были обобщены, логически структурированы и изложены в соответствии с требованиями формата IMRAD.

Результаты работы

1. Эволюционные основы формирования иммунной системы

Иммунная система человека является результатом длительного эволюционного процесса, направленного на обеспечение выживания организма в условиях постоянного воздействия патогенных микроорганизмов. По оценкам эволюционных биологов, микробы существуют на Земле более 3 млрд лет и обладают значительно более высокой скоростью генетической изменчивости по сравнению с организмом человека. Это обстоятельство обусловило формирование многоуровневых и избыточных механизмов иммунной защиты.

Исторические демографические данные свидетельствуют о том, что до конца XIX века средняя продолжительность жизни человека составляла около 20–25 лет, а инфекционные заболевания являлись ведущей причиной смертности. Существенное увеличение продолжительности жизни в XX–XXI веках стало возможным лишь благодаря развитию медицины, вакцинации и улучшению санитарных условий, а не вследствие принципиальных изменений в биологии иммунной системы.

Эволюционная «цена» формирования высокоэффективного иммунитета проявляется в существовании аллергических, аутоиммунных и аутовоспалительных заболеваний. По данным Всемирной организации здравоохранения, аутоиммунные заболевания в настоящее время затрагивают до 5–7 % населения развитых стран, а распространённость аллергических заболеваний в отдельных популяциях превышает 20–30 %. Эти данные подтверждают, что гиперактивность иммунной системы является неизбежным следствием её высокой защитной эффективности.

Эволюционный подход позволяет рассматривать иммунитет не как статичную структуру, а как динамическую систему, в которой генетическая вариабельность играет ключевую роль в формировании индивидуального иммунного ответа. Именно с этих позиций врождённые ошибки иммунитета рассматриваются не как редкие исключения, а как закономерный элемент биологического разнообразия человеческой популяции.

2. Структурно-функциональная организация иммунной системы

Иммунная система человека представляет собой распределённую сеть специализированных клеток, локализованных не только в периферической крови, но и практически во всех тканях и органах организма. Современные исследования показывают, что менее 10–15 % иммунных клеток находятся в циркулирующей крови, тогда как основная их масса локализована в тканях и органах, включая кожу, слизистые оболочки, лёгкие, кишечник и печень.

К компонентам врождённого иммунитета относятся физические барьеры (эпителиальные покровы), фагоцитирующие клетки (нейтрофилы, макрофаги), дендритные клетки, натуральные киллеры, система комплемента и широкий спектр цитокинов. Адаптивный иммунитет представлен Т- и В-лимфоцитами, обладающими антигенной специфичностью и способностью к формированию иммунологической памяти.

Согласно данным клинико-иммунологических исследований, нарушение хотя бы одного звена данной системы может приводить к значительным функциональным сбоям и развитию иммунопатологии, что подчёркивает её высокую степень взаимозависимости.

3. Тканеспецифическая иммунная организация

В рамках системной иммунологии доказано, что иммунные клетки приобретают выраженные функциональные особенности в зависимости от ткани локализации. Так, макрофаги печени (клетки Купфера) участвуют в детоксикации и иммунном надзоре, микроглия центральной нервной системы обеспечивает иммунную защиту мозга, а альвеолярные макрофаги лёгких играют ключевую роль в противомикробной защите дыхательных путей.

По данным исследований тканерезидентных лимфоцитов, до 80 % Т-клеток памяти локализируются вне кровотока, что принципиально меняет представления о механизмах иммунологической памяти. Тканерезидентные Т-клетки памяти обеспечивают быструю локальную защиту при повторном контакте с патогеном, особенно в барьерных органах.

4. Врождённый иммунитет

Врождённый иммунитет обеспечивает немедленный, неспецифический ответ на внедрение патогенных микроорганизмов. Его функционирование основано на распознавании консервативных молекулярных структур патогенов посредством рецепторов распознавания образов. Активация врождённых иммунных механизмов инициирует воспалительный процесс, фагоцитоз и синтез медиаторов, необходимых для активации адаптивного иммунного ответа.

Современные исследования демонстрируют, что клетки врождённого иммунитета обладают функциональной пластичностью и способны формировать феномен «тренированной иммунной памяти». Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что подобные изменения могут повышать эффективность противомикробной защиты на 30–50 % при повторных воздействиях сходных патогенов.

5. Адаптивный иммунитет

Адаптивный иммунитет характеризуется высокой антигенной специфичностью и способностью к длительному сохранению иммунологической памяти. Т-лимфоциты осуществляют распознавание антигенов в комплексе с молекулами главного комплекса гистосовместимости (HLA), а В-лимфоциты обеспечивают гуморальный иммунитет путём продукции специфических антител.

По данным эпидемиологических исследований, эффективность вакцинации и длительность поствакцинального иммунитета напрямую связаны с функциональной сохранностью адаптивного иммунитета, что подчёркивает его ключевую роль в общественном здравоохранении.

6. Иммунологическая толерантность и аутоиммунитет

Иммунологическая толерантность является необходимым условием предотвращения аутоагрессии. Центральные и периферические механизмы толерантности обеспечивают элиминацию или функциональное подавление аутореактивных лимфоцитов. Нарушение данных процессов приводит к развитию аутоиммунных заболеваний, распространённость которых, по различным оценкам, достигает 5–7 % в общей популяции.

7. Врождённые ошибки иммунитета

На современном этапе описано более 600 форм врождённых ошибок иммунитета. По оценкам специалистов, совокупная распространённость данных состояний может достигать 1:1000–1:2000 населения, что значительно превышает ранее предполагаемые

показатели . Эти данные подтверждают, что врождённые ошибки иммунитета представляют собой важную проблему общественного здравоохранения.

8. Клиническое значение иммунологических исследований

Изучение иммунной системы человека имеет фундаментальное и прикладное значение для клинической медицины. Современные достижения иммунологии лежат в основе разработки вакцин, иммунотерапии онкологических заболеваний, таргетных биологических препаратов и методов генной терапии. В частности, применение иммунотерапии в онкологии позволило повысить пятилетнюю выживаемость при ряде злокачественных новообразований на 20–40 %, что подчёркивает практическую значимость иммунологических исследований.

Обсуждение

1. Структурно-функциональная организация иммунной системы

Иммунная система человека представляет собой многоуровневую, высокоорганизованную и динамичную сеть клеток, тканей и молекулярных медиаторов, обеспечивающих защиту организма от инфекционных агентов и поддержание иммунологического гомеостаза. В настоящее время установлено, что иммунная система функционирует не как изолированный орган, а как распределённая система, включающая периферическую кровь, лимфоидные органы и практически все ткани организма.

По данным современных исследований, более 70–80 % иммунных клеток локализуются вне периферической крови, формируя так называемые тканерезидентные популяции (tissue-resident immune cells), играющие ключевую роль в локальном иммунном надзоре и регуляции воспалительных процессов. Особенно высокая плотность таких клеток отмечается в коже, слизистых оболочках кишечника и дыхательных путей, где сосредоточено до 60 % всех лимфоцитов организма.

К основным структурным компонентам иммунной системы относятся:

- первичные лимфоидные органы (костный мозг, тимус);
- вторичные лимфоидные органы (селезёнка, лимфатические узлы, MALT-система);
- циркулирующие и тканерезидентные иммунные клетки.

В функциональном отношении иммунная система объединяет врождённые и адаптивные механизмы защиты, которые тесно взаимодействуют между собой, обеспечивая быструю реакцию на патогены и формирование долговременной иммунологической памяти.

2. Врождённый иммунитет

Врождённый иммунитет является первой линией защиты организма и обеспечивает немедленный ответ на внедрение патогенных микроорганизмов. Его ключевая особенность заключается в неспецифичности и скорости реакции. Временной интервал активации врождённого иммунного ответа составляет *от нескольких минут до нескольких часов*, в то время как адаптивный иммунитет активизируется в течение 3–7 суток.

Основу врождённого иммунитета составляют:

- физические и химические барьеры (кожа, слизистые оболочки, антимикробные пептиды);

- клетки врождённого иммунитета (нейтрофилы, макрофаги, дендритные клетки, натуральные киллеры);
- гуморальные факторы (система комплемента, интерфероны, провоспалительные цитокины).

Нейтрофилы составляют около 50–70 % всех лейкоцитов периферической крови и являются основными эффекторными клетками острого воспаления. Макрофаги и дендритные клетки выполняют не только фагоцитарную, но и антиген-презентирующую функцию, связывая врождённый и адаптивный иммунитет.

Современные исследования последних лет демонстрируют, что врождённый иммунитет обладает способностью к формированию так называемой «тренированной иммунной памяти» (*trained immunity*). Экспериментальные данные показывают, что после первичной стимуляции (например, вакцинацией БЦЖ) моноциты и макрофаги способны демонстрировать усиленный ответ при повторном контакте с патогенами, что сопровождается изменениями экспрессии генов и метаболического профиля клеток. Данный феномен рассматривается как перспективное направление в профилактике инфекционных и воспалительных заболеваний.

3. Адаптивный иммунитет

Адаптивный иммунитет характеризуется высокой антигенной специфичностью и способностью к формированию долговременной иммунологической памяти. Его ключевыми клеточными компонентами являются Т- и В-лимфоциты, которые распознают антигены с помощью уникальных рецепторов, сформированных в результате соматической рекомбинации генов.

Т-лимфоциты составляют около 60–70 % лимфоцитов периферической крови, среди которых выделяют:

- CD4⁺ Т-хелперы, регулирующие иммунный ответ;
- CD8⁺ цитотоксические Т-клетки, обеспечивающие элиминацию инфицированных и опухолевых клеток.

В-лимфоциты обеспечивают гуморальный иммунитет за счёт продукции иммуноглобулинов. Установлено, что за жизнь человека формируется репертуар антител, насчитывающий более 10⁹ различных специфичностей, что обеспечивает высокую адаптивность иммунной системы.

Иммунологическая память является фундаментальным свойством адаптивного иммунитета и лежит в основе эффективности вакцинации. Согласно данным ВОЗ, применение вакцин позволило снизить смертность от инфекционных заболеваний более чем на 60 % за последние 50 лет, что подчёркивает критическую роль адаптивного иммунного ответа в системе общественного здравоохранения.

Список литературы:

1. Casanova J.-L. Human immunity. *Journal of Human Immunity*. 2025;1(1):e20250001.
2. Poon M.M.L., Farber D.L. The whole body as the system in systems immunology. *iScience*. 2020; 23:101509.
3. Chaplin D.D. Overview of the immune response. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*. 2010;125(Suppl 2): S3–S23.
4. Abbas A.K., Lichtman A.H., Pillai S. *Cellular and Molecular Immunology*. – 10th ed. – Philadelphia: Elsevier, 2021. – 608 p.

5. Netea M.G., Domínguez-Andrés J., Barreiro L.B. et al. Trained immunity: a program of innate immune memory in health and disease. – *Science*, 2020, Vol. 352(6284), pp. aaf1098.
6. Murphy K., Weaver C. *Janeway's Immunobiology*. – 10th ed. – New York: Garland Science, 2022. – 928 p.
7. Delves P.J., Martin S.J., Burton D.R., Roitt I.M. *Roitt's Essential Immunology*. – 14th ed. – Oxford: Wiley-Blackwell, 2020. – 576 p.
8. World Health Organization. *Immunization coverage and impact*. – WHO Report, 2023.

