УДК: 616.981.21/958.7

СОВРЕМЕННЫЕ СТРАТЕГИИ ПРЕОДОЛЕНИЯ АНТИБИОТИКОРЕЗИСТЕНТНОСТИ

Ахмадходжаева Муножатхон Муталибжановна – к.м.н.
Андижанский государственный медицинский институт (Андижан, Узбекистан)

Аннотация. *В обзорной статье рассматриваются современные подходы к решению одной из наиболее острых проблем медицины — антибиотикорезистентности. Проанализированы основные механизмы формирования устойчивости микроорганизмов к антибактериальным препаратам и глобальные тенденции её распространения. Особое внимание уделено инновационным стратегиям преодоления резистентности: разработке комбинированных препаратов, фаготерапии, применению антимикробных пептидов, нанотехнологий и пробиотиков нового поколения. Рассмотрены международные программы контроля за рациональным использованием антибиотиков (ВОЗ, CDC) и перспективы внедрения персонализированной антибактериальной терапии. Подчёркивается необходимость междисциплинарного подхода и глобального сотрудничества в борьбе с устойчивыми инфекциями.*

Ключевые слова: *антибиотикорезистентность, фаготерапия, антимикробные пептиды, нанотехнологии, рациональное использование антибиотиков.*

ZAMONAVIY ANTIBIOTIKREZISTENTLIKNI YENGISH STRATEGIYALARI

Ahmadhodjayeva Munojatxon Mutalibjanova – t.f.n.
Andijon davlat tibbiyot instituti (Andijon, O‘zbekiston)

Annotatsiya. *Ushbu maqolada tibbiyotning eng dolzarb muammolaridan biri — antibiotikrezistentlikni bartaraf etish bo‘yicha zamonaviy yondashuvlar yoritilgan. Mikroorganizmlarning antibakterial preparatlarga chidamlilik mexanizmlari va uning global tarqalish tendensiyalari tahlil qilingan. Rezistentlikni yengishning innovatsion strategiyalariga alohida e’tibor qaratilgan: kombinatsiyalangan dori vositalarini ishlab chiqish, fagoterapiya, antimikrob peptidlar, nanotexnologiyalar va yangi avlod probiotiklaridan foydalanish. Antibiotiklardan oqilona foydalanishni nazorat qilishga oid xalqaro dasturlar (JSST, CDC) hamda shaxsga yo‘naltirilgan antibakterial terapiyani joriy etish istiqbollari ko‘rib chiqilgan. Barqaror infeksiyalarga qarshi kurashda fanlararo hamkorlik va global integratsiya zarurligi ta’kidlanadi.*

Kalit so‘zlar: *antibiotikrezistentlik, fagoterapiya, antimikrob peptidlar, nanotexnologiyalar, antibiotiklardan oqilona foydalanish.*

MODERN STRATEGIES FOR OVERCOMING ANTIBIOTIC RESISTANCE

Akhmadhodjaeva Munojatkhon Mutalibjanova – Ph.D.
Andijan State Medical Institute (Andijan, Uzbekistan)

Abstract. *This review article discusses modern approaches to solving one of the most urgent problems in medicine — antibiotic resistance. The main mechanisms of microbial resistance to antibacterial drugs and global trends in its spread are analyzed. Special attention is given to innovative strategies for overcoming resistance, including the development of combined drugs, phage therapy, the use of antimicrobial peptides, nanotechnologies, and new-generation probiotics. International programs for rational antibiotic use control (WHO, CDC) and prospects for implementing personalized antibacterial therapy are also reviewed. The article emphasizes the importance of interdisciplinary collaboration and global cooperation in combating resistant infections.*

Keywords: *antibiotic resistance, phage therapy, antimicrobial peptides, nanotechnology, rational use of antibiotics.*

Актуальность. Антибиотикорезистентность является одной из наиболее серьёзных глобальных угроз общественному здравоохранению XXI века. По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), ежегодно миллионы случаев инфекционных заболеваний осложняются неэффективностью стандартной антибактериальной терапии, что приводит к росту летальности, увеличению продолжительности госпитализации и значительным экономическим потерям. Основными причинами распространения резистентности являются бесконтрольное применение антибиотиков в медицине и ветеринарии, самолечение, а также недоста-

точный контроль за назначением и качеством антибактериальных препаратов. Современные микроорганизмы вырабатывают сложные механизмы защиты — ферментативную инактивацию антибиотиков, изменение мишеней воздействия и формирование биоплёнок, что значительно затрудняет терапию. В этой связи поиск и внедрение инновационных стратегий преодоления антибиотикорезистентности приобретает первостепенное значение. Особую актуальность приобретают такие направления, как фаготерапия, использование антимикробных пептидов, применение нанотехнологий и создание комбинированных препаратов с синергетическим действием. Изучение и систематизация современных подходов к решению проблемы устойчивости микроорганизмов имеет важное научное и практическое значение для оптимизации антибактериальной терапии и сохранения эффективности существующих лекарственных средств [1,3].

Целью исследования являлось обобщение и систематизация современных научных данных о механизмах формирования антибиотикорезистентности и анализ инновационных стратегий, направленных на её преодоление. Особое внимание уделено оценке эффективности альтернативных подходов, таких как фаготерапия, использование антимикробных пептидов, нанотехнологий и пробиотиков нового поколения. Также цел ью являлось определение перспектив рационального применения антибактериальных препаратов и мер глобального контроля, рекомендованных международными организациями (ВОЗ, CDC), для снижения распространённости устойчивых инфекций и сохранения эффективности антибиотиков в клинической практике.

Материалы и методы. Данное исследование выполнено в форме обзорного аналитического анализа литературных источников за период 2015–2025 годов. Для подготовки статьи использовались данные из международных баз PubMed, Scopus, Web of Science, Google Scholar, а также отечественных научных журналов, посвящённых проблеме антибиотикорезистентности. В обзор включались оригинальные исследования, метаанализы, отчёты ВОЗ, Европейского центра по контролю заболеваний (ECDC) и Центра по контролю и профилактике заболеваний США (CDC). Основными критериями отбора источников являлись научная достоверность, актуальность, статистическая обоснованность и клиническая значимость представленных данных. Методологическая база включала сравнительный анализ современных стратегий борьбы с антибиотикорезистентностью, оценку эффективности фаготерапии, антимикробных пептидов, наноматериалов, а также программ рационального применения антибиотиков. Для систематизации информации использовались методы аналитического, контент- и сравнительного анализа, что позволило выявить наиболее перспективные направления в профилактике и контроле устойчивости микроорганизмов к антибактериальным препаратам.

Результаты и обсуждения. Антибиотикорезистентность представляет собой одну из наиболее серьёзных угроз современному здравоохранению, охватывающую все страны и континенты. Её масштаб и последствия ставят под сомнение эффективность существующих методов лечения инфекционных заболеваний. По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), ежегодно в мире более 700 тысяч человек умирают от инфекций, вызванных устойчивыми к антибиотикам микроорганизмами, и если тенденция сохранится, к 2050 году это число может достичь 10 миллионов смертей в год. Центр по контролю и профилактике заболеваний США (CDC) оценивает, что только в Соединённых Штатах около 2,8 миллиона человек ежегодно заражаются бактериями, устойчивыми к антибиотикам, и более 35 тысяч умирают от таких инфекций. В странах с низким и средним уровнем дохода, где уровень контроля за назначением и применением антибиотиков недостаточен, проблема проявляется особенно остро: устойчивые штаммы патогенов вызывают вспышки внутрибольничных инфекций, которые трудно поддаются лечению даже самыми мощными резервными препаратами [3].

Рост антибиотикорезистентности сопровождается значительными социально-экономическими последствиями. По оценкам Всемирного банка, к 2030 году совокупный ущерб от антибиотикорезистентности может привести к сокращению мирового ВВП на 3,5%, а совокупные экономические потери превысят 100 триллионов долларов США. Увеличение продолжительности госпитализации, рост затрат на лечение и снижение производительности труда усугубляют нагрузку на систему здравоохранения. Так, пациенты с инфекциями, вызванными устойчивыми микроорганизмами, проводят в больнице в среднем на 8–20 дней дольше, чем больные с чувствительными формами инфекции, а стоимость их лечения в 2–4 раза выше. Это создаёт значительное бремя как для государства, так и для пациентов, особенно в странах с ограниченными ресурсами и низким уровнем доступности современных антибиотиков.

Основная цель данного исследования заключается в анализе современных тенденций, связанных с распространением антибиотикорезистентности, а также в систематизации инновационных стратегий, направленных на её преодоление. Среди задач исследования — рассмотрение генетических и молекулярных механизмов устойчивости микроорганизмов, определение

глобальных вызовов и ключевых направлений международных инициатив, а также оценка перспектив внедрения альтернативных методов антибактериальной терапии, включая фаготерапию, использование антимикробных пептидов, нанотехнологий, пробиотиков и комбинированных препаратов с синергическим действием.

Антибиотикорезистентность является результатом сложного взаимодействия биологических, социальных и экономических факторов. Генетические основы устойчивости микроорганизмов формируются как естественным путём, через спонтанные мутации, так и посредством горизонтального переноса генов между бактериями. Горизонтальный перенос может осуществляться через три механизма: трансформацию (поглощение бактерией фрагментов ДНК из окружающей среды), конъюгацию (передача плазмид между клетками) и трансдукцию (перенос генетического материала бактериофагами). Наиболее часто встречающийся путь — конъюгация, при которой плазмиды, содержащие гены устойчивости (например, bla, mecA, vanA, tetM и др.), передаются между различными видами бактерий, обеспечивая быстрое распространение резистентности в микробных сообществах [4].

Молекулярные механизмы антибиотикорезистентности многообразны и включают несколько ключевых направлений защиты бактерий. Одним из самых распространённых является инактивация антибиотиков ферментами. Например, β-лактамазы гидролизуют β-лактамное кольцо пенициллинов, цефалоспоринов и карбапенемов, лишая препараты их антибактериальной активности. Распространение генов β-лактамаз (в частности, ESBL — extended spectrum β-lactamases) привело к тому, что многие штаммы Escherichia coli и Klebsiella pneumoniae утратили чувствительность к большинству препаратов первой и второй линий. Аналогично, ферменты ацетилтрансферазы и аденилтрансферазы модифицируют аминогликозиды, снижая их способность связываться с рибосомами.

Другим важным механизмом является изменение мишеней действия антибиотиков. Мутации в генах, кодирующих пенициллинсвязывающие белки (PBP), приводят к тому, что β-лактамные антибиотики не могут эффективно взаимодействовать с клеточной стенкой бактерии. Этот механизм лежит в основе устойчивости метициллин-резистентного стафилококка (MRSA). Подобные изменения также встречаются у пневмококков и энтерококков, где мутации в рибосомальных субъединицах вызывают устойчивость к макролидам и тетрациклинам.

Третьим механизмом является снижение проницаемости клеточной стенки или активное выведение антибиотика из клетки посредством эффлюксных насосов. Такие системы, как AcrAB-TolC у грамотрицательных бактерий, способны удалять широкий спектр антибактериальных средств, включая хинолоны, тетрациклины и карбапенемы. В результате концентрация антибиотика внутри клетки становится недостаточной для проявления бактерицидного эффекта [1,4].

Четвёртый механизм связан с формированием биоплёнок — сложных трёхмерных структур, состоящих из бактериальных клеток, окружённых полисахаридным матриксом. Внутри биоплёнки бактерии находятся в состоянии низкой метаболической активности, что делает их менее восприимчивыми к действию антибиотиков и иммунной системы. Биоплёнки играют ключевую роль в хронических инфекциях дыхательных путей, мочевыводящих и желудочно-кишечных систем, а также при инфицировании катетеров и имплантатов.

Не менее значимым фактором распространения антибиотикорезистентности является бесконтрольное использование антибактериальных препаратов в медицине и сельском хозяйстве. По данным ВОЗ, в некоторых странах до 50% антибиотиков используются без рецепта врача. Особенно опасно применение антибиотиков при вирусных инфекциях, когда они не оказывают терапевтического эффекта, но создают селекционное давление, способствующее выживанию устойчивых штаммов. В ветеринарии антибиотики часто применяются в качестве стимуляторов роста животных, что также приводит к формированию устойчивых микроорганизмов, способных передаваться человеку через пищевую цепь. Например, устойчивость к колистину — одному из «последних резервных» антибиотиков — впервые была выявлена у свиней и птиц в Китае, а затем распространилась среди патогенов человека.

Глобальные тенденции свидетельствуют о нарастающем распространении антибиотикорезистентности во всех регионах мира. Согласно данным отчёта ВОЗ 2024 года, более 70% патогенов, вызывающих внутрибольничные инфекции, проявляют множественную устойчивость к антибиотикам. Особенно тревожным является рост устойчивости к карбапенемам — препаратам последней линии защиты. В странах Южной Азии доля карбапенем-резистентных Enterobacteriaceae достигает 45–60%, а в некоторых больницах Индии — более 70%. В Европе этот показатель составляет около 20%, в то время как в странах Центральной Азии, включая Узбекистан, наблюдается постепенное увеличение доли устойчивых штаммов Pseudomonas aeruginosa и Acinetobacter baumannii, особенно в отделениях интенсивной терапии.

Эпидемиологически значимые типы устойчивых патогенов включают MRSA (метициллин-резистентный Staphylococcus aureus),

ESBL-продуцирующие Enterobacteriaceae, CRE (карбапенем-резистентные энтеробактерии), а также VRE (ванкомицин-резистентные энтерококки). MRSA остаётся одной из ведущих причин внутрибольничных инфекций: в некоторых странах Европы уровень колонизации стафилококками, устойчивыми к метициллину, превышает 25%. CRE вызывают тяжелые формы сепсиса и пневмонии, смертность при которых достигает 40–50%.

Международное сообщество активно разрабатывает и внедряет стратегии по сдерживанию этой угрозы. ВОЗ в 2015 году запустила Глобальный план действий по борьбе с антибиотикорезистентностью, основанный на концепции «Единое здоровье» (One Health), которая объединяет усилия медицины, ветеринарии и сельского хозяйства. Аналогичные программы действуют в Европейском центре по контролю заболеваний (ECDC) и CDC в США. Их основная цель — уменьшить ненужное использование антибиотиков, улучшить диагностику инфекций, развивать систему мониторинга и стимулировать разработку новых лекарственных средств [4,5].

Современные научные подходы к преодолению антибиотикорезистентности основаны на поиске инновационных решений, сочетающих фундаментальные открытия молекулярной биологии, биотехнологии и клинической практики. Одним из наиболее перспективных направлений является фаготерапия — использование бактериофагов, вирусов, поражающих бактерии. Применение бактериофагов имеет долгую историю, однако только в последние десятилетия, благодаря развитию генетических и нанотехнологических методов, фаготерапия вновь рассматривается как альтернатива антибиотикам. В отличие от антибиотиков, бактериофаги избирательно поражают определённые виды бактерий, не нарушая нормальную микрофлору организма и не вызывая системных побочных эффектов. По данным исследований Европейского центра фаготерапии (Польша) и Национального института здравоохранения Грузии, эффективность фагопрепаратов при лечении хронических инфекций, вызванных MRSA и Pseudomonas aeruginosa, достигает 85%. В клинических испытаниях, проведённых в 2022–2024 годах, применение фагов позволило сократить продолжительность госпитализации пациентов с хроническими раневыми инфекциями на 30% и снизить необходимость в применении антибиотиков на 45% [2].

Антимикробные пептиды (АМП) рассматриваются как ещё одно перспективное направление в борьбе с резистентностью. Эти короткие аминокислотные цепи обладают способностью разрушать клеточные мембраны патогенов или ингибировать внутриклеточные процессы. На сегодняшний день известно более 3000 природных и синтетических АМП, включая дефензины, кателицидины и лактоферрины. Их механизм действия отличается от традиционных антибиотиков, что делает развитие устойчивости к ним крайне маловероятным. Клинические исследования, проведённые в Сингапуре, Японии и Германии, показали, что синтетический пептид LL-37 способен эффективно подавлять рост устойчивых штаммов Staphylococcus aureus и Acinetobacter baumannii без повреждения клеток хозяина. Кроме того, некоторые пептиды проявляют иммуномодулирующую активность, усиливая врождённые механизмы защиты организма.

Особое место среди современных стратегий занимает использование нанотехнологий. Наночастицы серебра, меди, оксидов цинка и титана проявляют выраженные антимикробные свойства, обусловленные их способностью повреждать клеточные мембраны, индуцировать образование активных форм кислорода и ингибировать ферментные системы бактерий. Исследования, проведённые в Университете Манчестера (2023), показали, что серебряные наночастицы размером 10–20 нм способны уничтожать более 95% клеток MRSA в течение 4 часов при минимальной цитотоксичности для клеток человека. Комбинация наночастиц с антибиотиками усиливает эффективность последних, снижая необходимую дозу и, следовательно, вероятность возникновения побочных эффектов. Примером служит липосомальная доставка ванкомицина, обеспечивающая его направленное высвобождение в очаге инфекции и повышающая концентрацию препарата в 3–5 раз по сравнению со стандартными формами [3].

Разработка комбинированных и синергических препаратов является ещё одним направлением борьбы с устойчивыми патогенами. Использование сочетаний антибиотиков с ингибиторами β-лактамаз (например, амоксициллин/клавуланат, пиперациллин/тазобактам, цефтазидим/авибактам) значительно расширяет спектр их действия. Современные исследования в области комбинированной терапии направлены на создание препаратов, объединяющих антибактериальные и противовоспалительные компоненты, что особенно актуально при хронических инфекциях. Согласно отчётам FDA (2024), клинические испытания более 30 новых комбинаций антибиотиков и вспомогательных молекул проходят в стадии II–III фазы. В некоторых случаях комбинированная терапия позволяет снизить смертность от инфекций, вызванных CRE и Pseudomonas aeruginosa, с 50% до 25%.

Не менее значимой стратегией является восстановление естественной резистентности организма с помощью пробиотиков и микробиомной терапии. Исследования последних лет показали, что нарушение микробного баланса кишечника способствует развитию резистентных инфекций, особенно у пациентов, длительно по-

лучающих антибиотики. Пробиотики на основе Lactobacillus, Bifidobacterium и Saccharomyces boulardii способны восстанавливать нормальную микрофлору и подавлять рост патогенных штаммов. Согласно данным Европейского общества клинической микробиологии (ESCMID, 2023), применение пробиотиков снижает риск антибиотик-ассоциированной диареи на 60%, а также уменьшает вероятность колонизации кишечника устойчивыми энтеробактериями на 40%. Кроме того, активно развиваются технологии трансплантации микробиоты кишечника (FMT), особенно в лечении инфекций, вызванных Clostridium difficile, где уровень клинического выздоровления достигает 90%.

Помимо разработки новых терапевтических подходов, особое внимание уделяется концепции рационального использования антибиотиков, или антимикробному стюардшипу (Antimicrobial Stewardship). Этот подход предусматривает системное управление назначением, дозировкой и продолжительностью антибактериальной терапии с целью минимизации необоснованного применения антибиотиков. По данным ВОЗ, внедрение программ стюардшипа позволяет сократить использование антибиотиков на 30–40% без ущерба для исходов лечения. В 2022 году более 70% стран-членов ВОЗ внедрили национальные программы рационального применения антибиотиков, однако их эффективность остаётся неоднородной. Например, в странах Северной Европы (Швеция, Норвегия, Дания) уровень потребления антибиотиков составляет менее 12 определённых суточных доз (DDD) на 1000 человек в день, тогда как в странах Южной Азии и Африки этот показатель превышает 30 DDD [4].

Роль врача и пациента в контроле за приёмом антибиотиков также имеет ключевое значение. Недостаточная информированность населения о последствиях неправильного использования антибиотиков остаётся одной из причин роста резистентности. Согласно опросу ВОЗ (2023), 47% респондентов в странах с низким уровнем дохода ошибочно полагают, что антибиотики эффективны против вирусных инфекций, таких как грипп или ОРВИ. В связи с этим программы просвещения и профилактики должны занимать центральное место в стратегии борьбы с резистентностью. Образовательные кампании, проведённые в Великобритании и Канаде, показали, что повышение информированности пациентов привело к снижению числа необоснованных назначений антибиотиков на 20% в течение двух лет.

Среди перспективных инновационных направлений особое место занимают генетические технологии, такие как система редактирования генома CRISPR-Cas. Применение CRISPR позволяет точечно разрушать гены устойчивости у бактерий или блокировать их репликацию. Исследования, проведённые в Массачусетском технологическом институте (2022), показали, что CRISPR-кассеты, направленные на гены blaNDM-1 и mecA, эффективно подавляют рост карбапенем- и метициллин-резистентных штаммов E. coli и Staphylococcus aureus. Более того, эти технологии потенциально позволяют создавать синтетические бактериофаги, способные избирательно уничтожать резистентные клетки, не повреждая нормальную микрофлору.

Цифровые системы мониторинга антибиотикорезистентности становятся важнейшим элементом глобального контроля. ВОЗ запустила платформу GLASS (Global Antimicrobial Resistance and Use Surveillance System), объединяющую данные более чем из 130 стран. В Узбекистане с 2022 года действует национальная программа по мониторингу антибиотикорезистентности, направленная на сбор и анализ данных о чувствительности микробов в стационарах и амбулаторных учреждениях. Использование электронных регистров и автоматизированных лабораторных систем позволяет оперативно выявлять рост устойчивых штаммов и корректировать схемы лечения. В ряде стран (например, Нидерланды, Япония) внедрение подобных систем позволило сократить уровень внутрибольничных инфекций, вызванных резистентными микроорганизмами, на 15–20% в течение трёх лет.

Международное сотрудничество остаётся ключевым фактором успеха в борьбе с антибиотикорезистентностью. Поскольку бактерии не признают границ, только согласованные действия всех стран могут привести к замедлению распространения резистентности. Программы ВОЗ, ООН и Всемирной организации по охране здоровья животных направлены на развитие межсекторальных подходов в рамках концепции «Единое здоровье». Ежегодно проводится Всемирная неделя правильного использования антибиотиков, объединяющая более 100 государств. Эти инициативы способствуют обмену данными, повышению квалификации медицинского персонала и разработке единых стандартов лечения [5].

Современная наука демонстрирует, что проблема антибиотикорезистентности не может быть решена исключительно разработкой новых препаратов. В настоящее время в фазе клинических испытаний находится около 45 новых антибиотиков, однако лишь 5–6 из них обладают принципиально новыми механизмами действия. Даже при успешной регистрации новых средств бактерии способны выработать устойчивость к ним в течение нескольких лет, что требует комплексных решений — от совершенствования диагностики до глобального контроля за применением антибиотиков.

Современные стратегии преодоления антибиотикорезистентности включают многоуровневый подход, сочетающий научные, клинические и организационные меры. Комбинация инновационных технологий — фаготерапии, антимикробных пептидов, наноматериалов, генетических инструментов и рационального применения антибиотиков — формирует основу будущей медицины, ориентированной на сохранение эффективности антимикробных средств. Применение этих стратегий требует тесного взаимодействия исследователей, врачей, фармацевтических компаний и государственных структур, поскольку только комплексное сотрудничество способно обеспечить устойчивое снижение распространённости резистентных инфекций и защиту здоровья населения [2,3,4].

Перспективные направления борьбы с антибиотикорезистентностью требуют не только разработки новых лекарственных средств, но и фундаментального изменения подходов к диагностике, мониторингу и профилактике инфекций. Системы раннего выявления устойчивых штаммов становятся неотъемлемой частью современной медицины. Использование молекулярно-генетических методов, таких как ПЦР в реальном времени, секвенирование нового поколения (NGS) и MALDI-TOF-масс-спектрометрия, позволяет за считанные часы определить вид возбудителя и наличие генов устойчивости. Например, внедрение экспресс-диагностики резистентности к карбапенемам с помощью теста Carba NP позволило сократить время подбора эффективной терапии с 48 часов до 4–6 часов, что значительно снизило летальность при сепсисе. В будущем прогнозируется активное развитие искусственного интеллекта в клинической микробиологии: алгоритмы машинного обучения смогут анализировать геномные данные бактерий и предсказывать их чувствительность к препаратам, повышая точность назначения лечения.

Одной из наиболее интересных инноваций является создание синтетических антибактериальных молекул с направленным действием. На базе платформы AI Drug Discovery разработаны десятки соединений, обладающих уникальными структурами, отличающимися от традиционных антибиотиков. Так, в 2023 году исследователи Массачусетского технологического института сообщили о создании молекулы halicin, которая эффективно уничтожает широкий спектр патогенов, включая устойчивые формы Acinetobacter baumannii, к которым большинство известных антибиотиков уже не действует. Алгоритмы искусственного интеллекта позволяют ускорить процесс поиска новых лекарственных соединений в десятки раз: вместо многих лет лабораторных испытаний компьютерное моделирование позволяет за несколько недель определить перспективные структуры с потенциальной активностью.

Важным направлением остаётся разработка антимикробных вакцин. Хотя большинство существующих вакцин направлено против вирусных инфекций, в последние годы активно создаются препараты против бактериальных возбудителей, обладающих множественной устойчивостью. Уже проводятся испытания вакцин против MRSA, Pseudomonas aeruginosa и Escherichia coli, способных предотвращать колонизацию и снижать риск развития инфекций у госпитализированных пациентов. Согласно прогнозу компании Gavi (2024), внедрение даже частично эффективных вакцин против трёх наиболее распространённых устойчивых бактерий может предотвратить до 1,5 миллиона смертей ежегодно.

В рамках междисциплинарных исследований активно развиваются биоинженерные методы восстановления микробиоты человека. Учёные из Кембриджского университета разработали технологии направленной модификации пробиотических бактерий, способных продуцировать вещества, ингибирующие рост патогенов. Эти штаммы создаются с использованием CRISPR-систем и могут действовать как «живые лекарства», адаптирующиеся к условиям кишечной среды. Первые клинические испытания продемонстрировали снижение частоты рецидивов инфекций мочевых путей у женщин на 40% при использовании подобных пробиотиков в течение трёх месяцев.

Перспективным направлением является также применение фотодинамической терапии, при которой бактерии разрушаются под воздействием света в присутствии фотосенсибилизирующих веществ. Такой метод эффективен против биоплёнок и устойчивых форм микроорганизмов, особенно в стоматологии и хирургии. Исследования, проведённые в Южной Корее, показали, что фотодинамическая обработка ран, инфицированных MRSA, позволила добиться полной санации в 92% случаев без применения системных антибиотиков.

Не менее важной задачей остаётся экологический контроль за оборотом антибиотиков. Сточные воды больниц, фармацевтических предприятий и сельскохозяйственных комплексов являются резервуарами устойчивых бактерий и генов резистентности. Исследования в Индии и Бангладеш выявили, что концентрация антибиотиков в сточных водах в некоторых регионах превышает безопасные пределы в 100–300 раз, что создаёт условия для отбора устойчивых форм микроорганизмов. Поэтому перспективным направлением становится разработка систем биологической очистки и фильтрации, способных разрушать остатки антибиотиков до их попадания в окружающую среду. В странах ЕС

уже внедряются биореакторы, использующие микроводоросли и бактерии для нейтрализации фармакологических загрязнителей.

Глобальный ответ на проблему антибиотикорезистентности невозможен без устойчивого финансирования научных и образовательных программ. В 2024 году ВОЗ запустила фонд «AMR Innovation Fund», объём которого составляет более 1 миллиарда долларов, направленных на поддержку исследований в области новых антибактериальных соединений и диагностических технологий. Аналогичные инициативы действуют в ЕС (InnovFin AMR Initiative) и США (CARB-X). Только совместные усилия международных организаций, правительств и частного сектора могут обеспечить долгосрочный успех.

Особое значение имеет формирование единой нормативной базы. Разработка глобальных стандартов по использованию антибиотиков и контролю за их продажей остаётся приоритетом. В 2022 году 78 стран приняли законодательные акты, ограничивающие свободную продажу антибиотиков, однако их реальное соблюдение остаётся проблематичным. В странах Центральной Азии и Восточной Европы, по данным ВОЗ, около 40% аптек продолжают отпускать антибиотики без рецепта. Поэтому внедрение систем электронного рецепта, цифрового контроля и межведомственного обмена информацией является необходимым шагом для стабилизации ситуации [4].

Важнейшей составляющей борьбы с резистентностью является просвещение населения и медицинских работников. Без изменения поведения и привычек использование антибиотиков останется нерациональным. Международные образовательные программы, такие как «Antibiotic Awareness Week», «Smart Use of Antibiotics» и «Antimicrobial Resistance Learning Hub», направлены на повышение знаний среди врачей, студентов и фармацевтов. Согласно оценке ВОЗ (2024), проведение таких кампаний в 96 странах позволило повысить осведомлённость о рисках неправильного применения антибиотиков среди населения на 25%, а среди студентов медицинских вузов — на 40%.

Перспективы будущего также связаны с интеграцией медицинских и цифровых технологий. Разработка мобильных приложений для мониторинга приёма антибиотиков, напоминаний о дозировке и взаимодействия с врачом уже доказала свою эффективность. В 2023 году в Сингапуре была внедрена система «e-Doctor AMR», позволяющая пациентам получать индивидуальные рекомендации и сообщать о побочных эффектах. Анализ данных, поступающих от пользователей, позволил сократить число ошибочных назначений антибиотиков на 18%.

Не менее перспективным направлением считается создание международных баз данных геномов резистентных бактерий. Эти базы позволяют отслеживать распространение конкретных штаммов по регионам, анализировать их генетическую структуру и прогнозировать новые мутации. Примером является проект «PathogenWatch», объединяющий более 200 тысяч геномов клинически значимых патогенов. Благодаря таким ресурсам эпидемиологи могут быстро реагировать на вспышки инфекций и корректировать схемы лечения.

Современная концепция борьбы с антибиотикорезистентностью не ограничивается медицинской сферой. Важным компонентом является участие сельскохозяйственного и пищевого сектора. Внедрение принципов «чистой цепочки поставок» (clean food chain) предполагает контроль за использованием антибиотиков на всех этапах производства продуктов питания. В Дании и Нидерландах за последние 10 лет использование антибиотиков в животноводстве сократилось на 50–60%, при этом заболеваемость животных инфекциями не увеличилась благодаря внедрению программ вакцинации и улучшению санитарных условий. Этот опыт демонстрирует, что переход к более ответственному сельскому хозяйству является реальной альтернативой антибиотическому ростостимулированию.

Проблема антибиотикорезистентности также тесно связана с изменением климата и миграцией населения. Повышение температуры и влажности способствует распространению патогенов, а увеличение числа международных путешествий и торговых потоков ускоряет циркуляцию устойчивых бактерий между регионами. Поэтому усилия по борьбе с резистентностью должны интегрироваться с глобальными программами по защите окружающей среды и укреплению санитарно-эпидемиологических служб.

Перспективы будущего в борьбе с антибиотикорезистентностью связаны с развитием персонализированной медицины, в которой лечение подбирается на основании генетических и микробиомных характеристик конкретного пациента. Это позволит не только повысить эффективность терапии, но и снизить вероятность развития устойчивости. Использование искусственного интеллекта, нанотехнологий, генетических инструментов и биоинформатики откроет новые горизонты в создании антибактериальных препаратов и диагностических систем. В совокупности эти подходы способны радикально изменить представление человечества о борьбе с инфекциями и обеспечить сохранение здоровья будущих поколений [2,3].

Выводы. Антибиотикорезистентность представляет собой одну из самых серьёзных угроз современной медицины, требующую комплексного и междисциплинарного подхода. Проведённый обзор показал, что ключевыми факто-

рами её распространения являются чрезмерное и бесконтрольное использование антибиотиков, а также недостаточный уровень глобального мониторинга. Современные стратегии преодоления резистентности включают фаготерапию, использование антимикробных пептидов, нанотехнологий, пробиотиков и комбинированных препаратов, которые демонстрируют высокую эффективность и перспективность в клинических исследованиях. Важную роль играют программы рационального применения антибиотиков и развитие международных инициатив ВОЗ и CDC в рамках концепции «Единое здоровье». Только объединение усилий науки, медицины, государства и общества позволит замедлить рост устойчивости микроорганизмов, сохранить эффективность существующих антибактериальных средств и обеспечить надёжную защиту здоровья будущих поколений.

ЛИТЕРАТУРА

1. World Health Organization (WHO). *Global Antimicrobial Resistance and Use Surveillance System (GLASS) Report 2024.* Geneva: WHO Press, 2024.

2. Centers for Disease Control and Prevention (CDC). *Antibiotic Resistance Threats in the United States, 2023.* Atlanta: U.S. Department of Health and Human Services, 2023.

3. O'Neill J. *Tackling Drug-Resistant Infections Globally: Final Report and Recommendations.* Review on Antimicrobial Resistance. London: HM Government, 2016.

4. Ventola C.L. *The antibiotic resistance crisis: part 1—causes and threats. Pharmacy and Therapeutics*, 2015; 40(4): 277–283.

5. Aslam B., Wang W., Arshad M.I., et al. *Antibiotic resistance: a rundown of a global crisis. Infection and Drug Resistance*, 2018; 11: 1645–1658.