

© Н.В. Немцева, В.А. Гриценко, 2025

УДК 575.8:579.22:579.26

*Н.В. Немцева, В.А. Гриценко*

## **ФЕНОМЕН ПРЕАДАПТАЦИИ В ЭВОЛЮЦИИ ПАТОГЕННОСТИ БАКТЕРИЙ**

Оренбургский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук (Институт клеточного и внутриклеточного симбиоза УрО РАН), Оренбург, Россия

В аналитическом обзоре предпринята попытка оценить вклад преадаптаций в эволюцию патогенности бактерий, рассмотрев их как потенциальные эволюционные «заготовки», позволяющие будущим патогенам осваивать новые экологические ниши, становясь случайными, факультативными или облигатными паразитами эукариотных организмов, в том числе человека. В статье обобщены результаты современных и классических исследований, посвященных коэволюции бактерий и эукариотных хозяев, с акцентом на взаимодействие микроорганизмов с фаготрофными протистами в естественных и антропогенных экотопах, включая системы питьевого водоснабжения. Проанализированы экспериментальные данные, полученные из модельных систем бактерии-простейшие, транскриптомных исследований и сравнительных экологических наблюдений. Показано, что фаготрофные протисты функционируют как эволюционные «инкубаторы» патогенов, осуществляя отбор бактерий, устойчивых к фагоцитозу и внутриклеточному киллингу. Выявлены ключевые преадаптивные механизмы бактерий: устойчивость к эволюционно консервативным антимикробным факторам (лизозим, гистоны), наличие антилизозимной и антигистоновой активности, развитие систем секреции (T3SS/T4SS/T6SS), фенотипическая гетерогенность и регуляторная избыточность популяций. Показано, что механизмы биопленкообразования и поглощения железа, сформированные в природных и техногенных экосистемах, повышают способность бактерий к персистенции в организме человека. Обсуждается положение, что многие патогенные характеристики возбудителей инфекций возникли не как прямое приспособление к человеку, а как результат естественного отбора в природных и техногенных экосистемах. Концепция преадаптаций позволяет по-новому интерпретировать происхождение патогенности бактерий, прогнозировать риск появления новых инфекций и обосновать разработку профилактических и противомикробных стратегий, направленных на ключевые механизмы персистенции, включая биопленкообразование и устойчивость к факторам врожденного и адаптивного иммунитета человека.

*Ключевые слова:* бактерии, бактериально-гостальные взаимоотношения, эукариоты, эволюция, коэволюция хозяина и патогенна, микроэволюция, преадаптация, экзаптация, патогенность, вирулентность, эвазия, персистенция, системы секреции прокариот, антилизозимная активность, антигистоновая активность, метаболизм железа, биопленки, системы питьевого водоснабжения.

---

---

*N.V. Nemtseva, V.A. Gritsenko*

## **THE PHENOMENON OF PRE-ADAPTATION IN THE EVOLUTION OF BACTERIAL PATHOGENICITY**

Orenburg Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Institute of Cellular and Intracellular Symbiosis, UrB RAS), Orenburg, Russia

This analytical review attempts to assess the contribution of exaptations to the evolution of bacterial pathogenicity, examining them as potential evolutionary "preparations" that allow future pathogens to colonize new ecological niches, becoming accidental, facultative, or obligate

parasites of eukaryotic organisms, including humans. The review summarizes the results of both classical and modern studies of the coevolution of bacteria and eukaryotic hosts, with an emphasis on the interaction of microorganisms with phagotrophic protists in natural and anthropogenic ecotopes, including drinking water systems. Experimental data obtained from bacteria-protozoan model systems, transcriptomic studies, and comparative ecological observations are analyzed. It is shown that phagotrophic protists function as evolutionary "incubators" of pathogens, selecting bacteria resistant to phagocytosis and intracellular killing. Key preadaptive mechanisms of bacteria have been identified: resistance to evolutionarily conserved antimicrobial factors (lysozyme, histones), the presence of anti-lysozyme and anti-histone activity, the development of secretion systems (T3SS/T4SS/T6SS), phenotypic heterogeneity, and regulatory redundancy of populations. It has been shown that biofilm formation and iron uptake mechanisms, developed in natural and man-made ecosystems, enhance the ability of bacteria to persist in the human body. The idea that many pathogenic characteristics of infectious agents arose not as a direct adaptation to humans, but as a result of natural selection in natural and man-made ecosystems is discussed. The concept of preadaptations allows us to reinterpret the origin of bacterial pathogenicity, predict the risk of new infections, and justify the development of preventive and antimicrobial strategies aimed at key persistence mechanisms, including biofilm formation and resistance to factors of human innate and adaptive immunity.

*Key words:* bacteria, bacterial-host relationships, eukaryotes, evolution, host-pathogen coevolution, microevolution, preadaptation, exaptation, pathogenicity, virulence, evasion, persistence, prokaryotic secretion systems, anti-lysozyme activity, anti-histone activity, iron metabolism, biofilms, drinking water supply systems.