

УДК 573.555

Бадердинова А.З.

ИЗУЧЕНИЕ СВЯЗИ ПРОИСХОЖДЕНИЯ ЭУКАРИОТ И АСГАРДАРХЕЙ

Научный руководитель - старший преподаватель А. Т. Волкова

Башкирский государственный медицинский университет, г. Уфа

Данная статья посвящена краткому описанию клады Асгард и теоретическому обзору происхождения эукариот от асгардархей. Рассматриваются недавние открытия новых представителей асгардархей для описания их текущей экологической и эволюционной значимости.

Ключевые слова: Асгардархеи, эукариогенез, филогенетика, эндосимбиоз

Badertdinova A. Z.

EXPLORING THE CONNECTION BETWEEN THE ORIGIN OF EUKARYOTES WITH ASGARDARCHAEA

Scientific supervisor - Senior Lecturer A. T. Volkova

Bashkir state medical University, Ufa

This article is devoted to a brief description of the Asgard clade and a theoretical overview of the origin of eukaryotes from Asgardarchaea. Recent discoveries of new representatives of Asgardarchaea are reviewed to describe their current ecological and evolutionary significance.

Keywords: Asgardarchaea, eukaryogenesis, phylogenetics, endosymbiosis

Происхождение эукариотической клетки остается одной из главных нерешенных проблем в изучении разнообразия клеточной жизни на Земле. В последние годы число обнаруженных и изученных архей увеличилось. Сомнения о природе последнего универсального общего предка, последнего общего архейного предка присутствуют до сих пор. Например, даже в публикациях последних лет рассматривалась такая теория, что эукариоты являются не более чем сестринской ветвью по отношению к асгардархеям, однако сейчас все-таки более склоняются к мнению об архейном предке всех эукариот.

Цель работы

Изучение связи происхождения эукариотической клетки и асгардархей

Материал и методы исследования

Был проведен теоретический анализ современной научной литературы по вопросам возникновения эукариотической клетки.

Результаты и обсуждения

Эукариогенез, процесс в эволюции, приведший к возникновению эукариотической клетки, долгое время оставался непонятным.

Эндосимбиотическое происхождение митохондрий и хлоропластов было изучено еще в прошлом веке. Однако симбиотическое происхождение самой эукариотической клетки много лет подвергалось сомнениям [9]. Исторически считалось, что существует три домена, то есть домены бактерий, эукариот и архей, причем археи и эукариоты описывались как

сестринские группы (так называемая трехдоменная система) [8]. Обнаружение асгардархеи в жерле гидротермального источника позволило посредством метагеномного анализа реконструировать геномы этих микробов и тем самым более ясно представить процесс возникновения эукариотической клетки. Благодаря проведению филогеномного анализа асгардархей и обнаружению эукариоспецифичных генов в их составе позволило считать, что, в отличие от трехдоменной классификации древа жизни, эукариоты возникли из области клады архей (то есть дерево жизни, состоящее только из доменов архей и бактерий) [7].

Некоторые представители асгардархей были описаны как миксотрофы, предположительно играющие важную роль в круговороте серы и азота. В геномах асгардархей также выявлен новый класс родопсина, указывающий на их фототрофный образ жизни. Также в геномах были идентифицированы гены устойчивости к мышьяку и меди. Хотя общедоступные геномы являются богатым источником информации для реконструкции их метаболических путей [8].

Огромная разница между строением прокариотической и эукариотической клетки, простота строения первой позволяла приравнивать происхождение эукариот к редчайшему явлению. Однако, описанные выше открытия, позволили совершить прорыв. Первого представителя асгардархей обнаружили в водных отложениях около гидротермальной системы «Замок Локи» в Северной Атлантике и найденных там архей назвали локиархеи. Позже полученных в других местообитаниях родственников асгардархей по аналогии стали называть в честь скандинавских богов (*Lokiarchaeota*, *Thorarchaeota*, *Odinarchaeota*, *Heimdall archaeota* и *Helarchaeota*) [5, 6].

Буквально до недавнего времени исследователи не могли культивировать представителей, но в 2020 году в журнале «Nature» вышла статья про выращенный японскими учеными в лабораторных условиях вид *Prometheoarchaeum syntrophicum* [10], позже в 2023 году была опубликована другая статья в том же журнале про вид *Lokiarchaeum ossiferum*, выращенный европейскими учеными в 2022 году [11]. Оказалось, клетки *L. ossiferum* имеют схожее строение с *P. syntrophicum*: в обоих случаях клетки шаровидные и несут длинные протрузии. Геномы *Lokiarchaeia* содержат множество генов, которые кодируют сигнатурные белки эукариот (ESP) – белки, участвующие в жизненных сложных процессах эукариот [1, 4].

Гипотез о происхождении эукариот опубликовано огромное количество. На данный момент общепризнанной является модель, заключающаяся в том, что у археи присутствовали выросты клетки, которыми она покрыла своего будущего симбионта – альфа-протеобактерию, преобразившейся в дальнейшем в митохондрию. Затем эти выросты слились. Центральная часть клетки археи стала ядром, остатки просветов между слившимися выростами стали

эндоплазматической сетью будущей эукариотической клетки. Эта гипотеза была достаточно популярна, но раньше оставалась умозрительной [3].

Международный коллектив ученых опубликовал в журнале *Nature* статью, описывающую новый взгляд на этот вопрос. Филогенетический анализ асгардархей с использованием генов рибосомальной РНК, универсально консервативных маркерных генов и рибосомальных белков поместил эукариот в состав клады Асгардархей, при этом *Heimdallarchaeota* были предложены как ближайшие архейные родственники эукариот [2, 8].

Современные исследователи расширили геномное разнообразие асгардархей, собрав образцы из 11 различных мест по всему миру и проведя метагеномный анализ. При этом было получено 63 генома асгардархей, собранных на основе метагеномов (metagenome-assembled genomes, MAG). В анализе исследователи опирались на набор 57 (NM57) эукариотических белков архейного происхождения. Он содержит последовательности участников различных метаболических и клеточных процессов, однако не содержит рибосомальных белков. Филогенетический анализ NM57 показал, что эукариоты являются сестринской кладой по отношению к *Hodarchaeales* (одна из ветвей хеймдаллархей). Эти результаты были получены при систематическом уменьшении филогенетических артефактов [7].

Укоренение ветви эукариот внутри хеймдаллархей согласуется с анализом эукариотических сигнатурных белков. исключений позволяет предположить близкое родство эукариот с конкретной кладой — *Hodarchaeales* [7].

Заключение и выводы

В этом обзоре описано современное состояние исследований асгардархей. Все это дает представление о природе и свойствах асгардархейного предка эукариот. Асгардархеи стали тем мостиком, решающим проблему пропасти между различиями просто устроенной прокариотической и сложной эукариотических клеток. Выяснилось, что большей частью своего усложненного строения эукариоты обзавелись еще на прокариотической стадии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Биомолекула [Электронный ресурс] URL: <https://biomolecula.ru/articles/arkhei-asmard-schastlivye-obladateli-aktinovogo-tsitoskeleta>
2. Новое о происхождении эукариот: кто кого съел. Интервью с Евгением Куниным [Электронный ресурс] URL: <https://www.trv-science.ru/2024/03/koonin-o-proishozhdenii-eukariot/comment-page-1/>
3. Последний общий предок архей и эукариот был хеймдаллархеей [Электронный ресурс] URL: <https://pcr.news/novosti/posledniy-obshchiy-predok-arkhey-i-eukariot-byly-kheymdallarkheey/>
4. Ученые смогли культивировать еще один вид асгардархей [Электронный ресурс] URL: <https://medach.pro/post/2912>

5. Эволюционная биология: открытия 2022 года [Электронный ресурс] URL: https://elementy.ru/nauchno-populyarnaya_biblioteka/436778/Evolyutsionnaya_biologiya_otkrytiya_2022_goda
6. Элементы [Электронный ресурс] URL:https://elementy.ru/novosti_nauki/432910/Opisan_novyy_nadtip_arkhey_k_kotoromu_otnosyatsya_predki_eukariot
7. Eme L, Tamarit D, Caceres EF, Stairs CW, De Anda V, Schön ME, Seitz KW, Dombrowski N, Lewis WH, Homa F, Saw JH, Lombard J, Nunoura T, Li WJ, Hua ZS, Chen LX, Banfield JF, John ES, Reysenbach AL, Stott MB, Schramm A, Kjeldsen KU, Teske AP, Baker BJ, Ettema TJG. Inference and reconstruction of the heimdallarchaeal ancestry of eukaryotes. *Nature*. 2023 Jun;618(7967):992-999.
8. Imachi H., Nobu M.K., Nakahara N., Morono Y., Ogawara M., Takaki Y. et al. (2019). Isolation of an archaeon at the prokaryote-eukaryote interface. *bioRxiv*;
9. López-García P, Moreira D. Eukaryogenesis, a syntrophy affair. *Nat Microbiol*. 2019 Jul;4(7):1068-1070
10. MacLeod F, Kindler GS, Wong HL, Chen R, Burns BP. Asgard archaea: Diversity, function, and evolutionary implications in a range of microbiomes. *AIMS Microbiol*. 2019 Jan 30;5(1):48-61
11. Thiago Rodrigues-Oliveira, Florian Wollweber, Rafael I. Ponce-Toledo, Jingwei Xu, Simon K.-M. R. Rittmann, et. al.. (2023). Actin cytoskeleton and complex cell architecture in an Asgard archaeon. *Nature*. 613, 332-339.

Сведения об авторе статьи:

Бадердинова Альбина Зуфаровна – студент 1 курса Института развития образования ФГБОУ ВО Башкирский государственный медицинский университет, г. Уфа, ул. Ленина 3. email; badertdinova.albina@bk.ru