

WONDERFUL WORLD
OF ARCHAEA

B. V. GROMOV

The discovery of three evolutionary branches of life, Bacteria, Archaea and Eucarya, which appeared on the beginning of the biological evolution was one of the most significant achievements of biology in the end of our century. Archaea differ from all other organisms. They possess a unique capability to form methane, some species are extremophils growing under high temperature, acidity, salinity.

Одним из основных достижений биологии конца XX века явилось выявление трех эволюционных ветвей жизни, сформировавшихся на заре ее возникновения, – это домены бактерий, архей и эукарий. Археи отличаются от других организмов, только они способны к образованию метана. Многие являются экстремафилами, развивающимися в условиях крайних температур, кислотности и солевой концентрации.

© Громов Б.В., 1997

УДИВИТЕЛЬНЫЙ МИР АРХЕЙ

Б. В. ГРОМОВ

Санкт-Петербургский государственный университет

ВВЕДЕНИЕ

Вероятно, некоторым читателям название статьи покажется непонятным. В результате бурного развития науки многие традиционные представления существенно изменились и появились новые понятия и термины, нередко с трудом получающие широкое признание. Как отмечено в нашей предыдущей статье [1], ко второй половине XX века стало очевидным, что все живые организмы, имеющие клеточное строение, могут быть отнесены к одной из двух групп: прокариотам или эукариотам. Клетки прокариот устроены проще, они лишены окруженного оболочкой ядра. В течение некоторого времени считали, что термины “прокариоты” и “бактерии” – синонимы и что бактерии представляют собой самостоятельную и единую ветвь эволюции живых организмов. Однако постепенно накапливались данные о том, что различия между некоторыми бактериями могут быть очень существенными и свидетельствуют об отсутствии у них близкого эволюционного родства. Особенно большое значение придается данным об особенностях строения рибосомальных, а также транспортных рибонуклеиновых кислот (РНК), природа и функции которых рассмотрены в статье Д.Г. Кнорре [2]. В настоящее время на основе результатов сравнения последовательностей оснований в молекулах рибосомальных РНК судят о родственных связях организмов. Такого рода данные, а также исследования других особенностей прокариот показали, что на самом деле они должны быть разделены по крайней мере на две группы, имеющие различное эволюционное происхождение. Кроме того, эукариотические клетки не только сложнее организованы, но и обладают элементами, которые они не могли получить от предков современных прокариот. Это прежде всего цитоплазматические рибосомы, отличные от рибосом прокариот. Принципиальное сходство генетического кода, организации макромолекул и биохимического аппарата синтеза белка свидетельствует о единстве происхождения всех живых организмов. Предполагают, что существовал некий общий предок – “прогенот”, но что он собой представлял, неизвестно. Этот “прогенот” мог дать начало трем самостоятельным ветвям эволюционного дерева. С точки зрения иерархической систематики эти ветви предложено рассматривать в качестве доменов [3], имеющих ранг выше традиционных “царств” (домен – владение средневекового феодала, в физике – область в веществе, отличающаяся физическими свойствами от смежных областей). Эти домены – бактерии, археи и эукариоты. Необходимо иметь в виду, что до

недавнего времени архей называли архебактериями. Они разнообразны и могут быть разделены на два царства: кренархеота и зуриархеота.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АРХЕЙ

По форме и размерам клеток, общим принципам их организации и характеру деления археи сходны с бактериями, хотя только среди них обнаружены организмы кубической формы. Многие археи подвижны и имеют жгутики, похожие на бактериальные, но несколько отличающиеся деталями организации. Однако представители этого домена имеют существенные особенности.

1. Уже было отмечено, что важнейшей особенностью архей является своеобразие их рибосомальных и транспортных РНК, их рибосомы различаются также и по форме. Отличительные черты обнаружены и в других компонентах системы синтеза белка.

2. В отличие от всех других организмов археи в составе мембранных липидов имеют не жирные кислоты, а многоатомные спирты, обычно с 20 или 40 атомами углерода. В последнем случае липидная пластина мембраны образована мономолекулярным слоем, что, вероятно, придает мембране особую прочность.

3. Покровы клеток у разных архей могут иметь различное строение и химический состав, но им часто присуще наличие поверхностных слоев, образованных определенным образом структурированными и регулярно уложенными белковыми или гликопротеидными молекулами правильной или довольно причудливой формы (рис. 1). Иногда в состав клеточных стенок архей входят пептиды и полисахариды.

4. Некоторые археи осуществляют биохимические процессы, не свойственные никаким другим организмам. Например, только определенные представители архей в процессе своей жизнедеятельности образуют метан.

5. Большинство архей – экстремофилы, то есть развиваются в экстремальных условиях, при высокой температуре, кислотности, в насыщенных солевых растворах.

6. Археи, видимо, неспособны к паразитизму. По крайней мере к настоящему времени археи, приносящие вред каким-либо другим организмам, неизвестны, хотя среди них много симбионтов, к взаимной пользе живущих совместно с другими организмами. Среди архей много автотрофных форм, не нуждающихся в органической пище и получающих необходимую для жизни энергию за счет окислительно-восстановительных реакций, в которые вовлечены неорганические молекулы.

ЦАРСТВО КРЕНАРХЕОТ

Эти организмы образуют довольно гомогенную группу. Они получают энергию в процессах, связанных с восстановлением или окислением соединений серы, и являются гипертермофилами, то есть развиваются при температуре выше 80°C. Название

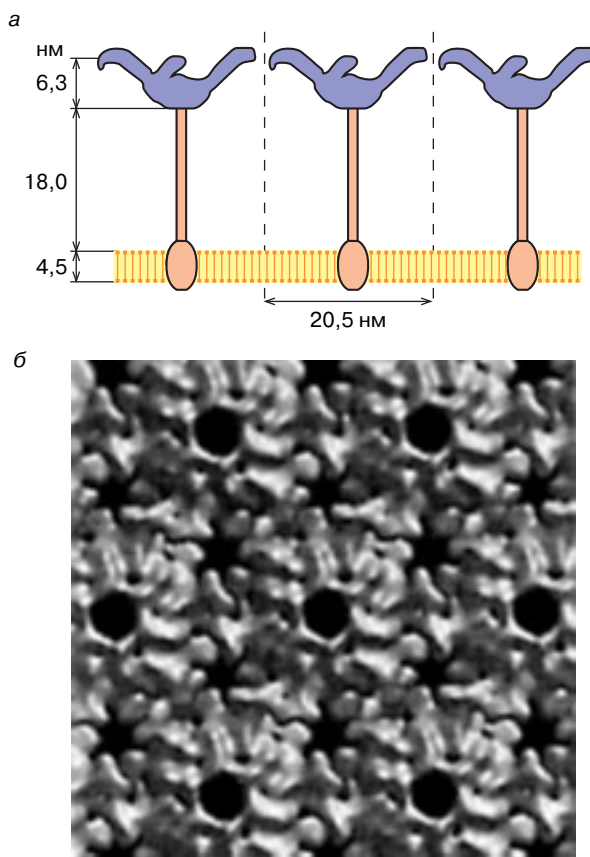


Рис. 1. Строение белковой оболочки *Sulfolobus*: а – схема поперечного сечения. Овальные элементы встроены в цитоплазматическую мембрану и служат якорями, через соединители они связаны с фигурными субъединицами трехлучевой симметрии, образующими пористый поверхностный белковый слой; б – реконструкция поверхности на основе данных электронной кристаллографии (по: Baumeister, Lembecke, 1992)

этого царства происходит от греческих корней “крен”, означающего источник, ключ, и “архе” – древний. Действительно, эти археи обитают исключительно в горячих источниках, на поверхности Земли или дне океана, обычно в зонах вулканической активности. Местом их обитания являются, в частности, окрестности глубоководных вулканических источников – “черных курильщиков”, расположенных в океане на тысячеметровых глубинах. Температура воды в них благодаря высокому давлению может достигать 200–300°C. При взаимодействии воды источника с морской водой образуется темный осадок, источник как бы дымит. Отсюда происходит их название. Около таких источников развиваются экстремально термофильные археи, некоторые из них растут даже при температурах 100–110°C. К ним относится, например, *Picrodicticum occultum* – “огненная сеточка”, организм, представляющий собой сеточку, образованную ша-

риками-кокками, соединенными тяжами. Лучше всего “сеточка” развивается при температуре 105°C, используя для жизни энергию окисления элементарной серой молекулярного водорода, содержащегося в вулканическом газе: $H_2 + S \longrightarrow H_2S$. Другой представитель кренархеот – *Sulfolobus acidocaldarius* растет при температурах до 100°C, используя энергию окисления элементарной серы молекулярным кислородом: $2S + O_2 + 2H_2O \longrightarrow 2H_2SO_4$. Очевидно, что в результате жизнедеятельности *Sulfolobus* происходит сильное подкисление среды, но это для организма только полезно, так как он растет при значениях pH 1–6. *Sulfolobus* не имеет строго определенной формы и легко ее изменяет, так как окружен только структурированным слоем гликопротеиновых субъединиц (см. рис. 1). На его поверхности присутствуют волоски – пили, при помощи которых *Sulfolobus* может прикрепляться к частичкам серы, используемой им в качестве субстрата для дыхания.

ЦАРСТВО ЭВРИАРХЕОТ

Эти организмы распространены повсеместно. Некоторые формы являются экстремально термофильными и живут около “черных курильщиков”, Это, например, *Rugosococcus fugiosus* (“яростные огненные шарики”). “Шарики” развиваются при отсутствии молекулярного кислорода за счет использования органического вещества при температурах 70–103°C. Однако представители эвриархеот обнаружены и в арктической тундре и даже Антарктиде.

К эвриархеотам относится обширная группа метанобразующих архей. Как уже было отмечено, биологическое образование метана осуществляется только археями. Основным путем образования метана является окисление молекулярного водорода углекислотой – “карбонатное дыхание”: $4H_2 + CO_2 \longrightarrow CH_4 + 2H_2O$. В некоторых случаях могут быть использованы соли муравьиной и уксусной кислот, метиловый спирт и метиламины. Таким образом эти археи получают необходимую им энергию. Среди метанобразующих архей есть формы палочковидные, кокки (шарики), спиральные формы, иногда – организм образован одной клеткой, иногда многими. Строение и состав клеточных стенок очень варьируют. Метанобразующие археи широко распространены, 1,0–1,5% углерода, участвующего в круговороте углерода в биосфере, проходит через стадию метана. При образовании метана может быть использован водород вулканического происхождения. Существуют экстремально термофильные формы, развивающиеся в зонах горячих источников. Это, например, *Methanothermus fervidus*, растущий при температурах 65–97°C. Образование метана происходит в осадках морей и пресноводных водоемов, болотах, почвах тундры и рисовых полей. Метанобразующие археи входят в состав кишечной микрофлоры, в частности они развиваются в отделе желудка – рубце жвачных животных. Накопление метана, хотя и незначительное, отмечено и в кишечнике человека. Метанобразующие бактерии

интенсивно синтезируют витамин B_{12} и обеспечивают им своих хозяев. Метанобразующие бактерии являются внутриклеточными симбионтами некоторых простейших, особенно развивающихся при отсутствии молекулярного кислорода.

Метанобразующие археи могут приносить практическую пользу. Так, существуют методы утилизации органических отходов в так называемых метантенках. В метантенках при высокой температуре и отсутствии молекулярного кислорода происходит сбраживание органических веществ разнообразной микрофлорой, в результате чего образуются водород и углекислота, которые и используются археями при образовании метана. Благодаря высокой температуре процессы идут с высокой интенсивностью. В литературе сообщалось, что от трупа лошади, помещенного в такой метантенк, через неделю остался один скелет. Были сконструированы также установки для получения горючего газа – метана из соломы, что, как предполагают, может обеспечить газом небольшие сельскохозяйственные поселения.

Экстремально галофильные, способные к росту в насыщенных солевых растворах археи образуют самостоятельную группу весьма своеобразных организмов, к которым относятся представители родов *Halobacterium*, *Halococcus*, *Natronobacterium*, *Natronococcus* и некоторых других. Они развиваются при концентрациях солей, превышающих 250–300 г/л. *Natronobacterium* и *Natronococcus*, кроме того, предпочитают щелочные водоемы с крайне высокими значениями pH. Внутриклеточная солевая концентрация у галофилов высока, главным образом за счет накопления ионов K^+ . Их ферменты работают при высоких солевых концентрациях, при которых аналогичные ферменты других организмов теряют активность. Галофилы существуют за счет использования органических соединений, они могут расти в присутствии молекулярного кислорода и без него. При отсутствии молекулярного кислорода и наличии света у них происходит образование так называемых пурпурных или фиолетовых мембран – это участки поверхностной мембраны клетки, содержащие пигмент родопсин, аналогичный родопсину человеческого глаза. В пурпурных мембранах за счет энергии света происходит синтез АТФ (аденозинтрифосфата), являющегося основным носителем энергии в клетках живых организмов. Эта энергия может быть использована археями для поддержания жизни, хотя существовать исключительно за счет световой энергии они не могут. Клетки некоторых галофилов содержат также другие типы родопсина – сенсорный родопсин I и II, входящий в состав рецептора света и обеспечивающий способность этих организмов при движении определенным образом ориентироваться в отношении источника света. Клетки галофилов обычно содержат также красные каротиноидные пигменты, при их массовом развитии субстрат (соль, скопления органики и т.п.) окрашивается в красный цвет.

Галофилы населяют соляные озера, например Мертвое море. Мертвое море – озеро на территории Израиля и Иордании, вода которого насыщена солями (рис. 2). Думали, что в нем нет никакой жизни, но оказалось, что Мертвое море населено археями. Археи обнаружены в соляных озерах США, Кении, в соляных (мелких водоемах для выпаривания морской воды и получения соли). Соляные озера на юге России тоже заселены галофильными археями. Известно, что раньше найденную красную соль, как соль царскую, отправляли на телегах в Москву, в Кремль. Существуют сообщения о том, что клетки галофильных архей, замурованные в окаменевшую соль при высыхании водоема, могут сохраняться в жизнеспособном состоянии в течение многих миллионов лет и, попав в благоприятные условия, начинают расти. Подобного рода данные, правда, вызывают сомнения и нуждаются в проверке.

Особую группу эвриархеот составляют кислотолюбивые археи, использующие для жизни органические соединения. Сюда относятся так называемые термоплазмы, развивающиеся в горячих и кислых вулканических источниках и лишенные клеточной стенки. Окружающая их клетки цитоплазматическая мембрана, как очевидно, обладает удивительной устойчивостью. Еще более кислотолюбив *Picrophilus*, что в переводе означает кислотолюб. Эта архея растет только при значениях pH ниже 2,2 и даже при pH около 0. Развивается она при температуре 50–55°C. Клетки этой археи, кроме цитоплазматической мембраны, окружены структурированным слоем белковых субъединиц, что, как уже было сказано, характерно для многих архей. Нужно иметь в виду, что раствор, в котором живут эти организмы, попав на кожу человека, неизбежно вызовет сильный ожог, а на платье образует дырку. Изучение архей приносит все новые свидетельства удивительной способности живых организмов приспособля-



Рис. 2. Скопления соли на берегу Мертвого моря

ваться к существованию в условиях, казалось бы для жизни непригодных.

Архе – значит древний, и на древней Земле в начальные периоды эволюции жизни археи, видимо, доминировали в биосфере и играли ведущую роль в биологических процессах трансформации элементов. В то время особенное значение имели процессы получения энергии прокариотами за счет окисления молекулярного водорода и использования в окислительно-восстановительных реакциях соединений серы. Эти вещества есть среди продуктов вулканической деятельности, и их использование микроорганизмами должно было иметь особое значение в периоды, когда органическое вещество сохранилось в биосфере еще в очень незначительном количестве. В океанических глубинах около вулканических источников типа “черных курильщиков” могла развиваться жизнь, независимая от энергии Солнца, возможность существования которой еще недавно трудно было себе представить. Влияние, которое оказали археи на эволюцию жизни на Земле, трудно оценить. Сведения об этой группе живых организмов стремительно расширяются.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Конец XX столетия характеризуется бурным развитием биологии, вступившей в эру биологии молекулярной. Достижения молекулярной биологии известны. Успехи в изучении биоразнообразия известны менее широко. Между тем выявление эволюционных ветвей живых организмов, сформировавшихся еще на заре развития жизни, выяснение особенностей организации, физиологии и экологии различных их представителей бесспорно имеют огромное общенаучное значение. Одним из основных, если не основным достижением в области изучения биоразнообразия является выявление группы архей как самостоятельного домена живых организмов. Археи, несомненно сыгравшие существенную роль в эволюции биосферы, и в наше время занимают в ней своеобразное место, обеспечивая прохождение определенных процессов круговорота веществ, являющегося необходимым условием ее существования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Громов Б.В. Цианобактерии в биосфере // Соросовский Образовательный Журнал. 1996. № 9. С. 33–39.
2. Кнорре Д.Г. Биохимия нуклеиновых кислот // Там же. № 3. С. 11–16.
3. Woese C.R., Kandler O., Wheelis M.L. Towards a Natural System for Organisms: Proposal for the Domains Archaea, Bacteria, and Eucarya // Proc. Nat. Acad. Sci. USA. 1990. Vol. 87. P. 4576–4579.

* * *

Борис Васильевич Громов, доктор биологических наук, профессор, член-корреспондент РАН, зав. кафедрой микробиологии Санкт-Петербургского государственного университета. Область научных интересов – общая и экологическая микробиология. Опубликовал более 220 научных работ, в том числе две монографии и учебные пособия “Строение бактерий” и “Экология бактерий”.