

Лекция 4. Краткий конспект

Тема: Основные группы микроорганизмов - эукариоты (грибы, водоросли, простейшие), прокариоты (бактерии, археи), вирусы.

Размеры микроорганизмов и их сравнительная характеристика

Цель: показать, как исторические и современные системы классификации (от пятицарственной до трёхдоменной) соотносятся с реальным многообразием микромира, и как размеры и клеточная организация разных групп определяют их эколого-функциональные и биотехнологические свойства.

Основные вопросы:

- Пятицарственная система Р. Уиттекера и её пределы применимости
- Переход к трём доменам: отделение архей от бактерий на основе рРНК
 - «Империя клеточных» и «империя неклеточных»: место вирусов
 - Сопоставление групп микробов по организации и размерам: бактерии, археи, грибы/дрожжи, водоросли, простейшие, вирусы
 - Биотехнологические следствия размеров и клеточного строения

Краткие тезисы:

Классическая модель пяти царств (Plantae, Animalia, Fungi, Protista, Monera) уступила место трёхдоменной системе (Bacteria, Archaea, Eukarya) благодаря сравнительной рРНК-филогенетике.

Вирусы не имеют клеточного строения; их относят к «неклеточным» агентам (по ряду авторов - отдельная «империя» или гипотетический домен Virae).

Типичные размеры: бактерии ~0,5–5 мкм (есть экстремы от 0,3 мкм до 0,75 мм); дрожжи ~5–10 мкм; многие простейшие десятки микрометров; вирусы - десятки–сотни нанометров (гигантские вирусы до ~1 мкм).

Малый размер и высокая площадь/объём у прокариот ускоряют обмен, рост и адаптацию; эукариоты обеспечивают сложные секреторные пути и посттрансляционные модификации.

История систематики микромира - это постепенный уход от преимущественно морфологического взгляда к молекулярно-филогенетическому. В середине XX века Р. Уиттекер предложил пятицарственную систему, в которой микроскопические формы

распределялись по трём «эукариотическим» царствам (растения, животные, грибы) и обобщённому царству Protista для всех одноклеточных эукариот, а все прокариоты объединялись в Monera. Такая схема была удобна для учебных целей: бактерии и так называемые «сине-зелёные водоросли» (сегодня - цианобактерии) неизменно попадали в Monera, дрожжи и микроскопические грибы — в Fungi, множество разнотипных эукариот — в Protista. Однако с конца 1960-х годов, по мере развития сравнительной рРНК-филогенетики, стало очевидно, что прокариоты не образуют единую естественную группу: наряду с «истинными» бактериями обнаружились археи - организмы, внешне схожие простотой клеточного устройства, но глубоко отличающиеся по ключевым молекулярным признакам. Сравнение последовательностей генов 16S рРНК показало, что бактерии и археи расходятся на ранних этапах эволюции и не могут адекватно описываться в едином царстве. Это привело к трёхдоменной концепции жизни - Bacteria, Archaea и Eukarya, - в которой домены понимаются как самые древние и глубоко разделившиеся линии живого мира. Для практикующего микробиолога и биотехнолога такой сдвиг не является лишь терминологическим: он предсказывает состав мембран, архитектуру клеточных стенок, особенности транскрипционно-трансляционного аппарата и, как следствие, рабочие окна условий для роста, катализа и устойчивости.

Современный взгляд нередко вводит удобную надстройку «империй»: империя клеточных организмов и империя неклеточных форм, к которым относят вирусы (а также субвирусные агенты). Вирусы лишены собственных рибосом и клеточного метаболизма, их репликация целиком опирается на клетку-хозяина; потому они не вписываются в клеточную классификацию и регулируются отдельным номенклатурным кодексом (ICTV). Часть авторов даже обсуждает гипотетический «четвёртый домен» для вирусов, но консенсусной остаётся трактовка вирусов как неклеточного мира, тесно связанного с эволюцией клеточных организмов и играющего колossalную роль в горизонтальном переносе генетического материала.

Клеточная организация задаёт функциональные границы групп. Прокариоты - бактерии и археи - не имеют мембранныго ядра; их геном обычно представлен одной кольцевой хромосомой (плюс плазмиды), локализованной в нуклеоиде, а транскрипция и трансляция пространственно сопряжены. Рибосомы 70S, относительно простые секреторные пути, быстрое бинарное деление и способность к горизонтальному переносу генов делают прокариот динамичными, экологически пластичными и технологически привлекательными для производства органических кислот, растворителей, простых ферментов и биополимеров. При этом бактерии и археи принципиально различаются по глубинным элементам химии клетки: у архей мембранные липиды построены на глицерол-изопренOIDНЫХ цепях с эфирными связями (у бактерий и эукариот — сложные эфиры жирных

кислот), клеточные оболочки могут формироваться псевдомуреином или S-слоем (вместо бактериального пептидогликана), а белковый состав рибосом и РНК-полимераз имеет «эукариотоподобные» черты. Эти особенности определяют знаменитую экстремофильность архей: галофилы выдерживают насыщенные рассолы, термофилы растут при температурах, близких к кипению, ацидофилы стабильно существуют при очень низком рН, а метаногены осуществляют энергетический метаболизм с образованием CH_4 . Отсюда прямой мост в биотехнологию: археальные ферменты нередко термо- и хемо-стабильны, пригодны для жёстких условий синтеза и ПЦР-подобных реакций; археальные мембранные устойчивы к растворителям и солям, что расширяет допустимые технологические режимы.

Эукариотические микроорганизмы - дрожжи, микроскопические грибы, водоросли и простейшие - строятся по иному принципу: ядро отделяет транскрипцию от трансляции, эндомембранный комплекс (эндоплазматический ретикулум, аппарат Гольджи) обеспечивает процессинг и сортировку белков, а митохондрии и хлоропластины вносят вклад в энергетический и пластический обмен. Такая архитектура «дороже» в смысле ресурсоёмкости и времени репликации, зато открывает возможности для получения сложных рекомбинантных белков с нужными посттрансляционными модификациями (гликозилирование, дисульфидные мостики), секреции в среду и формирования многокомпонентных метаболических путей. Дрожжи *Saccharomyces cerevisiae* стали моделью эукариотической клетки и «рабочей лошадкой» промышленного брожения, нитчатые грибы (*Aspergillus*, *Penicillium*, *Trichoderma*) - источниками органических кислот, антибиотиков и секретируемых ферментов, а микроводоросли (*Chlorella*, *Nannochloropsis*, *Chlamydomonas*) - моделями фотосинтеза и кандидатами для производства липидов, пигментов и «белка одноклеточных». Простейшие, хотя и реже используются как продуценты, важны в экотоксикологии, санитарной микробиологии и как хозяева/модели для изучения паразитизма.

Размеры организмов не сводятся к курьёзу - это фундаментальный определитель физиологии, экологии и технологий. Единица длины в бактериологии - микрометр (мкм), равный одной тысячной миллиметра. Предел разрешения невооружённого глаза - порядка 200 мкм, поэтому типичные прокариоты с размерами от 0,5 до 5 мкм невидимы без микроскопа. Хорошо изученная лабораторная модель *Escherichia coli* имеет поперечник примерно 1,1–1,5 мкм и длину 2–3 мкм; крошечные микоплазмы достигают 0,3 мкм, то есть сравнимы с крупными вирусами, а гигантские бактерии вроде *Thiomargarita namibiensis* (обнаружена в 1997 г. в прибрежных осадках Намибии) и *Epulopiscium fishelsoni* (симбионт кишечника тропических рыб) достигают сотен микрометров и даже долей миллиметра, приближаясь к пределам диффузационной поддерживаемости клетки. У эукариотических микробов «базовая линейка» смешена вверх: дрожжи - 5–10 мкм, многие

простейшие - десятки и сотни микрометров; микроводоросли варьируют от единиц до десятков микрометров в зависимости от таксона и стадии цикла. Вирусы обычно на порядки меньше: большинство бактериофагов и вирусов животных измеряются десятками-сотнями нанометров, тогда как гигантские «мимивирусы» и их родня достигают субмикронных величин.

Почему размер так важен? Во-первых, из-за соотношения площади поверхности к объёму. Малые клетки обладают большим S/V, что ускоряет транспорт субстратов и продуктов через мембранны, усиливает обмен и позволяет поддерживать высокие удельные скорости роста даже в бедных субстратом нишах - от вертикально стратифицированных морских осадков до глубинных подповерхностных микробиомов. Во-вторых, на микроуровне царит «мир низких чисел Рейнольдса»: вязкость доминирует над инерцией, диффузия и броуновское движение определяют столкновения молекул и клеток, а значит, геометрия клеток и колоний - от отдельных палочек до биоплёночных агрегатов — прямо влияет на доступность ресурсов. В-третьих, минимизация размеров выгодна паразитам и облигатным симбионтам: уменьшение генома и клетки снижает стоимость репликации и упрощает тесную ко-локализацию с хозяином. Наконец, верхняя граница размеров у свободноживущих клеток ограничивается диффузионной доставкой кислорода и питательных веществ: гигантские бактерии компенсируют это вакуолями, складчатостью мембранны, множеством геномных копий и специализированными внутриклеточными пространствами, что позволяет им обойти диффузионные ограничения.

Для технолога размер и организация клетки - это язык компромиссов. Прокариоты благодаря малым размерам допускают высокие плотности культуры и дают большие объёмы продукции в расчёте на единицу времени, но ограниченность посттрансляционных модификаций сужает спектр сложных белковых продуктов. Их небольшие клетки проще разрушать механически (гомогенизация, ультразвук), но внешняя мембрана грамотрицательных и устойчивые клеточные оболочки грамположительных диктуют разные протоколы лизиса и очистки. Эукариоты крупнее, медленнее, зачастую чувствительнее к сдвиговым нагрузкам, однако выигрывают в качестве секреции и «человеческих» модификаций белков; при этом их стенки (хитин-β-глюкан у грибов, целлюлоза или кремнезём у некоторых водорослей) требуют иных ферментных коктейлей и механических режимов. Размер клеток и агрегатов влияет на кислородоперенос (kLa), лимитирующие градиенты внутри пеллет грибов, склонность к биоплёнкам, вязкость бульона, выбор геометрии мешалки и аэрации. Вирусы и бактериофаги, несмотря на неклеточную природу, тоже «входят в технологию»: их размеры и морфология важны для конструирования систем фильтрации и стерилизации (микро-/ультрафильтрация, вирусная очистка), а высокая

специфичность связывания позволяет использовать фаги как инструменты диагностики, дисплея пептидов, типирования и потенциальной терапии.

Ещё один аспект сравнительной характеристики - фототрофность и кислородные отношения. Включение цианобактерий в домен Bacteria подчёркивает, что фотосинтез - не «привилегия» эукариот: именно цианобактерии являются важнейшими кислородными фототрофами, где размер и модульная организация колоний определяют светопоглощение и перенос электронов. У микроводорослей архитектура хлоропластов и клеточной стенки задаёт спектральную чувствительность и эффективность фиксации CO_2 , а размер клетки определяет соотношение фото- и темновых реакций, склонность к оседанию и эффективность светового перемешивания в фотобиореакторах. У простейших размеры клеток и наличие жгутиков/ресничек определяют поведение в потоках, трофические стратегии и роль в пищевых сетях, что важно для биоконтроля и моделирования микробных сообществ в аквакультуре.

Сопоставляя группы в одной рамке, полезно подчеркнуть: бактерии демонстрируют непревзойдённое метаболическое разнообразие (дыхание с альтернативными акцепторами, ферментации, хемолитотрофия), археи расширяют физико-химические «пределы возможного» и поставляют устойчивые биокатализаторы, эукариотические микроорганизмы обеспечивают сложные биосинтетические операции и секреторные продукты, а вирусы - ключевые «модули» переноса информации и инструменты молекулярной инженерии. Размеры - от нанометров до миллиметров - связывают эту функциональную мозаику в единое целое: через транспорт, кинетику, взаимодействия и технологии выделения/очистки. Поэтому современная классификация - от пятицарственной к трёхдоменной - важна не как смена названий, а как смена предсказательной мощности: она позволяет заранее выбирать продуцентов и условия, понимать ограничения и возможности каждой группы и рационально строить биопроцессы - от лабораторной колбы до промышленного ферментёра и фотобиореактора.

Вопросы для контроля изучаемого материала:

1. В чём принципиальные ограничения пятицарственной системы для микробов и что исправляет трёхдоменная модель?
2. Как различия в размерах и организации клетки отражаются на скоростях роста и стратегиях питания прокариот и эукариот?
3. Приведите примеры «микроскопических гигантов» среди бактерий и объясните, почему они — исключение из общего правила размеров.
4. Почему вирусы не включают в «клеточную» классификацию, и как это связано с их репликацией и номенклатурой?
5. Какие структурные особенности клеточных стенок у бактерий, архей и грибов важнее всего для выбора метода лизиса и очистки продукта?

Рекомендуемый список литературных источников:

1. Объекты биотехнологии: Учеб.-метод. пособие / Р. М. Турпанова, Г. Ж. Сегизбаева, Ш. Е. Арыстанова, А. М. Гаджимурадова. - Алматы: Эверо, 2020. - 420 с.
2. Чеснокова, М. Г. Биотехнологическая продукция микробного происхождения. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2020.
3. Марченко Б.И. Основы микробиологии и биотехнологии: учебное пособие. Ростов-на -Дону. – 2024. – 143 с.

СОСТАВИТЕЛЬ: к.б.н., профессор Игнатова Л.В. Алматы, 2025