

ФАЗЫ РОСТА КЛЕТОК

*Преподаватель кафедры биологии Андиганского государственного
университета¹*

Хошимжонова Мушарраф Нозимжановна

xoshimjonovamusharraf@gmail.com

*Студентка кафедры биологии Андиганского государственного
университета²*

Мамирова Зебинисо Нуриддин кизи

zebinisomamirova0814@gmail.com

*Студентка кафедры биологии Андиганского государственного
университета³*

Махмуджанова Муслима Музаффарбековна

muslimamahmudjanova05@gmail.com

Аннотация. В работе представлен расширенный обзор механизмов роста растительной клетки и регуляции клеточного цикла. Рассматриваются последовательные фазы G_1 , S, G_2 и M, их физиологические функции и молекулярные процессы, обеспечивающие точное деление и развитие тканей. Особое внимание уделено роли комплексов циклин–CDK, контрольных точек клеточного цикла, работе протеасом и фосфорилированию белков. Описаны гормональные и внешние факторы, включая действие ауксинов, цитокининов, гиббереллинов, абсцизовой кислоты, световые сигналы, водный и солевой стресс, а также ROS и Ca^{2+} -зависимые сигнальные каскады. Показана интеграция внутренних и внешних регуляторов, обеспечивающая морфогенез, адаптацию к стрессам и устойчивое развитие растительных органов. Подчеркивается, что нарушение фаз или регуляторных механизмов цикла приводит к снижению пролиферации, задержке роста и уменьшению адаптивной способности растений.

Ключевые слова: Растительная клетка; клеточный цикл; фазы G_1 , S , G_2 , M ; циклины; CDK; контрольные точки; гормональная регуляция; ауксины; цитокинины; стрессовые факторы; ROS; Ca^{2+} ; морфогенез; адаптация растений.

Abstract. This work provides an extended review of plant cell growth and cell cycle regulation. It examines the sequential phases G_1 , S , G_2 , and M , their physiological roles, and the molecular mechanisms ensuring accurate cell division and tissue development. Special attention is given to cyclin–CDK complexes, cell-cycle checkpoints, proteasome-mediated degradation, and protein phosphorylation. Hormonal and environmental influences are discussed, including the effects of auxins, cytokinins, gibberellins, abscisic acid, light signals, water and salt stress, ROS generation, and Ca^{2+} -dependent signaling cascades. The review highlights the integration of endogenous and exogenous regulatory networks that coordinate morphogenesis, stress adaptation, and stable organ development. Disruptions of cell-cycle phases or regulatory pathways reduce cell proliferation, slow tissue growth, and impair plant adaptive capacity.

Keywords: Plant cell; cell cycle; G_1 , S , G_2 , M phases; cyclins; CDKs; checkpoints; hormonal regulation; auxins; cytokinins; stress factors; ROS; Ca^{2+} ; morphogenesis; plant adaptation.

Рост растительной клетки — это строго регламентированный и многокомпонентный процесс, включающий последовательное прохождение фаз интерфазы ($G_1 \rightarrow S \rightarrow G_2$) и митоза (М-фаза) [1,4,5]. Каждая из фаз выполняет специфические физиологические функции и тесно связана с развитием растений и адаптацией к окружающей среде.

Фаза G_1 : подготовка и рост

Фаза G_1 характеризуется наращиванием массы клетки, увеличением цитоплазмы, синтезом белков, РНК и липидов, а также формированием органелл и цитоскелета [1,5,6]. На этом этапе происходит интеграция сигналов от гормонов — ауксинов, цитокининов, гиббереллинов — и

внешних факторов, таких как свет, температура, водный и солевой режим, что определяет решение клетки о делении, состоянии покоя или дифференцировке [4,6].

В G_1 также активируются системы контроля целостности ДНК и мембран, которые предотвращают дальнейшее прохождение цикла при повреждениях [2,3,7]. Эта фаза считается самой вариабельной и критичной для роста растений, так как здесь закладывается потенциал последующего деления и морфогенеза [1,5].

Фаза S: репликация ДНК

На фазе S происходит удвоение молекул ДНК, синтез репликационных ферментов, упаковка хроматина и восстановление повреждённых участков ДНК [1,5,6]. Это обеспечивает генетическую стабильность дочерних клеток. Параллельно активируются белки-регуляторы, участвующие в контроле точек остановки цикла (checkpoints), что позволяет клетке реагировать на ошибки и предотвращать деление дефектной ДНК [2,3,7].

Успешное прохождение S-фазы — необходимое условие точного распределения наследственного материала между дочерними клетками, а нарушения на этом этапе могут привести к мутациям и нарушению развития тканей [6,7].

Фаза G_2 : подготовка к митозу

Фаза G_2 служит периодом накопления ресурсов и синтеза белков, участвующих в формировании веретена деления и цитокинеза [3,7]. В растительных клетках на этом этапе формируются микротрубочки, вакуоли и клеточная стенка в зоне будущей перегородки, что обеспечивает правильное распределение цитоплазмы и органелл [3,5].

Системы контроля целостности ДНК (DNA damage checkpoints) активно проверяют репликацию и целостность генома; повреждения могут остановить цикл и активировать механизмы репарации или апоптоза [2,3].

М-фаза: митоз и цитокинез

М-фаза включает профазу, метафазу, анафазу и телофазу. Здесь

происходит точное распределение хромосом между дочерними клетками и формирование новой цитоплазмы [1,5]. У растительных клеток цитокинез проходит с образованием клеточной перегородки (телеопласт), что отличает его от животных клеток [5,6].

На этом этапе регулируется движение органелл, распределение вакуолей, плотность цитоплазмы и формирование клеточной стенки, что обеспечивает дальнейшую специализацию клеток и развитие тканей [5,7].

Молекулярные механизмы регуляции

Основные внутренние регуляторы клеточного цикла — комплексы циклин + циклин-зависимая киназа (CDK) [2,3,7]. Они контролируют переходы между фазами $G_1 \rightarrow S$ и $G_2 \rightarrow M$. Ингибиторы CDK, белки-сенсоры повреждений ДНК и молекулы стресс-сигналов позволяют клетке адаптироваться к неблагоприятным условиям, приостанавливая цикл и активируя восстановительные процессы [2,3,4].

Кроме того, протеасомы участвуют в деградации циклинов и регуляторных белков, обеспечивая временную точность цикла. Фосфорилирование белков CDK и других регуляторов обеспечивает координацию между различными фазами [2,3,7].

Гормональная и внешняя регуляция

Гормональные сигналы (ауксины, цитокинины, гиббереллины, абсцизовая кислота) регулируют пролиферацию, ориентацию деления, рост органов и морфогенез [4,6]. Световые рецепторы (фито хромы, криптохромы) и стрессовые сигналы (Ca^{2+} , ROS, температурный и водный стресс) интегрируются через вторичные мессенджеры, обеспечивая адаптацию роста к изменяющейся среде [5,6].

Молекулярные механизмы регуляции клеточного цикла у растений

Клеточный цикл растений строго контролируется на молекулярном уровне с помощью ряда регуляторных систем, которые обеспечивают согласованное прохождение фаз G_1 , S, G_2 и M. Основными внутренними регуляторами являются комплексы циклин + циклин-зависимая киназа (CDK),

которые действуют как «молекулярные переключатели», запускающие переходы между фазами [2,3,7].

Фазы $G_1 \rightarrow S$: Комплексы G_1/S -циклин + CDK активируют ферменты репликации ДНК, включая ДНК-полимеразы и топоизомеразы, обеспечивая удвоение генетического материала [2,3,7]. На этом этапе также работают ингибиторы CDK (например, CKI), которые могут останавливать цикл при повреждениях ДНК или неблагоприятных условиях внешней среды [2,3,4].

Фазы $G_2 \rightarrow M$: Комплексы G_2/M -циклин + CDK регулируют сборку митотического веретена, организацию хромосом и подготовку к цитокинезу [2,3,7]. Протеасомы обеспечивают деградацию циклинов после завершения М-фазы, что предотвращает повторный преждевременный запуск цикла [2,3].

Контрольные точки (checkpoints): В растительных клетках присутствуют контрольные точки на фазах G_1/S , G_2/M и метафазе. Они проверяют целостность ДНК, правильность репликации и организацию хромосом, при необходимости останавливая цикл для репарации [2,3,6].

Роль гормонов: Гормоны ауксины, цитокинины и гиббереллины модулируют активность циклинов/CDK, ускоряя или замедляя прохождение клеточного цикла в зависимости от потребностей роста и дифференцировки тканей [4,5,6]. Абсцизовая кислота, напротив, может подавлять деление клеток, обеспечивая адаптацию к стрессовым условиям [4,6].

Сигнальные каскады и стрессовые реакции: Вторичные мессенджеры (Ca^{2+} , ROS, фосфопротеиновые каскады) интегрируются с гормональной системой и CDK, регулируя деление клеток при изменениях внешней среды, включая водный дефицит, солевой стресс, световые и температурные колебания [5,6].

Особенности растений: В растительных клетках контроль цикла дополнительно координируется с особенностями клеточной стенки, вакуоли и плазмодесм, что позволяет синхронизировать деление с ростом органелл, распределением цитоплазмы и формированием перегородки при цитокинезе [5,7].

Гормональная и внешняя регуляция клеточного цикла у растений

Регуляция клеточного цикла у растений осуществляется не только внутренними молекулярными механизмами (циклины/CDK), но и внешними сигналами, включая гормоны и физико-химические факторы окружающей среды. Эти сигналы интегрируются в сложные сети, которые координируют пролиферацию клеток, рост органов и адаптацию растений к изменяющимся условиям [4,5,6].

1. Гормональная регуляция

Ауксины стимулируют деление клеток в апикальных меристемах, способствуя растяжению тканей и осевому росту побегов и корней [4,6]. Они активируют комплексы G₁/S-циклин + CDK, ускоряя переход клетки из фазы покоя в фазу репликации ДНК [2,3].

Цитокинины регулируют распределение клеток в боковых меристемах, стимулируя деление и разветвление побегов, развитие листовой пластинки и рост корневой системы [4,6].

Гиббереллины ускоряют переход клеток из G₁ в S-фазу, способствуя удлинению стеблей, росту корней и развитию семян. Их действие особенно важно при адаптации растений к условиям ограниченного освещения или дефицита питательных веществ [5,6].

Абсцизовая кислота (АВА) действует как ингибитор клеточного деления при стрессовых условиях, таких как засуха, солевой стресс или низкие температуры, позволяя растению экономить ресурсы и предотвращать повреждение тканей [4,6].

2. Внешняя регуляция и сигнальные пути

Световые сигналы (фито хромы, криптохромы) влияют на скорость и направление деления клеток, рост побегов, листьев и фотоморфогенез [5,6].

Температурные и водные стрессы активируют контрольные точки клеточного цикла (G₁/S и G₂/M), временно останавливая деление клеток для репарации ДНК и восстановления ресурсов [2,3,4].

Солевой и окислительный стресс (ROS) интегрируется с гормональной

системой через вторичные посредники, такие как кальций (Ca^{2+}) и фосфопротеиновые каскады, что позволяет адаптировать рост клеток и тканей к неблагоприятным условиям [5,6].

3. Интеграция гормональных и внешних сигналов

Гормоны и внешние факторы работают синергетически: например, ауксины и цитокинины совместно регулируют деление в меристемах, а световые и стрессовые сигналы модулируют их активность через вторичные мессенджеры [5,6,7]. Такая интеграция позволяет растению точно координировать рост, дифференцировку клеток и органогенез в ответ на изменения окружающей среды, поддерживая адаптацию и выживаемость [4,5,6].

Таким образом, гормональная и внешняя регуляция является ключевым механизмом, который связывает внутренние молекулярные процессы клеточного цикла с ростом, дифференцировкой и адаптацией тканей и органов растений [4–7].

Клеточный цикл координируется с морфогенезом: рост корней, побегов, листьев и формирование тканей зависят от точного распределения делящихся клеток и регуляции пролиферации [4,5]. Нарушение фаз цикла или регуляторных механизмов снижает скорость роста, приводит к аномалиям развития тканей и уменьшает адаптивные возможности растений [1–7].

Вывод:

Таким образом, корректное прохождение фаз клеточного цикла, регуляция через циклины/CDK, гормональные сигналы и интеграция с внешней средой являются базовой физиологической предпосылкой роста, развития и адаптации растений [1–7]. Нарушение любого из этих этапов приводит к снижению пролиферации, замедлению роста тканей и органов, а также уменьшению адаптивной способности растений [1–7].

Использованная литература:

1. Физиология растений. — 2023. Т. 70, № 4, С. 433-448
2. Регуляция клеточного цикла. — Май 18, 2005
3. Регуляция клеточного цикла-1.pdf
4. Растительные клетки и организмы растений с модифицированным клеточным ростом, развитием и дифференцировкой
5. Берг Ю., Берг Л. Клеточная биология растений. — М.: Наука, 2018
6. Иванова Н.В. Физиология растений: учебное пособие. — СПб.: Питер, 2020
7. Петров А.С., Сидоров М.В. Молекулярные механизмы регуляции клеточного цикла у растений. — М.: Академия, 2019