Лекция 8. Минеральное питание растений

Кафедра биотехнологии, КазНУ имени аль-Фараби
проф. д.б.н. Кенжебаева С.С.

Цель лекции. Ожидаемые результаты обучения

Цель лекции

Сформировать у студентов представление о физиологических и молекулярных механизмах минерального питания растений, роли макро- и микроэлементов, процессах поглощения, транспорта и ассимиляции минеральных веществ, а также регуляции минерального гомеостаза.

Ожидаемые результаты обучения

1. Характеризовать сущность минерального питания и физиологические функции основных макро- и микроэлементов.
2. Объяснять механизмы поглощения минеральных ионов корневой системой.
3. Описывать роль мембранных транспортёров, ионных каналов и H^+-АТФазы в минеральном питании.
4. Характеризовать транспорт и перераспределение минеральных элементов по ксилеме и флоэме.
5. Объяснять основные процессы ассимиляции азота и серы в растениях.
6. Анализировать признаки дефицита и избытка элементов минерального питания и механизмы поддержания ионного гомеостаза.

план лекции

1. Минеральное питание растений: сущность и физиологическое значение.
2. Макро- и микроэлементы: классификация и основные функции.
3. Корневая система и поглощение минеральных веществ.
4. Пассивный и активный транспорт ионов через мембраны.
5. Мембранные транспортёры и молекулярная регуляция минерального питания.
6. Дальний транспорт и перераспределение минеральных элементов.
7. Ассимиляция азота и серы.
8. Дефицит и токсичность минеральных элементов. Минеральный гомеостаз.

Минеральное питание растений: сущность и основные особенности

Минеральное питание растений — совокупность процессов поглощения, транспорта, ассимиляции и использования минеральных элементов, необходимых для роста, развития и жизнедеятельности растительного организма.

Основные особенности:

1. Минеральные элементы поступают преимущественно из почвенного раствора через корневую систему.
2. Поглощение осуществляется в форме неорганических ионов, а также некоторых растворённых молекулярных соединений.
3. Минеральные элементы входят в состав органических соединений и участвуют в регуляции метаболических процессов.
4. Потребность в отдельных элементах зависит от вида растения, стадии развития и условий окружающей среды.
5. Поглощение и распределение элементов регулируются мембранными транспортными системами.

Минеральные элементы почвенного раствора

Поглощение корнями

Транспорт и распределение по органам

Ассимиляция и участие в метаболизме

Главный вывод: минеральное питание обеспечивает растения необходимыми элементами для построения клеточных структур, функционирования ферментов и поддержания физиологических процессов.

Физиологическое значение минерального питания

Минеральные элементы выполняют структурные, каталитические, энергетические и регуляторные функции в растительном организме.

Физиологическая функция	Примеры элементов
Структурная — формирование белков, нуклеиновых кислот, мембран	N, P, S
Фотосинтетическая — синтез хлорофилла, перенос электронов	Mg, Fe, Mn, Cu
Энергетическая — участие в реакциях переноса энергии	P, Mg
Ферментативная — активация ферментов и каталитические функции	Mg, Zn, Mn, Fe
Осморегуляторная — поддержание тургора и ионного баланса	K, Cl

Физиологическое значение:

1. Обеспечивает рост и формирование органов растения.
2. Поддерживает фотосинтез, дыхание и биосинтез органических веществ.
3. Участвует в регуляции водного обмена и стрессовых реакций.
4. Определяет продуктивность растений и качество урожая.

Главный вывод: сбалансированное минеральное питание является необходимым условием нормального метаболизма, роста и продуктивности растений.

Основные закономерности минерального питания растений

Минеральное питание представляет собой избирательный и регулируемый процесс, зависящий от доступности элементов и физиологической потребности растения.

Основные закономерности

1. Избирательность поглощения — растения регулируют поступление различных ионов с помощью специализированных транспортных белков.

2. Незаменимость элементов — каждый эссенциальный элемент выполняет определённые функции и не может быть полностью заменён другим.

3. Взаимодействие элементов — минеральные вещества могут проявлять антагонизм или синергизм при поглощении и использовании.

4. Зависимость от условий среды — pH, температура, влажность, аэрация и состав почвенного раствора влияют на доступность и поглощение элементов.

5. Физиологическая регуляция — интенсивность поглощения и перераспределения элементов зависит от потребностей растущих органов и стадии развития растения.

Принцип лимитирующего фактора

Закон минимума Либиха

Рост и продуктивность растений могут ограничиваться тем необходимым элементом питания, доступность которого наиболее недостаточна относительно потребности растения.

Даже при достаточном обеспечении другими элементами дефицит одного необходимого элемента способен ограничивать рост.

Главный вывод: эффективность минерального питания определяется не только количеством элементов, но и их доступностью, сбалансированностью и способностью растения регулировать их поглощение.

Классификация минеральных элементов растений

Минеральные элементы — химические элементы, необходимые растениям для построения клеточных структур, осуществления метаболизма и регуляции физиологических процессов.

По количественной потребности растения элементы подразделяются на макроэлементы и микроэлементы.

- C, H и O также относятся к макроэлементам, но поступают преимущественно из CO_2 и H_2O.
- Некоторые элементы (Si, Na, Co, Se) могут быть полезными для определённых видов растений или в отдельных условиях.
- Незаменимость элемента определяется его физиологической функцией, а не количеством в тканях.

Макро- и микроэлементы различаются по количественной потребности, но обе группы необходимы для нормального роста и развития растений.

Группа	Элементы	Особенности
Макроэлементы	N, P, K, Ca, Mg, S	Необходимы в относительно больших количествах
Микроэлементы	Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo, Cl, Ni	Необходимы в малых количествах, но незаменимы

Макроэлементы: основные физиологические функции

Элемент	Основные функции
Азот (N)	Компонент аминокислот, белков, нуклеиновых кислот и хлорофилла
Фосфор (P)	Компонент АТФ, нуклеиновых кислот и фосфолипидов; энергетический обмен
Калий (K)	Осморегуляция, работа устьиц, активация ферментов
Кальций (Ca)	Стабилизация клеточных стенок и мембран, внутриклеточная сигнализация
Магний (Mg)	Центральный атом хлорофилла, кофактор ферментов, взаимодействие с АТФ
Сера (S)	Компонент цистеина, метионина, глутатиона и ряда коферментов

Физиологическое значение

1. Обеспечивают формирование клеточных структур и биомолекул.
2. Участвуют в фотосинтезе, дыхании и биосинтетических реакциях.
3. Регулируют водный обмен, рост и развитие растений.

Макроэлементы обеспечивают структурную организацию, энергетический обмен и основные физиологические функции растительного организма.

Микроэлементы: основные физиологические функции

Элемент	Основные функции
Железо (Fe)	Перенос электронов в фотосинтезе и дыхании, функционирование Fe-содержащих белков
Марганец (Mn)	Участие в фотолизе воды в фотосистеме II, активация ферментов
Цинк (Zn)	Кофактор ферментов, регуляция экспрессии генов и белкового обмена
Медь (Cu)	Компонент пластоцианина и цитохром-с-оксидазы, окислительно-восстановительные реакции
Бор (B)	Формирование и стабилизация клеточных стенок, рост меристем
Молибден (Mo)	Кофактор нитратредуктазы и других молибденсодержащих ферментов
Хлор (Cl)	Осмотический баланс, функционирование фотосистемы II

Особенности микроэлементов:

1. Многие входят в состав активных центров ферментов.
2. Участвуют в электронном транспорте и регуляции метаболизма.
3. Для ряда микроэлементов диапазон между дефицитом и токсичностью относительно узок.

Микроэлементы необходимы прежде всего для функционирования ферментов, электрон-транспортных систем и регуляторных механизмов клетки.

Биологическая доступность и взаимодействие минеральных элементов

Биологическая доступность минеральных элементов — способность элементов поступать из окружающей среды в растение в формах, пригодных для поглощения и использования.

Основные факторы доступности

1.pH почвы — влияет на растворимость и химические формы минеральных элементов.
2.Влажность и аэрация — определяют подвижность ионов и условия работы корневой системы.
3.Органические вещества и микроорганизмы — участвуют в мобилизации и трансформации элементов.
4.Взаимодействие ионов может изменять эффективность поглощения отдельных элементов.

Примеры взаимодействий

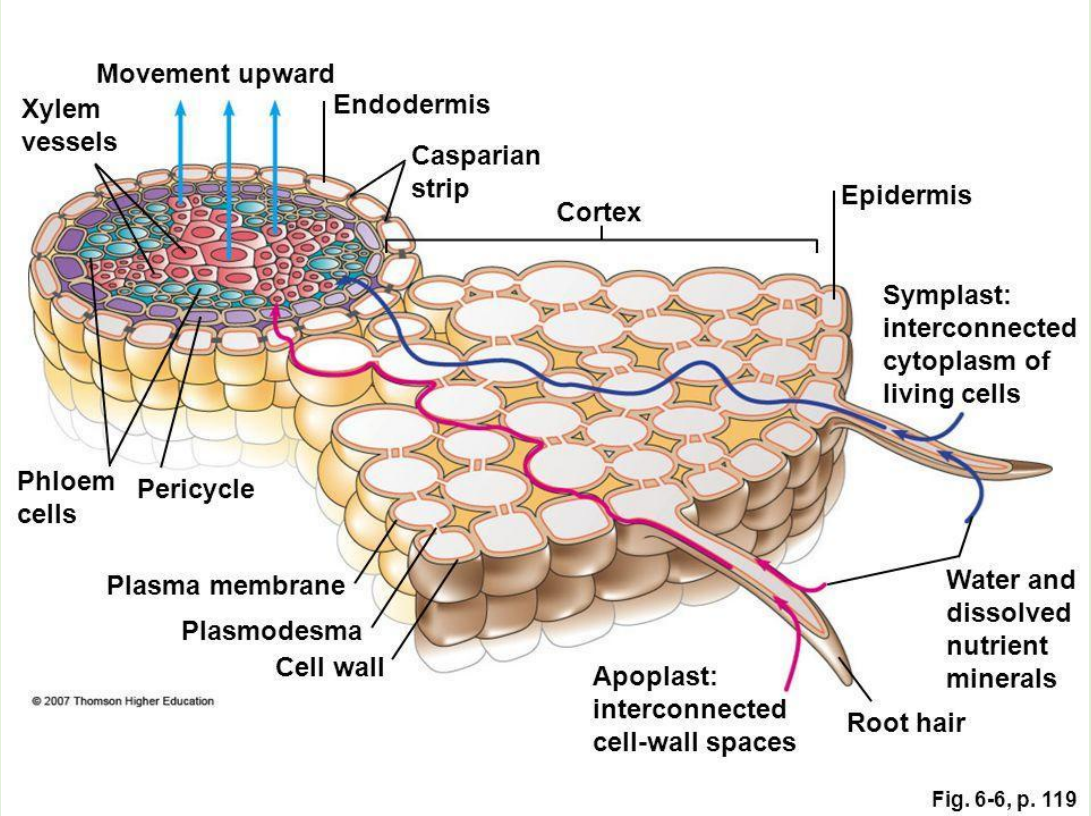
Взаимодействие	Возможный результат
Избыток K^+	Снижение поглощения Mg^{2+}
Избыток фосфатов	Уменьшение доступности Zn
Повышение pH почвы	Снижение доступности Fe и Mn
Микоризный симбиоз	Улучшение поглощения P и некоторых других элементов

Корневая система как орган минерального питания

Корневая система — основной орган поглощения воды и минеральных веществ из почвы, обеспечивающий их поступление в надземные органы растения.

Основные особенности поглощения:

1. Корневые волоски увеличивают площадь контакта корня с почвенным раствором.
2. Ризодерма обеспечивает первичное поступление минеральных ионов.
3. Кора корня участвует в радиальном транспорте воды и растворённых веществ.
4. Эндодерма регулирует поступление ионов в центральный цилиндр.
5. Ксилема обеспечивает транспорт минеральных веществ к надземным органам.



Строение корня обеспечивает эффективное поглощение, избирательный транспорт и распределение минеральных элементов.

Ризосфера и её роль в минеральном питании растений

Ризосфера — зона почвы, непосредственно прилегающая к корням растений, в которой происходят интенсивные физико-химические и биологические взаимодействия.

Основные процессы в ризосфере

1. Изменение pH — выделение H^+ или OH^-/HCO_3^- корнями влияет на растворимость минеральных соединений.
2. Корневые экссудаты — органические кислоты и другие соединения могут способствовать мобилизации элементов.
3. Микробиологическая активность — микроорганизмы участвуют в минерализации органических веществ и превращении соединений азота и фосфора.
4. Микоризный симбиоз — грибные гифы увеличивают объём почвы, доступный для поглощения питательных веществ, особенно фосфора.
5. Ризосферные взаимодействия — влияют на доступность Fe, Zn, P и других элементов.

Корень растения

Экссудаты, H^+, взаимодействие с микроорганизмами

Ризосфера

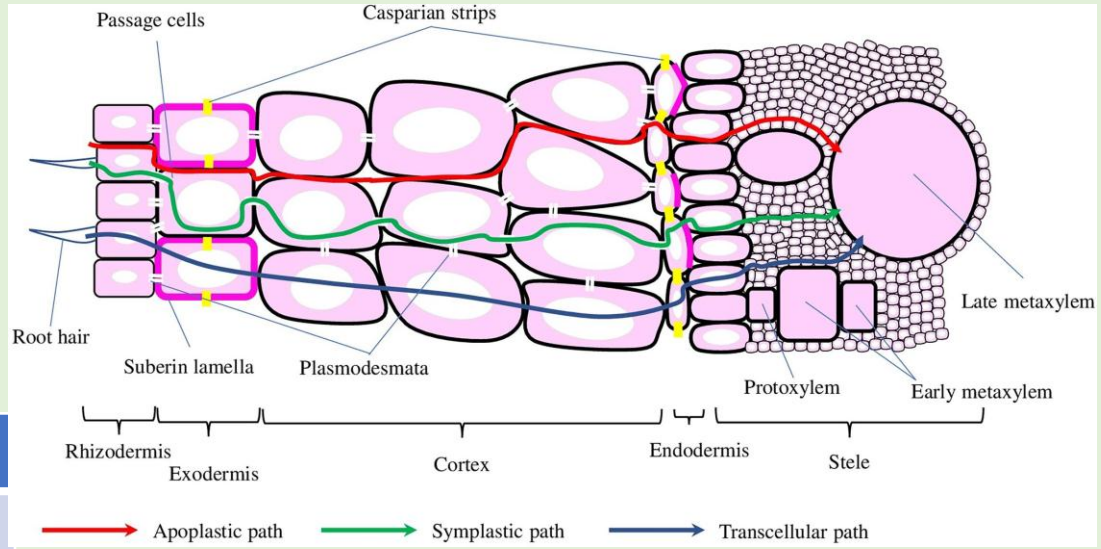
Изменение pH • мобилизация элементов • микробная активность

Доступные формы минеральных элементов возрастают

Ризосфера представляет собой динамическую систему, регулирующую доступность минеральных элементов и эффективность их поглощения корнями.

Пути поступления минеральных веществ в корень

Минеральные вещества перемещаются от поверхности корня к центральному цилиндру по нескольким взаимосвязанным путям.



Путь транспорта	Основные особенности
Апопластический	Передвижение по клеточным стенкам и межклеточным пространствам без пересечения плазматической мембраны на каждом этапе
Симпластический	Перемещение через цитоплазму соседних клеток, соединённых плазмодесмами
Трансмембранный	Последовательное пересечение клеточных мембран при перемещении между клетками

Роль эндодермы

1. Пояски Каспари блокируют свободное апопластическое перемещение через эндодерму.
2. Для дальнейшего поступления в центральный цилиндр вещества должны пересечь клеточную мембрану.
3. Мембранные транспортные системы обеспечивают избирательность поглощения ионов.
4. После поступления в стелу минеральные элементы могут загружаться в ксилему.

Радиальный транспорт минеральных элементов регулируется анатомическими барьерами корня и мембранными транспортными системами.

Пассивный транспорт ионов и электрохимический градиент

Пассивный транспорт ионов — перемещение ионов через мембрану по электрохимическому градиенту без непосредственных затрат энергии АТФ.

Основные особенности:

- Осуществляется преимущественно через специализированные ионные каналы и переносчики.
- Зависит от концентрации ионов по обе стороны мембраны.
- Определяется электрическим потенциалом мембраны и зарядом иона.
- Может обеспечивать поступление или выход ионов из клетки.
- Не позволяет перемещать ионы против их электрохимического градиента.

Электрохимический градиент объединяет химическую и электрическую составляющие движущей силы переноса ионов.

- $\Delta\mu = RT \ln C_{in}/C_{out} + zF(\varphi_{in} - \varphi_{out})$
- где R — газовая постоянная; T — абсолютная температура; C — концентрация иона; z — заряд иона; F — постоянная Фарадея; φ — электрический потенциал.

Формула выражает изменение электрохимического потенциала при переносе иона снаружи внутрь клетки; для разбавленных растворов используются концентрации вместо активностей.

Пример: поступление K^+ через входящие калиевые каналы корневых клеток при благоприятном электрохимическом градиенте.

Главный вывод: направление пассивного транспорта определяется совместным действием концентрационного градиента и мембранного потенциала.

Активный транспорт и роль H^+-АТФазы

Активный транспорт — перенос веществ против их электрохимического градиента с использованием энергии.

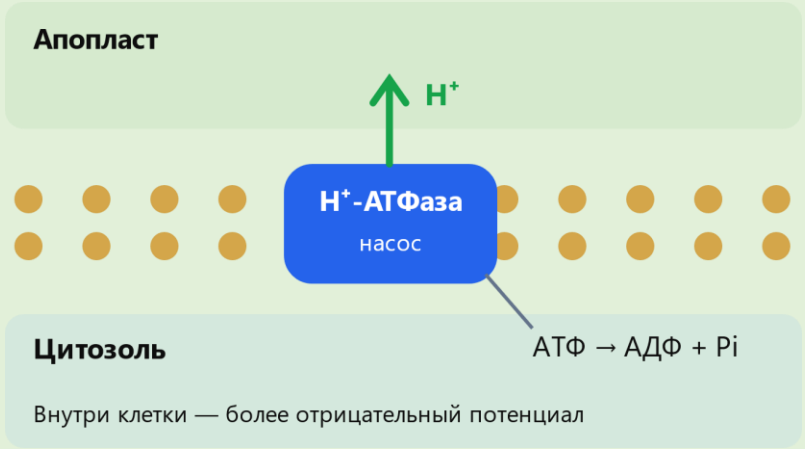
Основные механизмы

1. Первично-активный транспорт — непосредственное использование энергии гидролиза АТФ.
2. Вторично-активный транспорт — использование энергии электрохимического градиента, созданного первичными насосами.

- Плазматическая H^+-АТФаза — ключевой фермент, обеспечивающий энергетическую основу поглощения многих минеральных элементов корнями.

Физиологическое значение H^+-АТФазы

- Создаёт протонный электрохимический градиент.
- Способствует формированию отрицательного мембранного потенциала внутри клетки.
- Обеспечивает энергетическую основу H^+-сопряжённого транспорта нитратов, фосфатов и других веществ.
- Участвует в регуляции ионного гомеостаза и pH цитозоля.
- Главный вывод: H^+-АТФаза создаёт движущую силу для вторично-активного поглощения минеральных веществ растительными клетками.



Упрощённая схема: H^+-АТФаза переносит протоны из цитозоля в апопласт, используя энергию АТФ.

Ионные каналы, переносчики и сопряжённый транспорт

Мембранные транспортные белки обеспечивают избирательное перемещение минеральных ионов через биологические мембраны.

Тип транспортной системы	Механизм	Примеры
Ионные каналы	Пассивное движение ионов по электрохимическому градиенту	Калиевые каналы K^+
Переносчики	Избирательный перенос ионов с изменением конформации белка	IRT1, некоторые NPF/NRT
Симпорт	Сопряжённое перемещение двух веществ в одном направлении	H^+/NO_3^-, $H^+/H_2PO_4^-$
Антипорт	Сопряжённое перемещение веществ в противоположных направлениях	Na^+/H^+

Особенности сопряжённого транспорта:

1. Энергия протонного градиента используется для переноса других веществ.
2. Симпорт H^+ с минеральными ионами обеспечивает поглощение ряда питательных элементов.
3. Антипорт участвует в регуляции ионного состава, pH и устойчивости к солевому стрессу.

Главный вывод: ионные каналы и переносчики совместно обеспечивают избирательное поглощение, распределение и поддержание гомеостаза минеральных элементов.

Молекулярная регуляция минерального питания растений

Молекулярная регуляция минерального питания — система механизмов, обеспечивающих избирательное поглощение, транспорт, распределение и поддержание оптимального содержания минеральных элементов в растении.

Основные механизмы:

1. Мембранные транспортёры — регулируют поступление ионов в клетки и их перемещение между тканями.
2. Регуляция экспрессии генов — изменяет количество транспортных белков в зависимости от доступности элементов.
3. Сигнальные системы — передают информацию о минеральном статусе растения.
4. Посттрансляционная регуляция — изменяет активность, локализацию и стабильность транспортёров.
5. Минеральный гомеостаз — поддерживает баланс поглощения, использования, накопления и перераспределения элементов.

Изменение доступности минеральных элементов

↓

Сигнальные и регуляторные механизмы

↓

Изменение экспрессии и активности транспортёров

↓

Поглощение и перераспределение элементов

↓

Молекулярная регуляция позволяет растениям адаптировать минеральное питание к изменяющимся условиям среды и физиологическим потребностям.

Транспортёры азота: NPF/NRT и AMT

Азот поступает в растения преимущественно в форме нитратов (NO_3^-) и аммония (NH_4^+).

Физиологическая регуляция:

- При недостатке азота может усиливаться экспрессия высокоаффинных транспортных систем.
- Нитраты выступают не только источником питания, но и сигнальными молекулами.
- Активность транспортёров зависит от концентрации азота, углеродного метаболизма и потребностей растения.
- Избыточное накопление аммония может вызывать токсические эффекты.

Главный вывод: транспортёры NPF/NRT и AMT обеспечивают регулируемое поглощение основных неорганических форм азота.

Семейство транспортёров	Основные функции
NPF (NRT1/PTR)	Транспорт нитратов и ряда других соединений; некоторые белки участвуют в восприятии нитратного сигнала
NRT2	Преимущественно высокоаффинное поглощение NO_3^-, часто совместно с NAR2/NRT3
AMT	Поглощение и транспорт NH_4^+/NH_3 через клеточные мембраны
Семейство транспортёров	Основные функции
NPF (NRT1/PTR)	Транспорт нитратов и ряда других соединений; некоторые белки участвуют в восприятии нитратного сигнала

Транспортёры фосфора: семейство PHT

Фосфор поглощается корнями преимущественно в форме неорганического фосфата (Pi), главным образом $H_2PO_4^-$ и HPO_4^{2-}.

PHT1 — семейство плазматических мембранных транспортёров, обеспечивающих поступление фосфата в клетки растений.

Основные функции PHT1

- Поглощение неорганического фосфата корневыми клетками.
- H^+-сопряжённый транспорт Pi через плазматическую мембрану.
- Участие отдельных представителей семейства в распределении фосфора между тканями.
- Обеспечение фосфорного питания при низкой доступности Pi в почве.

Регуляция фосфатного питания

- Дефицит Pi активирует фосфатный голодный ответ.
- Транскрипционные факторы PHR и сигнальные компоненты SPX участвуют в регуляции фосфатного гомеостаза.
- Микоризные ассоциации обеспечивают дополнительный путь поступления фосфора.

Дефицит Pi → сигнальный ответ → регуляция PHT1 → усиление поглощения фосфата

Главный вывод: семейство PHT1 играет ключевую роль в фосфатном питании растений и адаптации к недостатку доступного фосфора.

Транспортёры железа и цинка: IRT1 и ZIP

Железо (Fe) и цинк (Zn) — необходимые микроэлементы, участвующие в ферментативных реакциях, электронном транспорте и регуляции метаболизма.

Особенности регуляции

- Дефицит Fe и Zn изменяет экспрессию соответствующих транспортных генов.
- Доступность железа зависит от pH и окислительно-восстановительных условий почвы.
- У злаков, включая пшеницу, важную роль в поглощении Fe играет стратегия II — выделение фитосидерофоров и поглощение комплексов Fe(III) с ними через YS1/YSL-подобные транспортёры.
- Внутриклеточное распределение металлов регулируется системами транспорта, хелатирования и депонирования.

Главный вывод: транспортёры IRT1, ZIP, YSL и VIT участвуют в поглощении, распределении и поддержании гомеостаза Fe и Zn; конкретные механизмы зависят от вида растения.

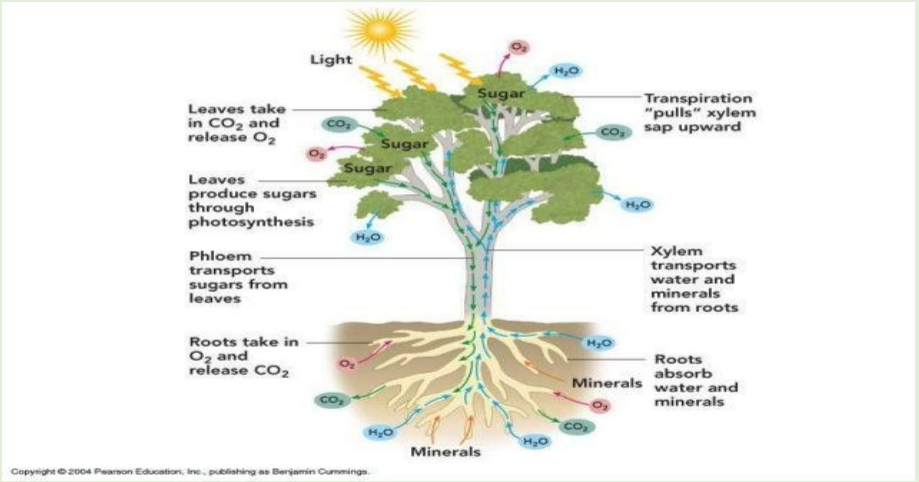
Транспортёр / семейство	Основные функции
IRT1	Поглощение Fe^{2+} корнями у растений со стратегией I; может переносить другие двухвалентные металлы
ZIP	Транспорт Zn^{2+} и некоторых других двухвалентных металлов
YSL	Перемещение комплексов металлов с никотианамином и родственными хелаторами
VIT	Транспорт железа в вакуоль и участие в его внутриклеточном распределении
Транспортёр / семейство	Основные функции

Дальний транспорт минеральных элементов по ксилеме

Ксилемный транспорт — перемещение воды и растворённых минеральных веществ преимущественно от корней к надземным органам растения.

Основные механизмы

1. Загрузка ионов в ксилему — перенос минеральных веществ из клеток центрального цилиндра в сосудистую систему.
2. Транспирационный поток — основной движущий фактор восходящего транспорта воды и растворённых веществ.
3. Корневое давление — может способствовать движению ксилемного сока при определённых условиях.
4. Регуляция состава ксилемного сока — обеспечивается работой транспортёров и обменом веществ между ксилемой и окружающими клетками.



Особенности:

•По ксилеме транспортируются NO_3^-, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+} и другие минеральные вещества.

•Некоторые элементы перемещаются в форме комплексов с органическими соединениями.

•Интенсивность транспорта зависит от транспирации, водного режима и физиологического состояния растения.

Главный вывод: ксилема обеспечивает преимущественно восходящее перемещение минеральных элементов и связывает корневое питание с метаболизмом надземных органов.

Транспорт и перераспределение минеральных элементов по флоэме

Флоэмный транспорт — перемещение органических веществ и мобильных минеральных элементов между органами-источниками и органами-потребителями.

Основные особенности

- Направление транспорта определяется отношениями «источник — потребитель».
- Минеральные элементы могут перемещаться из зрелых листьев к молодым органам, семенам и плодам.
- Подвижность отдельных элементов во флоэме существенно различается.
- Перераспределение элементов особенно важно при старении листьев и формировании урожая.

Элементы	Характеристика флоэмной подвижности
N, P, K, Mg	Обычно относительно высокая
Ca	Очень низкая
Fe, Zn	Зависит от химической формы, хелатирования и транспортных механизмов
Элементы	Характеристика флоэмной подвижности
N, P, K, Mg	Обычно относительно высокая

Сравнение ксилемного и флоэмного транспорта

Главный вывод: совместная работа ксилемы и флоэмы обеспечивает поступление, распределение и повторное использование минеральных элементов в растительном организме.

Ксилема	Флоэма
Преимущественно восходящий поток	Транспорт между источниками и потребителями
Основной движущий механизм — транспирационный поток	Основной механизм — градиент тургорного давления
Перенос воды и минеральных веществ	Перенос ассимилятов и мобильных минеральных элементов

Ассимиляция азота: восстановление нитратов

Ассимиляция азота — совокупность процессов превращения поглощённого неорганического азота в органические азотсодержащие соединения.

Основные этапы восстановления нитратов:

1. Поглощение NO_3^- — осуществляется корневыми клетками с участием нитратных транспортёров.
2. Восстановление нитрата до нитрита — катализируется нитратредуктазой (NR) в цитозоле.
3. Восстановление нитрита до аммония — осуществляется нитритредуктазой (NiR) преимущественно в пластидах.
4. Включение NH_4^+ в органические соединения — происходит главным образом через систему GS/GOGAT.

Физиологическое значение:

- Обеспечивает синтез аминокислот и белков.
- Связывает минеральное питание с фотосинтезом и энергетическим обменом.
- Регулируется обеспеченностью азотом, светом и углеродными скелетами.

Главный вывод: восстановление нитратов обеспечивает образование аммония, который далее включается в органические соединения.

NO_3^- — нитрат

⬇

Нитратредуктаза (NR), цитозоль

⬇

NO_2^- — нитрит

⬇

Нитритредуктаза (NiR), пластиды

⬇

NH_4^+ — аммоний

GS/GOGAT

Аминокислоты → белки и другие соединения азота

Ассимиляция аммония: цикл GS/GOGAT

Цикл GS/GOGAT — основной путь включения аммонийного азота в аминокислоты растений.

Основные реакции

1. Глутаминсинтетаза (GS)

Глутамат + NH4 + ATP → Глутамин + ADP + P

2. Глутаматсинтаза (GOGAT)

Глутамин + 2-оксоглутарат + восстановитель → 2 Глутамата

В зависимости от изоформы GOGAT восстановителем служит ферредоксин или NADH.Физиологическое значение:

Обеспечивает первичную ассимиляцию NH_4^+ и повторное включение аммония, образующегося в метаболизме.

Формирует глутамин и глутамат — ключевые доноры азота для синтеза других аминокислот.

Связывает азотный обмен с циклом трикарбоновых кислот через 2-оксоглутарат.

Система GS/GOGAT является центральным механизмом ассимиляции аммония и формирования органических азотсодержащих соединений.

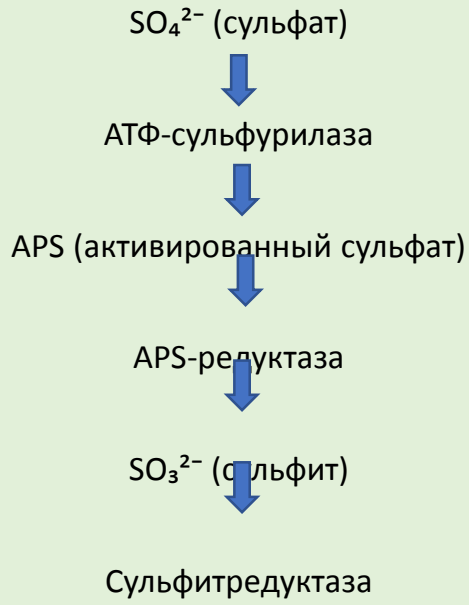
Фермент	Основная функция
Глутаминсинтетаза (GS)	Включает NH_4^+ в глутамат с образованием глутамина; использует АТФ
Глутаматсинтаза (GOGAT)	Переносит амидный азот глутамина на 2-оксоглутарат с образованием глутамата
Фермент	Основная функция
Глутаминсинтетаза (GS)	Включает NH_4^+ в глутамат с образованием глутамина; использует АТФ

Ассимиляция серы в растениях

Ассимиляция серы — превращение поглощённого сульфата (SO_4^{2-}) в восстановленные соединения серы, прежде всего цистеин.

Основные этапы

1. Поглощение сульфатов — осуществляется с участием мембранных транспортёров SULTR.
2. Активация сульфата — образование аденозин-5’-фосфосульфата (APS) при участии АТФ-сульфурилазы.
3. Восстановление APS — образование сульфита (SO_3^{2-}) с участием APS-редуктазы.
4. Восстановление сульфита — образование сульфида с участием сульфитредуктазы.
5. Синтез цистеина — включение сульфида в О-ацетилсерин с образованием цистеина.



Сульфид → цистеин

Метионин, глутатион, белки и другие соединения серы

Физиологическое значение:

1. Обеспечивает синтез серосодержащих аминокислот.
2. Участвует в образовании белков, коферментов и глутатиона.
3. Поддерживает антиоксидантную защиту и клеточный редокс-гомеостаз.

Главный вывод: ассимиляция серы обеспечивает образование органических серосодержащих соединений, необходимых для метаболизма и стрессоустойчивости растений.

Ассимиляция фосфора в растениях

Ассимиляция фосфора — включение поглощённого неорганического фосфата (Pi) в органические соединения, участвующие в энергетическом обмене, биосинтезе и регуляции метаболизма.

Основные пути ассимиляции

1. Фосфорилирование — включение Pi в органические молекулы при ферментативных реакциях.
2. Синтез АТФ — образование макроэргических фосфатных связей при фотофосфорилировании и окислительном фосфорилировании.
3. Образование сахарофосфатов — участие фосфора в реакциях гликолиза и фотосинтеза.
4. Синтез нуклеотидов и нуклеиновых кислот — включение фосфатных групп в состав ДНК и РНК.
5. Синтез фосфолипидов — формирование компонентов клеточных мембран.
6. Регуляция метаболизма — фосфорилирование белков и участие фосфатных соединений в сигнальных процессах.

Неорганический фосфат (Pi)

АТФ и другие нуклеотиды - *Энергетический обмен*

Сахарофосфаты - *Фотосинтез и гликолиз*

ДНК и РНК - *Хранение и реализация генетической информации*

Фосфолипиды - *Клеточные мембраны*

Особенности фосфорного обмена:

- Фосфат сохраняет высокую степень окисления при включении в органические соединения.
- Часть Pi накапливается в вакуолях и используется при изменении потребностей клетки.
- При дефиците фосфора активируются механизмы его мобилизации и повторного использования.

- ***Главный вывод: фосфор включается в органические соединения без предварительного восстановления и играет ключевую роль в энергетическом, структурном и регуляторном обмене растений.***

Заключение

Основные выводы лекции

- 1. Минеральное питание обеспечивает растения необходимыми макро- и микроэлементами, участвующими в росте, развитии и метаболизме.
- 2. Корневая система и ризосфера определяют доступность и эффективность поглощения минеральных веществ.
- 3. Пассивный и активный мембранный транспорт обеспечивают избирательное поступление ионов, при этом H^+-АТФаза создаёт движущую силу для многих транспортных процессов.
- 4. Специализированные транспортёры NPF/NRT, AMT, PHT1, IRT и ZIP участвуют в поглощении и распределении азота, фосфора, железа и цинка.
- 5. Ксилема и флоэма обеспечивают дальний транспорт и перераспределение минеральных элементов между органами растения.
- 6. Ассимиляция азота, серы и фосфора связывает минеральное питание с синтезом аминокислот, белков, нуклеиновых кислот и других органических соединений.
- 7. Минеральный гомеостаз поддерживается согласованной регуляцией поглощения, транспорта, накопления и повторного использования элементов.

Т.о. минеральное питание представляет собой интегрированную физиологическую систему, обеспечивающую метаболизм, продуктивность и адаптацию растений к условиям окружающей среды.

Контрольные вопросы

1. Что такое минеральное питание растений и каково его физиологическое значение?
2. Какие элементы относятся к макро- и микроэлементам?
3. Каковы основные функции азота, фосфора, калия, кальция и магния?
4. Какую роль выполняют Fe, Zn, Mn и Cu в метаболизме растений?
5. Как корневая система и ризосфера влияют на поглощение минеральных элементов?
6. Чем различаются апопластический, симпластический и трансмембранный пути транспорта?
7. В чём заключаются различия между пассивным и активным транспортом ионов?
8. Какую функцию выполняет плазматическая H^+-АТФаза?
9. Какова роль транспортёров NPF/NRT, AMT и PHT1?
10. Какие транспортные системы участвуют в поглощении и распределении Fe и Zn?
11. Чем различается транспорт минеральных веществ по ксилеме и флоэме?
12. Как осуществляется восстановление нитратов и ассимиляция аммония через систему GS/GOGAT?
13. Каковы основные этапы ассимиляции серы?
14. Как происходит включение неорганического фосфата в органические соединения?
15. Какие механизмы обеспечивают поддержание минерального гомеостаза растений?

Рекомендуемая литература

Основная литература

1. Taiz L., Møller I.M., Murphy A., Zeiger E. Plant Physiology and Development. 7th ed. Oxford University Press, 2022.
2. Buchanan B.B., Gruissem W., Jones R.L. (Eds.). Biochemistry and Molecular Biology of Plants. 2nd ed. Wiley Blackwell, 2015.
3. Marschner P. (Ed.). Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. 3rd ed. Academic Press, 2012.

- Дополнительная научная литература

- 4. Wang Y.Y., Hsu P.K., Tsay Y.F. Uptake, allocation and signaling of nitrate. Trends in Plant Science. 2012, 17, 458–467. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2012.04.006
- 5. Chiou T.J., Lin S.I. Signaling network in sensing phosphate availability in plants. Annual Review of Plant Biology. 2011, 62, 185–206. https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042110-103849
- 6. Kobayashi T., Nishizawa N.K. Iron uptake, translocation, and regulation in higher plants. Annual Review of Plant Biology. 2012, 63, 131–152. https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042811-105522
- 7. Takahashi H., Kopriva S., Giordano M., Saito K., Hell R. Sulfur assimilation in photosynthetic organisms: molecular functions and regulations of transporters and assimilatory enzymes. Annual Review of Plant Biology. 2011, 62, 157–184. https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042110-103921
- 8. White P.J., Broadley M.R. Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets—iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine. New Phytologist. 2009, 182, 49–84. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02738.x