ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ
ӘЛ-ФАРАБИ атындағы ҚАЗАҚ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ
Биология және биотехнология факультеті

Дәріс №2

Микробиоценоз, экожүйенің бір бөлігі, оның зат айналымдағы рөлі

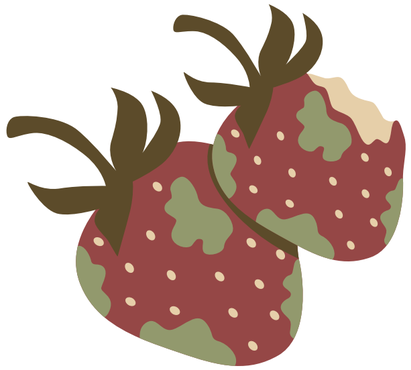
Дәріскер: Какимова Ардак Болатовна

Микробценоз — экожүйенің ажырамас әрі ең ұсақ, бірақ ең маңызды бөлігі болып табылады. Ол табиғаттағы тіршіліктің үздіксіз жүруін қамтамасыз ететін микроорганизмдер қауымдастығының жиынтығы. Белгілі бір ортада – мысалы, топырақта, суда, өсімдіктердің бетінде немесе жануар мен адамның ағзасында – әртүрлі микроорганизмдер өзара әрекеттесіп, тұрақты биологиялық жүйе құрайды. Бұл жүйенің құрамына бактериялар, саңырауқұлақтар, балдырлар, вирустар және қарапайымдылар кіреді. Әрқайсысы өз рөлін атқара отырып, экожүйенің тепе-теңдігін сақтауға, энергия мен заттардың айналымын қамтамасыз етуге үлес қосады.

Экожүйеде микробценоз негізінен **редуценттер**, яғни ыдыратушылар рөлін атқарады. Олар өлі өсімдіктер мен жануарлардың қалдықтарын, түрлі органикалық заттарды қарапайым бейорганикалық қосылыстарға дейін ыдыратады. Осылайша микробтар көміртек, азот, күкірт және фосфор сияқты элементтердің айналымына қатысып, өсімдіктердің қоректік заттарды қайтадан сіңіруіне жағдай жасайды. Мысалы, топырақ микробценозы гумус түзіп, жердің құнарлылығын арттырады, ал су микробценозы судың өзін-өзі тазаруына көмектеседі.





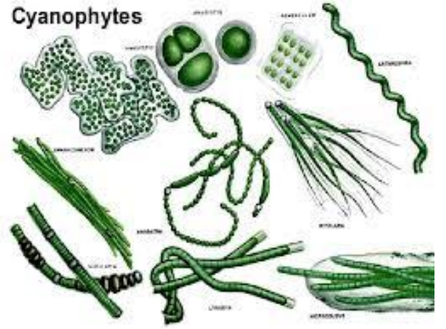




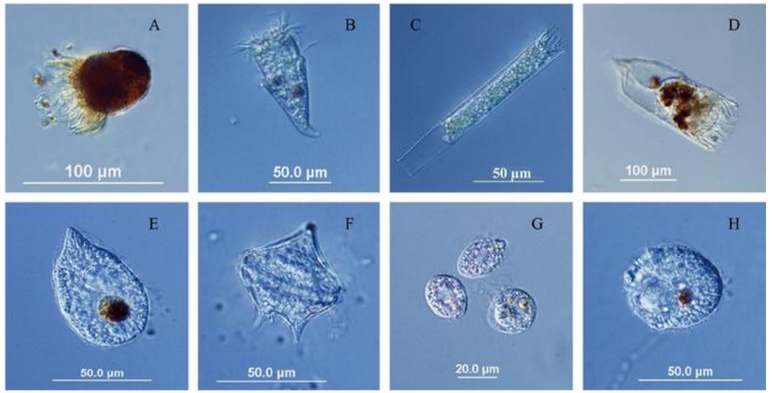
Микробценоздың экожүйедегі орны

Микробценоз экожүйенің тұрақтылығын сақтауда және энергия мен зат айналымын қамтамасыз етуде маңызды рөл атқарады. Табиғаттағы барлық экожүйелерде микроорганизмдер трофикалық жүйенің әр түрлі деңгейлерінде кездеседі.

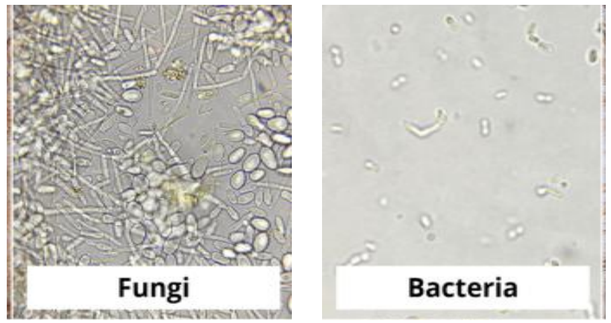
Продуценттер – фотосинтездеуші және хемоавтотроф микробтар. Оларға цианобактериялар, көк-жасыл балдырлар, нитрификатор бактериялар жатады. Олар бейорганикалық заттардан органикалық қосылыстар түзіп, экожүйедегі энергия мен қоректік заттардың бастапқы көзі болып табылады.



Консументтер – дайын органикалық заттармен қоректенетін микроорганизмдер. Бұларға гетеротроф бактериялар мен қарапайымдылар жатады. Олар өсімдіктер мен басқа организмдердің бөлген органикалық қосылыстарын пайдаланады.



Редуценттер – экожүйедегі ыдыратушы микробтар. Саңырауқұлақтар мен бактериялар органикалық қалдықтарды минералдандырып, көмірқышқыл газы (CO_2), аммоний (NH_4^+), фосфат (PO_4^{3-}) сияқты бейорганикалық заттарға айналдырады. Бұл заттар кейін қайтадан өсімдіктерге сіңіп, табиғаттағы зат айналымының үздіксіз жүруін қамтамасыз етеді.



Негізгі экожүйелік қызметтер

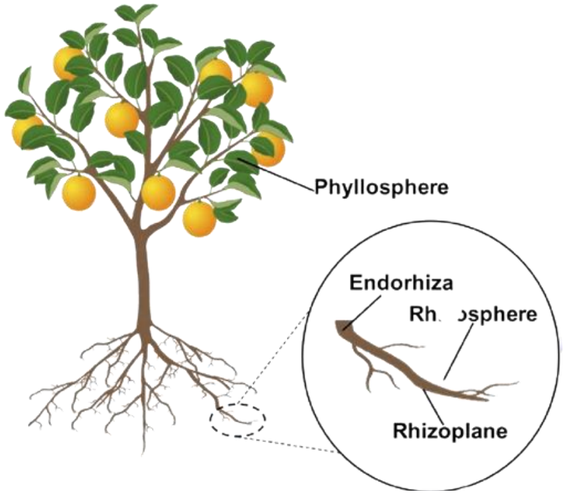
Микробценоз экожүйенің тұрақтылығын және табиғи процестердің үздіксіз жүруін қамтамасыз ететін маңызды биологиялық қызметтер атқарады.

- **Топырақ түзілуі мен құнарлылығы**. Микроорганизмдер органикалық қалдықтарды ыдыратып, гумус түзілуіне ықпал етеді. Олар топырақтың құрылымын жақсартып, түйіршіктелуін (агрегациясын) арттырады және ризосферада өсімдікке қажетті қоректік элементтерді (азот, фосфор, калий) қозғалмалы түрге айналдырады.
- **Судың өзін-өзі тазартуы.** Су ортасындағы микробтар органикалық ластануды тотығу және тітектендіру арқылы азайтады. Олар биоқабықтар (биофильмдер) түзіп, судың биологиялық сүзгіленуін қамтамасыз етеді.
- **Фитосимбиоз.** Кейбір бактериялар мен саңырауқұлақтар өсімдіктермен симбиозда өмір сүреді. Түйнек бактериялары атмосфералық азотты байланыстырып, өсімдікке қолжетімді етеді, ал микориза саңырауқұлақтары фосфор мен судың сіңірілуін жақсартады.
- **Ауруларды тежеу.** Микробтар бактериоциндер, антибиотиктер, органикалық қышқылдар және сутек пероксиді сияқты заттарды бөліп, зиянды патогендердің өсуін тежейді. Бұл өсімдік пен жануарлардың табиғи қорғаныс жүйесін күшейтеді.
- **Биоремедиация.** Кейбір бактериялар мен саңырауқұлақтар мұнай, пестицид, ауыр металл сияқты улы заттарды ыдыратып немесе бейтараптандырып, қоршаған ортаны тазартады. Бұл табиғатты қалпына келтірудің экологиялық тиімді жолдарының бірі.

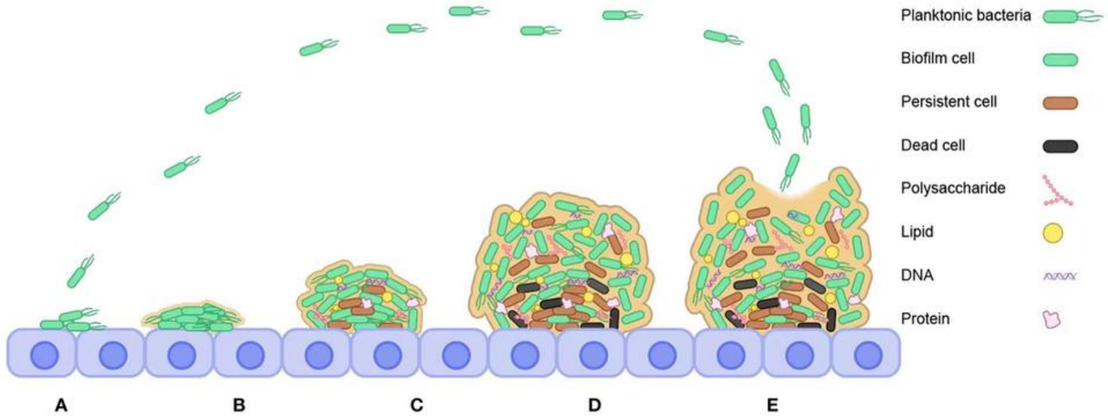
Кеңістіктік микроніштер

Микроорганизмдер табиғатта әртүрлі кеңістіктік микроніштерде тіршілік етеді және сол ортаның экологиялық тепе-теңдігіне әсер етеді.

Ризосфера, филлосфера және ризоплана – өсімдікпен тығыз байланысты аймақтар. **Ризосфера** – өсімдік тамырының айналасындағы микробтарға бай қабат, мұнда бактериялар мен саңырауқұлақтар өсімдікке қажетті элементтерді ерітіп, өсуін ынталандырады. **Филлосфера** – өсімдіктің жапырақ бетінде өмір сүретін микробтар тобы, олар өсімдікті зиянды микроорганизмдерден қорғайды. Ал **ризоплана мен ризоид/ризобактер кешені** өсімдік тамырының беткі қабатында орналасып, өсімдік пен микроб арасындағы қоректік алмасуды қамтамасыз етеді.



Биофильмдер – микробтар қатты бетке жабысып, экзополимерлі матрикс түзетін құрылымдар. Бұл қабат микробтарды сыртқы әсерлерден қорғайды және қауымдастықтың тұрақтылығын арттырады. Биофильмдер су құбырларында, топырақ бөлшектерінде, тіпті ағзалардың тіндерінде де түзілуі мүмкін.



Тұрақтылық ұғымдары

- Резистенттілік – микробтық қауымдастықтың қоршаған ортадағы өзгерістерге төзімді болу қабілеті. Яғни сыртқы әсерлер (мысалы, температура, pH, немесе ластану) өзгерсе де, микробценоздың құрылымы мен қызметі айтарлықтай бұзылмайды.

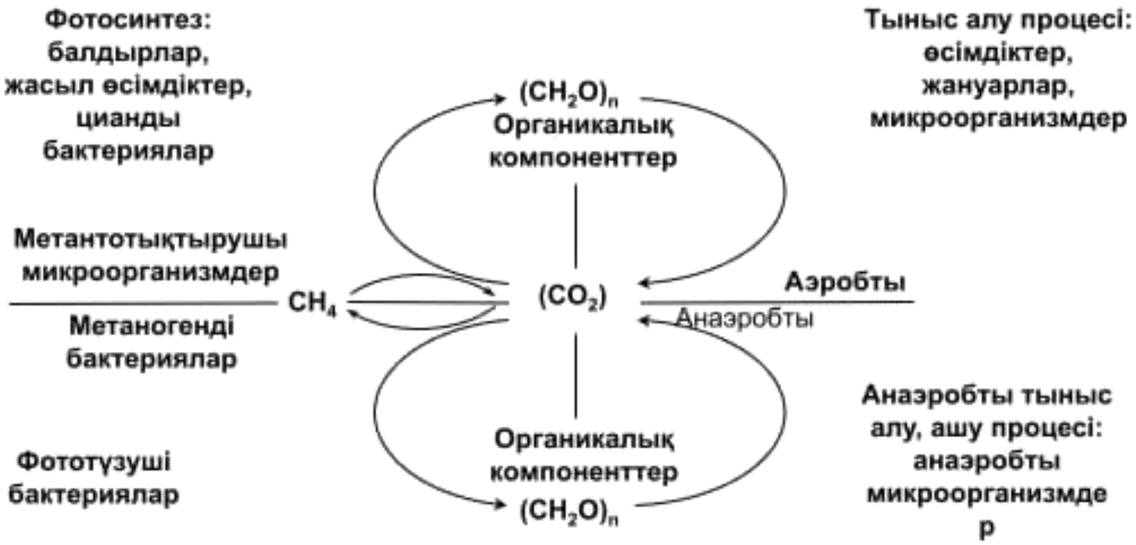
- Резилиенттілік – экожүйе бұзылғаннан кейін оның бастапқы күйіне қайта оралу қабілеті. Бұл қасиет микробтардың бейімделгіштігі мен өздігінен қалпына келу мүмкіндігін сипаттайды.

- Core және variable мүшелер – микробценоз құрамындағы түрлердің экологиялық маңызы әртүрлі болады. Core (ядролық) мүшелер – әрқашан болатын, экожүйенің негізгі функцияларын атқаратын тұрақты түрлер. Ал variable (ауыспалы) мүшелер – қоршаған ортаның жағдайына тез бейімделетін және қысқа уақытқа ғана пайда болатын түрлер.

Микробтардың зат айналымындағы рөлі

Көміртек (C) айналымы

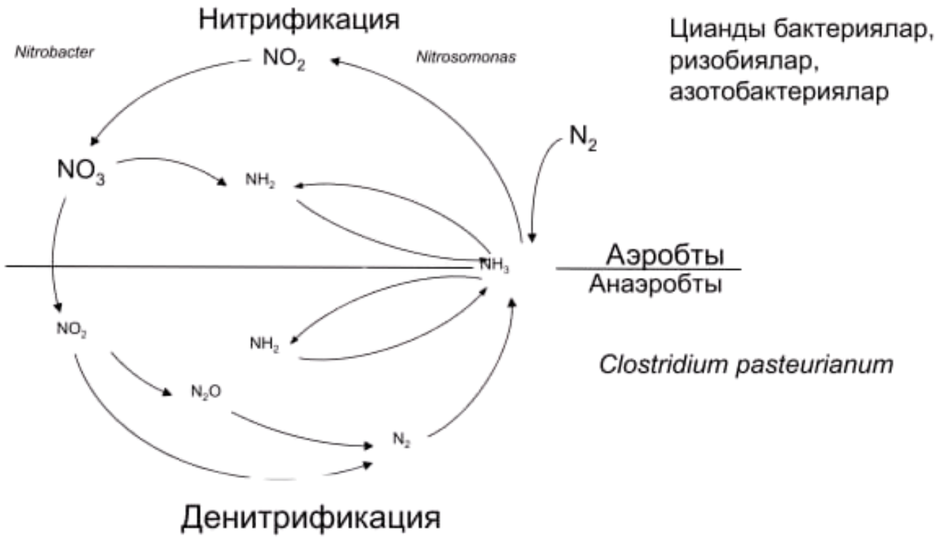
- **Фотосинтез** кезінде **цианобактериялар, балдырлар және жасыл өсімдіктер** атмосферадағы көмірқышқыл газын (CO_2) пайдаланып, оны органикалық заттарға (мысалы, көмірсуларға – $(CH_2O)n$) айналдырады. Бұл процесс көміртектің тірі ағзаларға ену кезеңі.
- **Тыныс алу процесі** кезінде өсімдіктер, жануарлар және микроорганизмдер осы органикалық заттарды ыдыратып, керісінше CO_2 бөледі. Бұл көміртектің қайта атмосфераға қайту жолы.
- **Анаэробты жағдайларда** (оттегісіз ортада) кейбір микроорганизмдер органикалық қосылыстарды ашу және анаэробты тыныс алу арқылы ыдыратып, CO_2 мен метан (CH_4) бөледі.
- **Метаногенді бактериялар (археялар)** CO_2 немесе ацетатты пайдаланып, CH_4 (метан) түзеді — бұл **метаногенез** процесі. Ол көбінесе батпақтарда, малдардың асқазанында және шіріген органикалық қалдықтарда жүреді.
- Ал **метанотықтырушы бактериялар** керісінше, CH_4-ті пайдаланып, оны CO_2-ге дейін тотығады. Бұл процесс атмосферадағы артық метан мөлшерін азайтып, климат тұрақтылығын сақтауға ықпал етеді.



Бұл сурет көміртектің биологиялық айналымын және оған қатысатын негізгі организмдерді көрсетеді.

Азот (N) айналымы

- **Азот фиксациясы.** Атмосферадағы молекулалық азот (N_2) кейбір бактериялармен өсімдіктерге қолжетімді формаға айналады. Бұл процесті **Rhizobium, Azotobacter**, және **цианобактериялар** атқарады. Олар N_2 газын **аммиакқа (NH_3)** айналдырады. Бұл өсімдіктердің өсуі үшін маңызды, себебі олар дайын азотты өз бетімен сіңіре алмайды.
- **Аммонификация.** Өлі организмдер мен қалдықтардағы органикалық азотты **гетеротрофты бактериялар** ыдыратып, оны **аммонийге (NH_4^+)** айналдырады. Бұл процесс азоттың топырақтағы жинақталуына әкеледі.
- **Нитрификация (аэробты процесс).** Бұл екі сатыдан тұрады:
  - **Nitrosomonas** бактериялары $NH_4^+ \rightarrow NO_2^-$ (нитритке) айналдырады.
  - **Nitrobacter** бактериялары $NO_2^- \rightarrow NO_3^-$ (нитратқа) айналдырады. Бұл форма өсімдіктер үшін ең қолжетімді азот көзі болып табылады.
- **Денитрификация (аноксикалық процесс).** Оттегі жетіспейтін ортада **анаэробты бактериялар** (мысалы, Pseudomonas, Clostridium) нитраттарды (NO_3^-) азайтып, газ түріндегі азот (N_2 немесе N_2O) бөледі. Осылайша азот атмосфераға қайта оралады.
- **ANAMMOX процесі (қосымша).** Кейбір арнайы бактериялар аммоний (NH_4^+) мен нитритті (NO_2^-) тікелей азот газына (N_2) айналдырады. Бұл процесс көбіне **қалдық суларды тазалау жүйелерінде** маңызды рөл атқарады.



Бұл сурет азоттың биологиялық айналымын және оған қатысатын микроорганизмдерді бейнелейді.

Фосфор (P) айналымы

- **Минералдану**. Органикалық қалдықтар құрамындағы органикалық фосфор қосылыстарын микроорганизмдер **фосфатазалар ферменттері** арқылы ыдыратып, оларды **бейорганикалық фосфаттарға (PO_4^{3-})** айналдырады. Бұл фосфаттар өсімдіктерге сіңуге дайын түрге өтеді.
- **Ерігіштікті арттыру.** Кейбір **фосфат-ерітуші бактериялар** (мысалы, Bacillus, Pseudomonas) органикалық қышқылдар бөлу арқылы топырақтағы қиын еритін фосфорды қозғалмалы, өсімдікке қолжетімді түрге көшіреді. Осылайша олар топырақтың құнарлылығын арттырады.
- **Полифосфат жинау.** Кейбір микробтар фосфат иондарын (PO_4^{3-}) өз жасушаларында **полифосфат түрінде жинайды.** Бұл қасиет су тазарту жүйелерінде маңызды, себебі мұндай **PAO (polyphosphate-accumulating organisms)** бактериялары артық фосфорды сіңіріп, судың экологиялық ластануын азайтады.



Бұл суретте фосфордың биологиялық айналымы және оған қатысатын негізгі кезеңдер көрсетілген.

Күкірт (S) айналымы

- **Сульфатты тотықсыздандыру (анаэробты процесс).** Кейбір бактериялар (**десульфототықсыздандырғыштар**, мысалы Desulfovibrio) оттегі жоқ ортада сульфаттарды (SO_4^{2-}) **күкіртсутекке (H_2S)** дейін тотықсыздандырады. Бұл процесс көбіне батпақтарда, шөгінділерде және анаэробты экожүйелерде жүреді.
- **Күкіртті тотығу (аэробты процесс).** Оттегі бар ортада **тио- және серобактериялар (Thiobacillus, Beggiatoa)** күкіртсутекті (H_2S) және элементтік күкіртті (S^0) **сульфаттарға (SO_4^{2-})** дейін тотықтырады. Бұл реакция кезінде энергия бөлініп, ол бактериялардың өсуіне пайдаланылады.
- **Аралық өнімдер (S^0)** – күкірттің тотығуы мен тотықсыздануы арасында түзілетін уақытша форма. Кей жағдайларда бұл элементтік күкірт кейін қайта тотығып немесе тотықсыздану процесіне қатысады.
- **Фототрофты күкірт бактериялары** (мысалы, Chromatium, Chlorobium) жарық энергиясын пайдаланып H_2S-ті тотығып, күкірт немесе сульфат түзеді — бұл **фотосинтездің аноксигенді түрі.**



Бұл суретте күкірттің биологиялық айналымы және оған қатысатын негізгі реакциялар көрсетілген.

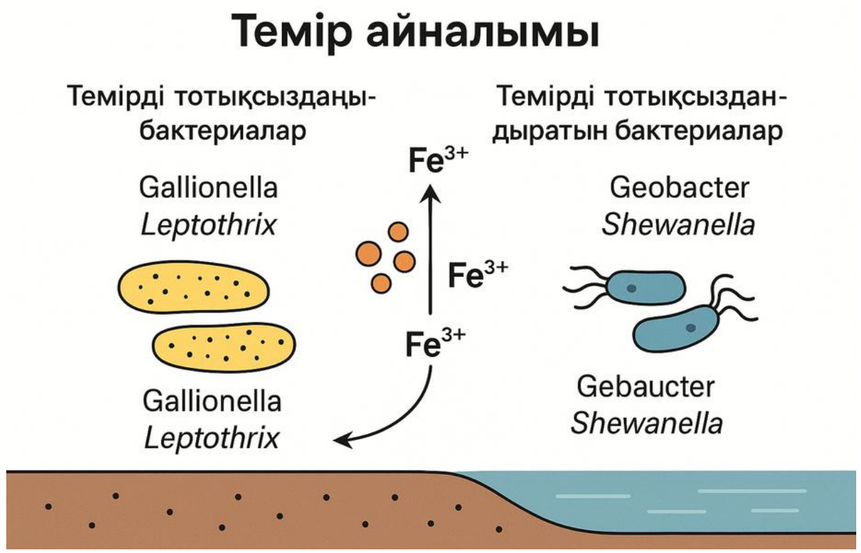
Микроэлементтер

Микроорганизмдер экожүйеде темір (Fe) мен марганецтің (Mn) айналымына белсенді қатысады. Бұл элементтер табиғаттағы тотығу-тотықсыздану (редокс) процестерінің негізгі бөлігі болып табылады.

Темір айналымы:

Микробтар темірдің екі тотығу дәрежесін алмастыра алады — Fe^{2+} (тотықсызданған форма) мен Fe^{3+} (тотыққан форма).

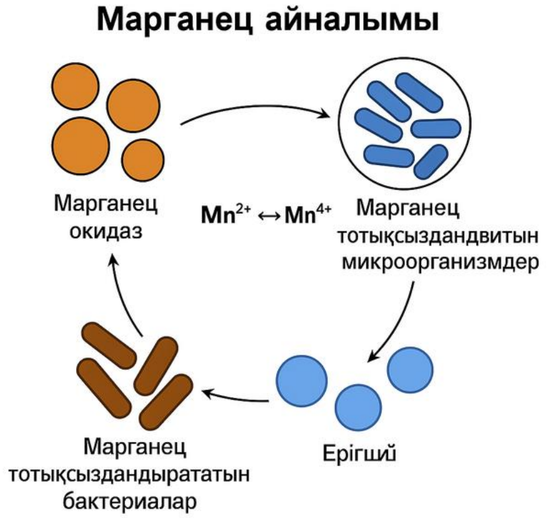
- Темірді тотықтыратын бактериялар (мысалы, Gallionella, Leptothrix) $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$ реакциясын жүзеге асырып, темір оксидтерін түзеді. Бұл оксидтер топырақта және суда минералдардың қалыптасуына ықпал етеді.
- Темірді тотықсыздандыратын бактериялар (мысалы, Geobacter, Shewanella) керісінше, $Fe^{3+} \rightarrow Fe^{2+}$ түрлендіруін жүргізеді. Бұл процесс ауыр металдарды байланыстыру немесе босату арқылы ластанған ортаны биотазалауға (биоремедиацияға) қатысады.



Марганец айналымы:

Марганец те ұқсас түрде $Mn^{2+} \leftrightarrow Mn^{4+}$ арасында тотығып-тотықсызданады.

- Марганец тотықтыратын микроорганизмдер марганец оксидтерін түзіп, оларды минералдардың құрамына енгізеді.
- Марганец тотықсыздандыратын бактериялар бұл оксидтерді ерігіш формаға айналдырып, элементтің қозғалысын жеңілдетеді.



Микробценоздың тұрақтылығы, өзара байланыстары және зерттеу әдістері

Тұрақтылық ұғымдары

- **Резистенттілік** – микробтық қауымдастықтың сыртқы орта әсерлеріне (мысалы, температура, pH, ластану, антибиотиктер және т.б.) **төзімді болу қабілеті**. Яғни, экожүйе жағдайы өзгерсе де, микробценоздың құрылымы мен қызметі айтарлықтай бұзылмай сақталады.
- **Резилиенттілік** – микробтық қауымдастықтың **бұзылудан кейін бастапқы күйіне қайта оралу қабілеті.** Бұл қасиет микробтар арасындағы өзара байланыстар мен бейімделу механизмдері арқылы жүзеге асады.
- **Функционалдық артықшылық (redundancy)** – экожүйедегі бір қызметті бірнеше әртүрлі микробтық таксондардың атқара алуы. Мұндай көпқызметтілік қауымдастықтың жалпы **функциясын сақтап қалуға мүмкіндік береді**, тіпті кейбір түрлер жойылған жағдайда да.
- **Keystone-таксондар** – саны аз болса да, экожүйенің маңызды қызметтерін атқарып, бүкіл қауымдастықтың **тұрақтылығын қамтамасыз ететін негізгі түрлер.** Мысалы, кейбір азотфиксациялаушы немесе органикалық заттарды ыдыратушы бактериялар.
- **Сақтандыру гипотезасы** – микробтық **әртүрлілік неғұрлым жоғары болса,** экожүйенің функциялары да соғұрлым тұрақты болады деген қағида. Яғни, микробтардың көптүрлілігі экожүйеге сыртқы әсерлерге қарсы «сақтандыру жүйесі» ретінде қызмет етеді.

Өзара байланыстар (түрішілік және түр аралық)

Ынтымақтастық түрлері:

Симбиоз / Мутуализм – екі түрлі организмнің өзара пайдалы тіршілігі.

Мысалы:

- **Түйнек бактериялары мен бұршақ тұқымдас өсімдіктердің** арасындағы байланыс — бактериялар атмосфералық азотты (N_2) фиксациялап, өсімдікке қолжетімді етеді, ал өсімдік оларға көміртек көзімен қамтамасыз етеді.
- **Микориза (саңырауқұлақтар мен өсімдіктердің тамыр жүйесі)** — саңырауқұлақтар топырақтан фосфор мен суды тиімді сіңіреді, ал өсімдік фотосинтез өнімдерін береді.

Комменсализм – бір түр түзген метаболиттерді немесе қалдық заттарды басқа түр пайдаланады, бірақ алғашқы түрге бұл қатынас әсер етпейді. Мысалы, бір бактерияның шығарған органикалық қышқылдары екінші бактерия үшін қорек көзі болуы мүмкін.

Кросс-фидинг (cross-feeding) – микроорганизмдердің бір-бірінің аралық өнімдерін пайдаланып, энергия және қорек алмасу арқылы бір-бірінің өсуін қолдауы. Бұл процесс микробтық қауымдастықтың тұрақты дамуына ықпал етеді.

Quorum sensing (QS) және **биофильм түзуі** – микробтар өздерінің саны белгілі бір деңгейге жеткенде арнайы сигналдық молекулалар арқылы ұжымдық жауап береді. QS жүйесі арқылы микробтар биофильм түзіп, сыртқы әсерлерге, антибиотиктерге және қоректік тапшылыққа төзімділігін арттырады.

Бәсекелестік және тежеу түрлері

Микроорганизмдер арасында әрдайым **ресурстар үшін бәсекелестік** жүреді. Мұндай өзара байланыстар кейде бір түрдің өсуін шектеуге немесе жоюға бағытталған болады.

Антагонизм – бір микроб екіншісінің өсуін немесе көбеюін тежейді. Бұл әсер түрлі жолмен жүзеге асады:

- **Бактериоциндер мен антибиотиктер** бөлу арқылы басқа микробтарды жояды немесе олардың өсуін тоқтатады;
- **Органикалық қышқылдар** бөлу арқылы ортаның pH-ын төмендетіп, бәсекелес түрлерге қолайсыз жағдай туғызады;
- **Siderophore (сидерофорлар)** бөлу арқылы ортадағы темір иондарын өзіне байланыстырып, басқа организмдерге оны қолжетімсіз етеді.

Амменсализм – бұл жағдайда бір түрдің белсенділігі екіншісіне зиян тигізеді, бірақ **зиян келтірген** түрдің өзіне бұл әрекет бейтарап. Мысалы, кей бактериялар бөлетін улы метаболиттер басқа микробтардың өсуін тежейді, бірақ өздеріне әсер етпейді.

Паразитизм және жыртқыштық – бір ағза екіншісінің есебінен тіршілік етеді немесе оны толықтай жояды. Мысалы, бактериофагтар бактериялардың ішіне еніп, көбейіп, соңында иесін жойып жібереді. Ал қарапайымдылар бактериялармен қоректеніп, микробтық популяциялардың санын реттейді.

Микробиоценозды зерттеу әдістері

Классикалық әдістер

- Микроскопия және морфологиялық сипаттама
- Қоректік ортада өсіру және колония санау
- Физиологиялық-биохимиялық тесттер

Молекулалық әдістер

- ПТР және qPCR арқылы мақсатты гендерді анықтау
- 16S rRNA/ITS ампликондық секвенирлеу
- Метагеномика және метатранскриптомика

Биоинформатикалық талдау

- Таксономиялық құрам мен әртүрлілікті бағалау
- Функционалдық гендер мен метаболизм жолдарын аннотациялау
- Қауымдастықтар арасындағы ұқсастықты салыстыру

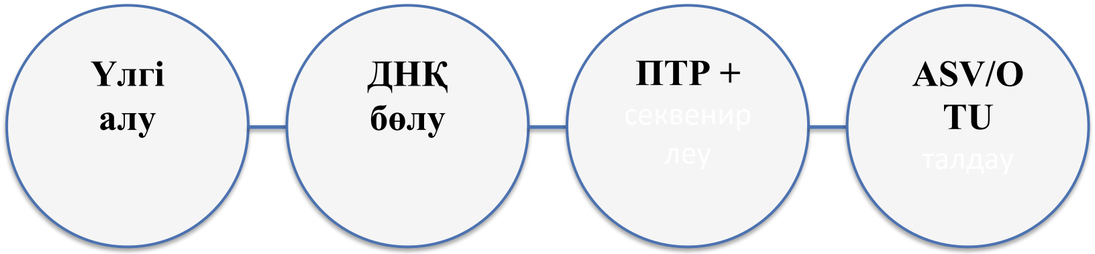
16S rRNA және ITS ампликондық секвенирлеу

• 16S rRNA гені бактериялар мен археялардың таксономиялық құрамын бағалау үшін қолданылады.

• ITS аймағы саңырауқұлақ қауымдастықтарын сипаттауда негізгі маркер болып табылады.

• Нәтижесінде ASV/OTU кестелері түзіліп, салыстырмалы молшылық пен әртүрлілік есептеледі.

• Артықшылығы – культивацияланбайтын микроорганизмдерді де анықтауға мүмкіндік береді.



Shotgun метагеномика

- Үлгідегі барлық ДНҚ фрагменттері мақсатты маркерсіз секвенирленеді.
- Таксономиялық құраммен қатар функционалдық әлеуетті бағалауға мүмкіндік береді.
- Гендер KEGG, eggNOG, CAZy және басқа дерекқорлармен аннотацияланады.
- Биогеохимиялық циклдерге қатысатын гендерді, резистомды және метаболизм жолдарын анықтауға болады.

Таксономия

- Қауымдастықта қандай микроорганизмдер бар?

Функция

- Қандай гендер мен метаболизм жолдары бар?

Экологиялық мағына

- Қауымдастық қандай процестерді атқара алады?

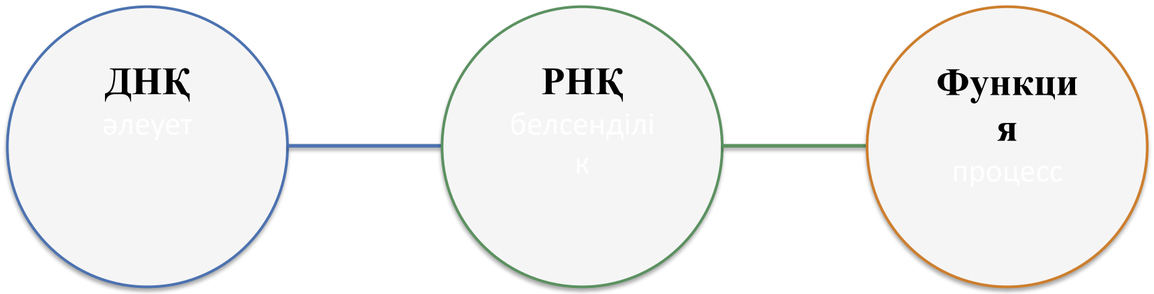
Метатранскриптомика: белсенді функцияларды анықтау

• Метатранскриптомика қоршаған орта үлгісіндегі жалпы РНҚ-ны зерттейді.

• Метагеномика «не істей алады?» деген сұраққа жауап берсе, метатранскриптомика «қазір не істеп жатыр?» дегенді көрсетеді.

• Белсенді экспрессияланатын гендер арқылы стресс-жауап, энергия алмасу және биогеохимиялық процестер бағаланады.

• РНҚ тұрақсыз болғандықтан, үлгіні тез тұрақтандыру және сапалы сақтау шешуші маңызға ие.



Альфа-әртүрлілік: бір үлгі ішіндегі алуандық

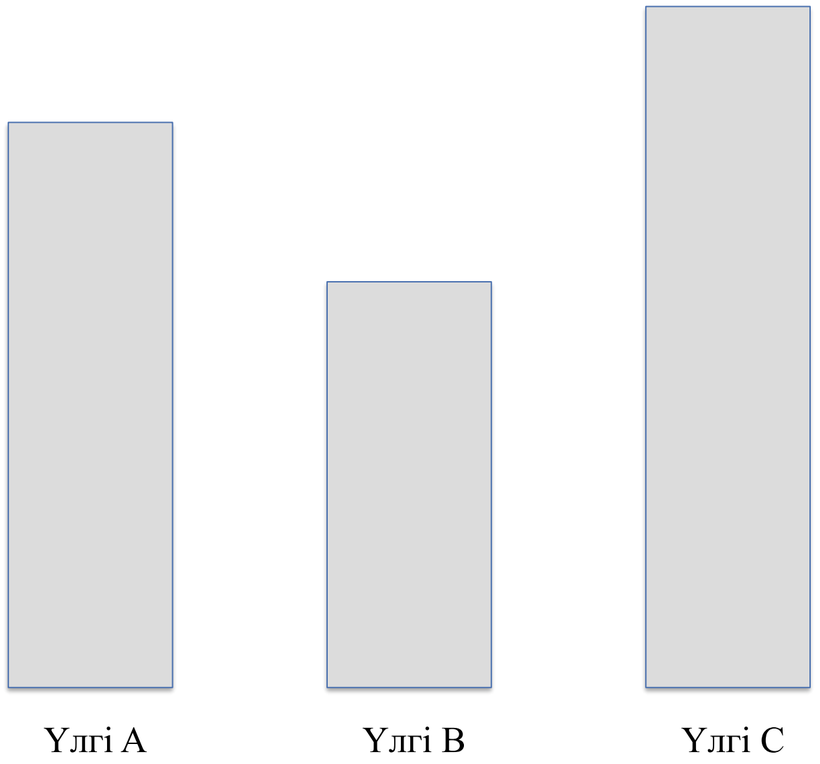
• Альфа-әртүрлілік бір экожүйе немесе бір үлгі ішіндегі микробтық алуандықты сипаттайды.

• Richness индекстері: Chao1, ACE – таксондар санына басымдық береді.

• Shannon индексі – таксон саны мен олардың тең бөлінуін бірге ескереді.

• Simpson индексі – доминантты таксондардың әсеріне сезімтал.

• Жоғары мән әрдайым «жақсы» дегенді білдірмейді; оны экожүйе контексінде түсіндіру керек.



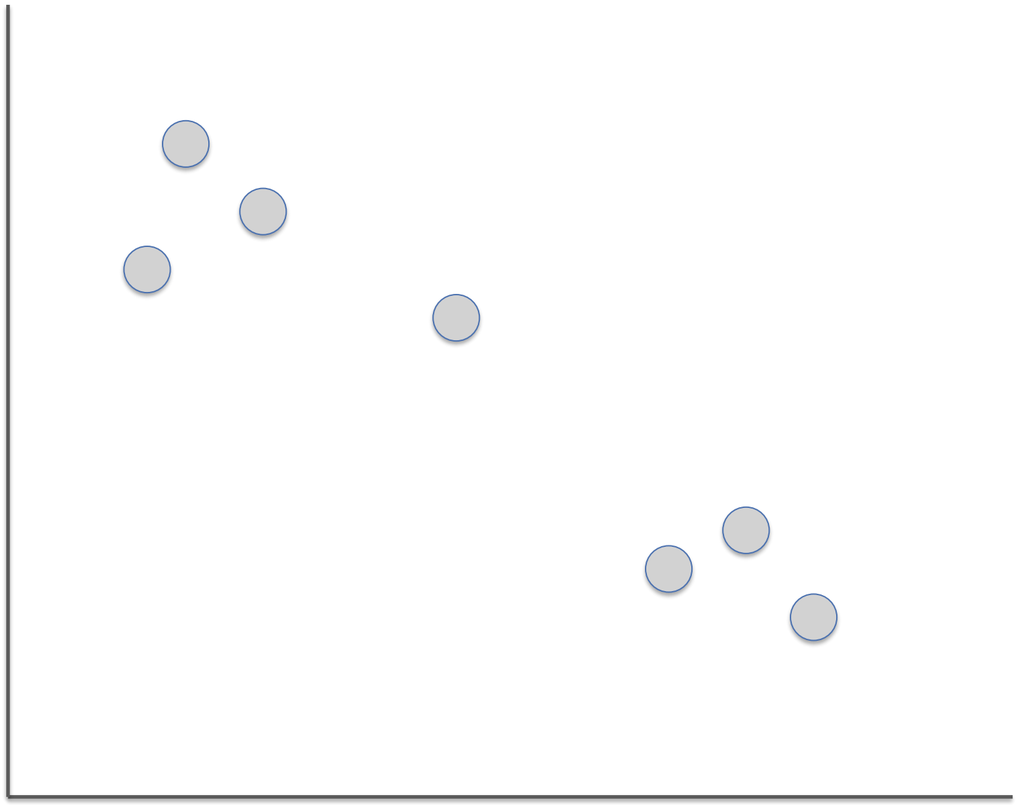
Бета-әртүрлілік: қауымдастықтар арасындағы айырмашылық

• Бета-әртүрлілік әртүрлі үлгілердегі микробтық қауымдастықтардың қаншалықты ұқсас немесе айырмашылығы бар екенін көрсетеді.

• Bray–Curtis, Jaccard және UniFrac қашықтықтары жиі қолданылады.

• PCoA және NMDS графиктері үлгілердің топтасуын визуализациялайды.

• Жақын орналасқан нүктелер – құрамы ұқсас, ал алшақ нүктелер – айырмашылығы жоғары қауымдастықтарды білдіреді.



Қоршаған орта факторлары және микробценоз

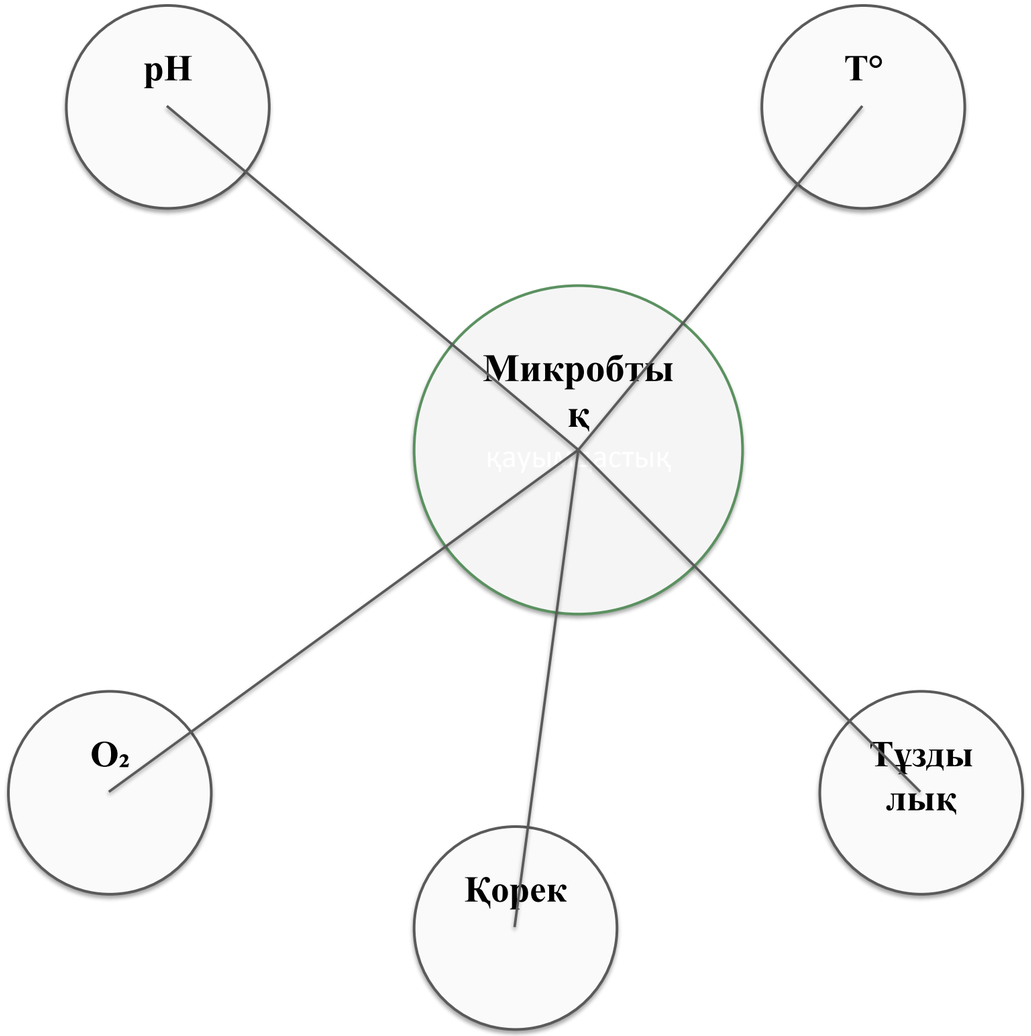
• Температура – ферменттік реакциялар мен өсу жылдамдығын анықтайды.

• pH – микроорганизмдердің физиологиялық белсенділігі мен бәсекелестігіне әсер етеді.

• Оттек пен редокс-потенциал – аэробты және анаэробты процестердің арақатынасын өзгертеді.

• Тұздылық, ылғал, қоректік заттар және ластаушылар қауымдастық құрылымын қайта қалыптастырады.

• Антропогендік қысым микробтық әртүрлілік пен функцияға ұзақ мерзімді әсер етуі мүмкін.



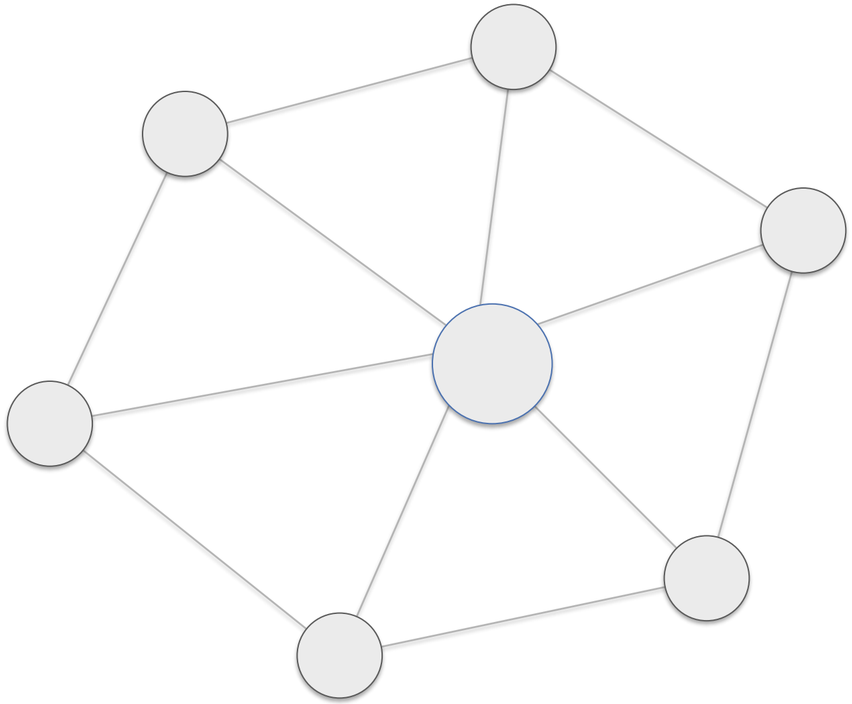
Микробтық өзара байланыстарды желілік талдау

• Желілік талдау (network analysis) таксондар арасындағы ықтимал ко-оқиғаларды немесе өзара байланыстарды көрсетеді.

• Түйіндер (nodes) – таксондар; байланыстар (edges) – оң немесе теріс ассоциациялар.

• Hub және keystone таксондары қауымдастық құрылымында маңызды рөл атқаруы мүмкін.

• Корреляция нақты биологиялық өзара әрекеттестікті автоматты түрде дәлелдемейді; эксперименттік тексеру қажет.



Биогеохимиялық циклдердің функционалдық гендері

Азот айналымы

- nifH/nifD/nifK – азот фиксациясы
- amoA – аммиак тотығуы
- nirK/nirS, nosZ – денитрификация

Көміртек және метан

- rbcL – көмірқышқыл газын фиксациялау
- mcrA – метаногенез
- pmoA – метан тотығуы

Күкірт және фосфор

- dsrAB – сульфатты тотықсыздандыру
- sox гендері – күкірт тотығуы
- phoD/phoA – фосфат айналымы

Экологиялық биотехнологиядағы қолданылуы

Ағын суларды тазарту

- Нитрификация/денитрификация
- ANAMMOX және фосфорды биологиялық жою

Биоремедиация

- Мұнай көмірсутектерін ыдырату
- Ауыр металдарды биосорбциялау және редокс-түрлендіру

Агробиотехнология

- Биотыңайтқыштар мен PGPR
- Микориза және биобақылау агенттері

Биоэнергетика

- Метаногенез және биогаз
- Микробтық отын элементтері

Экологиялық мониторинг

- Микробтық биоиндикаторлар
- Метагеномдық мониторинг және ерте ескерту

Қорытынды және бақылау сұрақтары

• Микробценоз экожүйедегі энергия ағыны мен зат айналымының негізгі биологиялық буыны болып табылады.

• Қауымдастықтың құрамы, тұрақтылығы және функциясы қоршаған орта факторларымен және түрлер арасындағы байланыстармен анықталады.

• Қазіргі молекулалық және омдық әдістер микробценозды құрылымдық әрі функционалдық деңгейде зерттеуге мүмкіндік береді.

1. Микробценоздың экожүйедегі негізгі қызметтері қандай?
2. Альфа- және бета-әртүрліліктің айырмашылығы неде?
3. Метагеномика мен метатранскриптомика қандай ақпарат береді?
4. Микробтық қауымдастықтарды экологиялық биотехнологияда қалай қолдануға болады?