

Антибиотиктердің су қоймаларына түсуі кезіндегі экожүйе үшін қауіптер

Ляйля Акбаева¹, Жумабике Бакешова^{1*}, Есения Тихомирова¹, Нургуль Мамытова²,
Ербол Панғалиев³

¹Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан; akbaeva659@mail.ru, Bakeshova.z@yandex.ru, 623et03@gmail.com

²Қ. Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті, Астана, Қазақстан; mamytovanur@gmail.com

³Ш. Есенов атындағы Каспий технология және инжиниринг университеті, Ақтау, Қазақстан; erbolpm@mail.ru

*Корреспонденция: Bakeshova.z@yandex.ru

Андатпа. Қоршаған ортаның антибиотиктермен ластану мәселесі экологиялық жүйеде бірқатар зардаптарға әкеледі және адам денсаулығына айтарлықтай қауіп төндіреді. Бұл саладағы зерттеу бағыттары кең ауқымды міндеттер мен объектілерді қамтиды. Мақалада антибиотиктердің қоршаған орта объектілеріндегі динамикасы мен таралуы және су нысандарының антибиотиктермен ластануының негізгі көздері туралы отандық және шетелдік ғылыми әдебиет деректеріне шолу жасалып, антибиотиктердің гидробионттарға әсер ету механизмдері қарастырылды. Антибиотиктердің түзілу көздерінен таралу жолдары, сондай-ақ олардың медициналық мекемелер, фармацевтикалық өндіріс, тұрмыстық шаруашылық, ауыл шаруашылығында тыңайтқыштарды пайдалану, мал шаруашылығы және аквадақыл шаруашылығының арасында сақталуы сипатталған. Гидробионттардың антибиотиктерге төзімділігінің қалыптасуы және одан әрі таралу мәселелеріне назар аударылды. Қоршаған ортадағы дәрілік препараттардың экотоксикалық концентрацияларын зерттеу ерекше қызығушылық тудырады. Қоршаған ортада антибиотиктер мен органикалық заттардың бұзылуы, азот пен фосфордың улы формаларының жинақталуы және эвтрофикация арқылы экожүйелік процестердің тұрақсыздануы арасындағы байланыстар анықталды. Жалпы алғанда антибиотиктердің динамикасы мен экотоксикокинетикасының әр түрлі механизмдерінің болуымен қатар, дәрілік препараттардың қоршаған орта элементтеріне таралуы мен әсер етуінің барлық жолдары өзара байланысты, өзара тәуелді және осының барлығын биогеохимиялық процестерді тұрақсыздандырудың біртұтас жүйесі ретінде көрсетуге болатыны анықталды. Зерттеулерді шолу негізінде антибиотиктерді пайдалануды бақылау, реттеу және экотоксиканттардан суды тазартудың жаңа технологияларын қамтитын шаралар ұсынылды.

Түйін сөздер: су ортасының ластануы, фармацевтикалық препараттар, ағынды сулар, антибиотиктер, резистенттілік, экотоксиканттар, гидробионттар, биоаккумуляция, микроағзалар.

Дәйексөз: Акбаева, Л., Бакешова, Ж., Тихомирова, Е., Мамытова, Н., Панғалиев, Е. (2025). Антибиотиктердің су қоймаларына түсуі кезіндегі экожүйе үшін қауіптер. Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ-нің хабаршысы. Химия. География. Экология сериясы, 151(2), 211-236. <https://doi.org/10.32523/2616-6771-2025-151-2-211-236>

Академиялық редактор:
Ж.Ғ. Берденов

Редакцияға түсті: 06.05.2025
Түзетілді: 20.05.2025
Қабылданды: 02.06.2025
Басылымға шықты: 30.06.2025



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

1. Кіріспе

Соңғы онжылдықта ғалымдарды қоршаған ортада антибиотиктердің жинақталуы алаңдатууда. Антибиотиктер микроағзалардың тіршілік белсенділігін басуға (бактериостатикалық) немесе оларды жоюға (бактерицидтік) арналған заттар ретінде қолданылады. Олар табиғи, жартылай синтетикалық және синтетикалық жолмен жасалады. Қоршаған ортада, оның ішінде су нысандарында, антибиотиктердің жинақталуы экотоксикалық әсерге әкеледі (Виноградова және т.б., 2013). Қоршаған ортаның антибиотик қалдықтарымен ластануы антибиотиктерге төзімді бактериялардың көбеюіне алып келетін, маңызды мәселеге айналып отыр (Huong et al., 2025).

Су микроағзалары экологиялық жүйелердің тепе - теңдігін сақтауда, заттар айналымын қамтамасыз етуде, суды тазартуда және қоректік тізбектерді қолдауда шешуші рөл атқарады. Олар су ортасында белгілі бір қызметтерді атқаратын бактериялар, вирустар, балдырлар, саңырауқұлақтар және қарапайымдылардан құралған. Дәрілік препараттардың су микроағзаларына әсері олардың қызметтерінің бұзылуына әкеледі.

Атап айтқанда, антибиотиктер микроағзалардың түрлік құрамын өзгеріске ұшыратып, су биоценозындағы тепе - теңдіктің бұзылуына әкеледі. Алайда, антибиотиктердің ұзақ мерзімді әсері су қоймаларына түскенде бактериялардың төзімділігін арттырып, сұрыпталу және бейімделу механизмдерін іске қосуы керек (Akbaeva et al., 2024).

Жұмыстың мақсаты: Су экожүйелеріне антибиотиктердің түсуімен байланысты қауіптерді, олардың биологиялық әртүрлілікке және экологиялық процестерге әсерін талдау.

Негізгі міндеттер:

- Су нысандарының антибиотиктермен ластануының негізгі көздерін анықтау.
- Антибиотиктердің су микроағзалары мен макроағзаларына әсер ету механизмдерін анықтау.
- Антибиотиктердің су ағзаларында биоаккумуляциясын және қоректік тізбек арқылы берілуінің салдарын қарастыру.
- Антибиотиктерге төзімділіктің таралуында су экожүйесінің рөлін қарастыру.
- Антибиотиктермен ластанудың экологиялық салдарын бағалау.
- Ластанудың осы түрін төмендету бойынша мүмкін болатын стратегиялар мен технологияларды ұсыну.

2. Әдебиеттерге шолу

Су нысандарындағы антибиотиктердің түрлері және антибиотиктермен ластанудың негізгі көздері.

Ең көп таралған антибиотиктердің арасында, табиғи суларда кездесетін және адам денсаулығы мен қоршаған ортаға қауіп төндіретін нитрофуран препараттары (Zhang et al., 2024), фторхинолондар (Yin et al., 2024), эритромицин (Zhou et al., 2025), энрофлоксацин (Yang et al., 2025) анықталды.

Цзяочжоу шығанағындағы сулы - батпақты алқаптардағы жер үсті шөгінділеріндегі сегіз хинолонды антибиотиктердің (ХА) таралуы, көздері және орын алатын қауіптерді бағалауы зерттелді.

Алынған нәтижелер хинолонды антибиотиктердің барлық үлгілерде анықталғанын көрсетті, ал шөгінділерде хинолонды антибиотиктер жалпы концентрациясы 0,276 дан 5,229 нг/г шамасында ауытқыды. Ең жоғары концентрация Ян өзенінің сулы - батпақты алқабына кіре берісте байқалды. Негізгі компоненттерді талдау хинолонды антибиотиктер негізінен ауруханалардан, тұрмыстан, аквадақыл өнеркәсібінен төгілетін ағынды сулардан пайда болады деп болжауға мүмкіндік береді (Liu, K et al., 2018).

Ағынды сулардағы тетрациклиндердің (окситетрациклин, доксициклин және тетрациклин) құрамы кеңінен танымал (Gudda et al., 2023).

Балтық теңізінде ең жиі анықталған қосылыстар сульфаметоксазол, триметоприм, шөгінділерде окситетрацилин және су түбінде сульфаметоксазол мен триметоприм болды (Siedlewicz et al., 2018).

Ogunbanwo, O. M., Kay, P., Voxall, A. B., және тағы басқа ғалымдар Нигерияның оңтүстік – батысындағы Лагос қаласындағы жер үсті суларында және ағынды суларында 19 терапевтік сыныпқа жататын 37 фармацевтикалық препараттардың болуына мониторинг жүргізді. Африка өзендерінің су алаптарындағы фармацевтикалық ластану туралы жүргізген зерттеулері әлемде бұрын – соңды болмаған ең жоғары концентрацияларды көрсетті. Анықталған қосылыстардың ең жоғары концентрациясы 75 – тен 129 мкг/л – ге дейін, ал 13 қосылыстың орташа концентрациясы мкг/л шегінде болды. Нигерия өзендерінде фармацевтикалық препараттардың концентрациясы Европа мен Америка құрама штаттарына қарағанда бірнеше есе жоғары. Ластанудың негізгі көзі ағынды сулар, бірақ реттелмейтін ластанушы көздер туралы одан әрі зерттеулер қажет (Ogunbanwo et al., 2022).

Wilkinson, J. L., Voxall, A. B. A., Kolpin, D. W., және тағы басқа ғалымдар 137 географиялық аймақтағы дүние жүзінің 258 өзенінің БФИ - мен (белсенді фармацевтикалық ингредиенттер) ластануының жаһандық зерттеуін жасады. 104 елден 1052 орыннан сынамалар алынған (ішінде барлық континенттер және БФИ - мен ластану бұрын зерттелмеген 36 ел бар) және 61 БФИ – дың құрамы түрлі аналитикалық әдістермен талданды. БФИ – дың жоғары жалпы концентрациясы Сахараның оңтүстігінде Африкада, Оңтүстік Азияда және Оңтүстік Америкада байқалды. Авторлар ең көп ластанған орындар күнкөрісі төмен және орташа елдерде болғандығын және ағынды сулар мен қалдықтарды басқару инфрақұрылымы нашар аймақтармен байланысты екендігін атап өтті. Әлемнің көптеген елдерінің осы зерттеулерден тыс қалуы, аталған мәселенің ауқымын жаһандық тұрғыдан бағалауды қиындатады. Зерттеушілердің айтуы бойынша фармацевтикалық перпараттармен ластану қоршаған орта және адам денсаулығы сонымен қатар БҰҰ – ның Тұрақты даму мақсаттарына жету жолында жаһандық қауіп төндіреді (Wilkinson, J. L., Voxall, A. B. A., Kolpin, D. W., et al., 2022).

Антибиотиктердің су айдындарына әр түрлі жолдармен түсетіні белгілі, олардың негізгілері: медициналық мекемелерден, фармацевтикалық өнеркәсіптерден және тұрмыстық шаруашылықтан құрамында антибиотик қалдықтары бар ағынды суларды ағызу (сурет 1):

- Антибиотиктерді ауыл шаруашылығында, әсіресе ірі қара мал, шошқа, құс және аквадакыл өсіруде өсуді ынталандыру үшін және инфекциялардың алдын алу үшін қолданады.
- Дәрілік препараттардың қалдықтары фермалар мен балық шаруашылығының ағынды суларымен су айдындарына түседі (Cowieson et al., 2019). Емдік және профилактикалық мақсаттан басқа антибиотиктерді азықтық қоспа ретінде жануарлардың дене массасын үлкейту үшін және мал азығының консерванты ретінде қолданады (Bacanli et al., 2019).
- Ағынды суларды тазарту қондырғыларының тиімділігінің жеткіліксіздігі, антибиотиктерді толығымен жоюға қабілетсіздігі олардың өзендерде, көлдерде және теңіздерде таралуына әкеледі (Zeng et al., 2022).



Сурет 1. Антибиотиктердің негізгі тасымалдану жолдары

Ағынды суларды тазарту қондырғылары

Ағынды суларды тазарту қондырғылары антибиотиктерді барлық уақытта тиімді жоюға қабілетті емес, бұл олардың өзендерге, көлдерге және теңіздерге түсуіне әкеледі. Мұның негізгі себептері мамандандырылған тазалау технологияларының болмауы, өйткені ағынды суларды тазарту қондырғыларының көпшілігі органикалық ластағыш заттарды, азот пен фосфорды жоюға бағытталған, бірақ антибиотиктер сияқты күрделі химиялық қосылыстарды жоюға арналмаған. Сонымен қатар дәрілік препараттар стандартты тазалау әдістеріне төзімді екендігі белгілі (Лыков және т.б., 2020; Дягелев және т.б., 2023).

Антибиотиктердің метаболикалық өзгерістерге ұшырамайтындығын және ағынды суларды тазарту қондырғылары арқылы сол күйінде ілесіп шығатындығын Spielmeier A, Petri MS және тағы басқалар зерттеген. Авторлар ағынды суларды тазарту қондырғыларында тазарту циклынан кейін су қабылдағышқа түсетін сулар қоршаған ортаға түсетін антибиотиктердің елеулі көзі екендігін анықтады. Күрделі аналитикалық әдістер қолданылған ұзақ мерзімді лизиметриялық және далалық зерттеулер бүкіл әлемде қолданылатын ветеринарлық препараттардың және олардың метаболиттерінің әрі қарайғы экологиялық тағдырын егжей – тегжейлі зерттеуге мүмкіндік беретінін анық көрсетті. Тетрациклиндер топырақтың беткі қабатында жоғары концентрацияда (>100 мкг/кг) сақталады және топырақтың тереңірек қабаттарында немесе жер асты суларында шайылу болмайды.

Сульфаниламидтер көп жылдар бойы ауылшаруашылық топырақтарына енгізілмейтініне қарамастан, төмен концентрацияда (ng L^{-1}) топырақ фильтратында табылған. Осыған байланысты авторлар кейбір ветеринарлық препараттардың күтілгеннен де тұрақтырақ екендігін және қолданғаннан кейін ондаған жылдардан кейін де топырақта қалатынын анықтады. Антибиотиктерге төзімділіктің қалыптасуына қоршаған ортадағы антибиотик қалдықтарының мардымсыз мөлшері де әсер етеді (Spielmeier et al., 2020).

Биологиялық өңдеудің тиімділігі бұл жағдайда төмен, себебі ағынды суларды тазарту қондырғыларының биореакторларында органикалық заттарды ыдырататын бактериялар қолданылады, бірақ антибиотиктер олардың тіршілік белсенділігін тежей алады. Нәтижесінде

ластаушы заттардың биодеградация процесі баяулайды, ал антибиотиктер суда әрі қарай да қала береді. Болашағы бар әдістерге химиялық, кейбір физика-химиялық және аралас әдістер жатады. Көптеген елдерде суды тазалау станцияларында озондау немесе ультракүлгін сәулелермен өңдеу хлорлау әдісін ығыстыруда.

Суды фармацевтикалық препараттардан тазартудың физика-химиялық немесе аралас тазарту әдістерінен келесі әдістерді ұсынады:

- электрохимиялық (мембраналық электродиализ, электроактивация, оттегін бере отырып электрохимиялық тазалау);
- белсенді көмір негізінде адсорбциялау;
- мембраналық (нанофльтрация + кері осмос және т.б.);
- катализаторлар қатысында ультрадыбыстық өңдеу;
- суды ферменттермен және персульфаттармен өңдеу.

Фармацевтикалық препараттармен судың ластануын жою үшін экологиялық таза препараттарды өндіруге көшу қажет (Долина және т.б., 2018).

Көп жағдайда ағынды суларды тазарту қондырғыларының тиімсіздігі сорбциялық және мембраналық сүзгілердің болмауынан туындайды. Көптеген антибиотиктер суда ерігіш және әдеттегі құм мен механикалық сүзгілерде ұсталмайды. Мембраналық технологиялар (кері осмос) құнының қымбаттығына байланысты сирек қолданылады.

Химиялық тазарту кезінде хлорлау және коагуляция антибиотиктерге тиімсіз. Озондау және ультракүлгін сәулелермен өңдеу антибиотиктерді ыдыратады, бірақ құнының жоғарылығы мен энергияны көп тұтынуына байланысты тазарту қондырғыларында әрдайым қолданыла бермейді (Huang et al., 2021). Экологиялық тиімді технологияға жатқанымен су тазарту станцияларын қайта жабдықтау және қайтадан құру қымбатқа түседі. Соңғы жылдары тотығу технологияларына негізделген жаңа процестер пайда болды: «Пероксон» процесі, ультракүлгін сәулелелену кезінде озондау, сутегі асқын тотығының (H_2O_2) қатысуымен ультракүлгін сәулелену кезінде озондау; «Карбозон» процесі, «Сонозон» процесі, тотықтырғыш газбен тотықтыру; «Фентон» процесі, суперкритикалық судағы тотығу, фотокаталитикалық процестер (Долина және т.б., 2018).

Антибиотиктер органикалық бөлшектермен байланысып, түпті шөгінділерде тұнып, содан кейін қайтадан босап шығады. Ағынды суларды тазарту қондырғыларының тұнбалары көбінесе ауыл шаруашылығында тыңайтқыш ретінде пайдаланылады, бұл антибиотик қалдықтарының топырақ пен су қоймаларына түсуіне ықпал етеді (Гетьман және т.б., 2013).

Бірқатар жағдайларда жеткіліксіз тазартылған ағынды суларды тікелей ағызады: жоғары жүктеме кезеңдерінде (жаңбыр, су тасқыны) тазарту қондырғылары жеткілікті тазартылмаған ағынды суларды ағызуы мүмкін. Кіші өзендер мен көлдерде мұндай тастандылар антибиотик қалдықтарымен ластанудың жоғары деңгейіне әкеледі.

Nasiosmanoğlu және тағы басқа ғалымдар өз зерттеулерінде кең таралған төрт фторхинолондық антибиотиктердің (офлоксацин, норфлоксацин, ципрофлоксацин, энрофлоксацин) адсорбциялық жойылуын балама адсорбент ретінде табиғи колеманитті пайдалана отырып бағалады. Изотермиялық зерттеулер барысында фторхинолондар қоспасының, сонымен қатар жеке қосылыстардың мерзімді адсорбциясы бойынша бірқатар тәжірибелер жүргізді. Адсорбцияның тиімділігіне рН және температураның әсері анықталды. Алынған нәтижелер адсорбцияның эндотермиялық және өздігінен жүретінін көрсетті. Әр түрлі рН мәндеріндегі адсорбциялық зерттеулер колеманитпен адсорбцияланған фторхинолондардың мөлшері қышқыл және бейтарап ортада тұрақты, ал рН – тың негізгі мәндерінде төмендей бастайтыны байқалды. Термодинамикалық зерттеулер адсорбция процесінде қатты дене – сұйықтық бөлінуінің шекарасында кездейсоқтық жоғарылаған адсорбцияның өздігінен жүретінін және оның эндотермиялық екендігін көрсетті. Авторлар адсорбциялық тәжірибелерге дейін және одан кейінгі материал сипаттамаларына сүйене отырып, адсорбция механизмі фторхинолондардың протондалған амин топтары мен

колеманиттің теріс зарядталған борат бірліктері арасындағы электростатикалық тартылыспен байланысты деп қорытынды жасаған (Nasirmanoğlu et al., 2023).

Осы ретте тазарту қондырғыларының ағынды суларды антибиотиктерден тазарту тиімділігін арттыру үшін колеманит минералын пайдаланудың тиімділігін қарастыруға болады. Колеманит бораттар класына жататын минерал, химиялық формуласы $\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. Бордың табиғи көзі болғандықтан одан бор қышқылы, басқа да қосылыстар өндіріледі. Бұл Қазақстан Республикасында Индер кен орнында кездеседі. Колеманит бетінде антибиотиктердің адсорбциялану реакциясы жүреді. Процесті түсіндіру үшін қарапайым модель ұсынуға болады: антибиотик молекуласындағы –ОН (гидроксил) немесе –COOH (карбоксил) функционалдық тобы колеманит минералының бетімен әрекеттеседі. Минералдың беті гидроксильді (–ОН) және кальций иондарына (Ca^{2+}) бай болғандықтан, ол антибиотик молекулаларын иондық және сутектік байланыстар арқылы бекіте алады.

Қарапайым модель:



Антибиотиктердің қоршаған ортаға шығарылуы, микробтық қауымдастықтың құрылымын, әртүрлілігін және белсенділігін өзгерту арқылы үлкен экологиялық қауіп тудырады. Физикалық адсорбция, химиялық тотығу басқа да ағынды суларды тазарту қондырғылары антибиотиктерді толықтай жоя алмайды және екінші ретті ластануды тудыруға қабілетті. Антибиотиктерді шектен тыс пайдалану және оларды алдын – ала өңдемей кәдеге жарату қоршаған ортада айтарлықтай зардаптарға әкеледі (Apreja et al., 2022).

Көптеген тазарту қондырғылары ескірген технологиялармен жұмыс істейді және жаңартылмайды. Шағын елді мекендер мен ауылдық жерлерде ағынды суларды тазарту қондырғылары жоқ, болған күннің өзіне антибиотиктерден тазарту үшін жабдықталмаған Ауруханаларда бактерияға қарсы препараттардың көп қолданылуына байланысты медициналық мекемелер ағынды сулардағы антибиотиктердің негізгі көзі болып саналады. Бұл заттардың бір бөлігі қалдықтармен бірге кәрізге түседі және толығымен жойылмайды.

Тұрмыстық жағдайда да антибиотиктер пайдаланылмаған дәрілік препараттарды тастаған кезде немесе емдеу курсы аяқталған соң кәріз жүйесіне түседі. Халықтың дәрілік препараттарды жою тәсілдері туралы жеткілікті хабардар болмауы бұл мәселені ушықтырады (Ekwanzala et al., 2020).

Көптеген дамушы елдерде ауруханалардың тазартылмаған ағынды сулары қалалық ағынды сулармен бірге ағызылады. Алайда, егер аурухананың ағынды сулары бөлек тазартылмаса, олар микробқа қарсы гендер мен микробтардың қоршаған ортаға енуіне байланысты адам денсаулығына қауіп төндіреді. Мұндай ағынды сулар бірқатар жұқпалы микроағзалардың, пайдаланылған микробқа қарсы қосылыстардың және микробқа қарсы төзімділіктің дамуына ықпал ететін ластаушы заттардың нүктелік ластаушы көзі болып саналады.

Бұл ластаушы заттарды ағызбастан бұрын жою микробқа қарсы заттардың қоршаған ортаға әсерін және супербактериялардың пайда болу қаупін азайтады.

Ағынды суларды тазартатын орындарда микробқа қарсы заттары бар ағынды суларды алдын – ала тазарту адам денсаулығына төнетін қауіпті азайтуға мүмкіндік береді.

Осы мәселеге байланысты Sharma, M., және тағы басқа ғалымдар өз зерттеулерінде ағынды сулардағы микробқа қарсы препараттардың концентрациясын төмендету үшін орталықтандырылмаған тазарту жүйелерін пайдалану мүмкіндіктерін және ең жиі қолданылатын әдістерін қарастырды. Алынған нәтижелер микробқа қарсы препараттарды тиімді жою үшін гибриді әдістердің тиімді екендігін дәлелдеді. Әкімшілік ведомстволардың, денсаулық сақтау орындары, суды тазарту мекемелерінің бірігіп әрекет етуі орталықтандырылмаған тазарту технологиялары микробқа қарсы препараттарды жою тиімділігін арттыра алады деп қорытынды жасауға болады (Sharma, M at al., 2022).

Антибиотиктердің үлкен көлемі мал шаруашылығы секторынан түседі, себебі азық - түлік қауіпсіздігін сақтау үшін халық санының үздіксіз өсуі нәтижесінде дүние жүзінде мал шаруашылығы өндірісі қарқынды дамып келеді. Сәйкесінше, бұл жануарлардың жылдам өсуін ынталандыру және жануарлардың түрлі ауруларының алдын алу үшін антибиотиктерді кеңінен қолдануға алып келді. Дегенмен, антибиотиктер жануарлармен толық сіңірілмейді, нәтижесінде олар несеппен және нәжіспен шығарылады, қоршаған ортада бұл қалдықтар антибиотик қалдықтарының, антибиотиктерге төзімділік гендерінің, антибиотиктерге төзімді бактериялардың негізгі резервуарына айналады (Kenneth et al., 2023).

Антибиотиктердің қалдықтары Қытай, Жапония, Оңтүстік Корея, Европа, АҚШ, Канада және Үндістан сияқты елдердің жер үсті және ауыз суларында, кәріз суларында, топырақта, шөгінділерде және өсімдіктердің кейбір түрлерінде кездеседі (Akhter et al., 2024).

Қазақстан аумағында, агроэкожүйелердің жануарларға тағайындалатын антибиотиктермен ластану жағдайы бар: антибиотиктер ірі қара малға, қойға, шошқаға, құстарға және балықтарға бақылаусыз қолданылады. Қазақстанның көптеген аумақтарында агроөнеркәсіп кешенінің көңі өсімдік шаруашылығында ашық егістіктерде және жылыжайларда органикалық тыңайтқыш ретінде қолданылады. Бірақ осы уақытқа дейін Қазақстан Республикасында қоршаған орта компоненттеріндегі дәрілік препараттарды сандық анықтау жүйелі жүргізілмеген.

Қытайда жасалған бірқатар ғылыми зерттеулер көңді тыңайтқыш ретінде пайдалану, барлық жағдайда топырақ, жер үсті және жер асты сулары, өсімдіктер сияқты қоршаған орта нысандарының ластануына әкелетінін дәлелдеді (Lyu et al., 2020).

Кейбір тұрақты антибиотиктердің бір бөлігі жаңбыр, қар сулары ағынымен су айдындарына түсіп, балықтарда жинақталады. Олардың судағы басқа да тірі ағзаларға потенциалды уыттылығы алаңдатады (Zhang et al., 2023; Herrero - Villar et al., 2024).

Ғылыми зерттеулердің талдауынан көріп отырғанымыздай, жер шарының көптеген экожүйелері медициналық және ветеринарлық препараттармен ластанған. Фармацевтика өнеркәсібінде шығарылатын дәрі-дәрмектер адам мен жануарлар ағзасына 10-20% сіңеді, ал қалғаны қалдықтарға кетеді (Долина және т.б., 2018).

Экожүйелердің антибиотиктермен ластануы болашақта ғаламдық қауіп төндіреді. Антибиотиктердің қоршаған ортадағы тұрақтылығы олардың липофильді табиғатына байланысты. Антибиотиктердің қалдықтарын тазартудың ең тиімді және таптырмас әдісі биоремедиация деп айтуға болады. Антибиотиктердің көпшілігі микроағзалардың және олардың ферменттік жүйелерінің көмегімен биодеградацияға ұшырайды. Микробтық ферменттер тотығу, тотықсыздану т.б. әртүрлі механизмдер арқылы уытты антибиотиктерді аз уытты қосылыстарға дейін түрлендіре алады. Антибиотиктерді ыдырату үшін микробтар мен олардың ферменттерін пайдалану экожүйе үшін экологиялық қауіпсіз, экономикалық жағынан тиімді (Arreja et al., 2022).

Антибиотиктердің аквадақыл өсіруде қолданылуы

Балық шаруашылығында антибиотиктер тұйық су айдындарында инфекциялардың алдын алу үшін қолданылады. Сумен тікелей байланыста болғандықтан, дәрілік препараттардың едәуір бөлігі қоршаған ортаға түсіп, бактериялардың антибиотиктерге төзімді штаммдарының пайда болуына ықпал етеді.

Қарқынды аквадақыл өсіру әдетте шектелген кеңістікте өсірілетін көптеген ағзаларды камтиды, бұл паразиттердің және бактериялық инфекциялардың таралуына ықпал етуі мүмкін, сондықтан сектор үшін айтарлықтай экономикалық шығындардың орын алу қаупі бар (Lulijwa et al., 2020; Rigos et al., 2010).

Осы тұрғыда инфекциялармен және олардың жағымсыз әсерлерімен күресу үшін аквадақыл өсіруге тетрациклиндер, триметоприм (ТМП), сульфаниламидтер, хинолондар, β - лактамдар, фторхинолондар және фениколдар сияқты антибиотиктер кеңінен қолданылады (Gorito et al., 2022).

Соңғы үш онжылдықта Қытайдың аквадақыл өсіру саласы ішкі және әлемдік нарықта тез өсіп келе жатқан сұранысты көрсетті. Қытай бүгінгі таңда әлемдегі балық қорының үштен бірінен астамын өндіріп отыр (Cao et al., 2015; Wang et al., 2019).

Ішкі балық шаруашылығын шамадан тыс игеру жағдайында, қарқынды және жоғарғы тығыздықта өсіру жоғары өнімділік пен пайданы қамтамасыз ету үшін қолданылады, бұл өз кезегінде балықтардың аурулары мен өлімінің артуына әкеледі (Mallory et al., 2012). Сондықтан антибиотиктер осы аурулардың алдын алу үшін және емдеу үшін кеңінен қолданылады (Kümmerer et al., 2009; Hu et al., 2016). Алайда, антибиотиктерді шамадан тыс қолдану балықтарда және табиғи су ортасында антибиотиктердің қалдықтарының пайда болуына әкеледі, бұл қоректік тізбектер арқылы адам ағзасында жинақталып, денсаулығына потенциалды қауіп төндіреді (Postigo et al., 2014; Wang et al., 2016; Urbano et al., 2017; Tang et al., 2022).

Шығыс Қытай балық өнімдерінің ең ірі өндірушісі болып табылады. Ван Цянь, Ю Ян және басқалары түпті тұнбалардың құрамындағы ксенобиотиктермен қатар, түрлі антибиотиктерді де анықтады, олардың тұрақты органикалық ластаушылардың фонында жалпы уыттылыққа қосқан үлесі аз болды және 0,076 % құрады (Qian et al., 2024).

Антибиотиктердің су экожүйелеріне әсер ету механизмдері негізінен су ағзаларына тікелей уыттылық әсерді, микробтық қауымдастықтар мен олардың атқаратын қызметіндегі өзгерістерді, бірінші реттік продуценттерге (микробалдырлар, цианобактериялар) әсерін қамтиды. Антибиотиктердің бірінші ретті продуценттерге әсері су экожүйелеріндегі оттегі мен органикалық заттардың негізгі өндірушілері болып табылатын микробалдырлар мен цианобактериялардың өсуін тежеуге дейін апарады.

Кейбір антибиотиктер балдырлардың көмірқышқыл газын бекіту қабілетін және экологиялық жүйелердің өнімділігін төмендетіп отырып, олардың фотосинтетикалық белсенділігін өзгертеді, Фитопланктон популяциясының бұзылуы зоопланктондар, балықтар және жоғары жыртқыштарға әсер етіп, қоректік тізбектердің теңгерімсіздігіне әкелуі мүмкін. Бүкіл әлемде зерттеушілер су көздеріндегі фармацевтикалық препараттардың туғызатын қауіптерін және олардың қоршаған ортаға әсерін зерттеуде. Қазақстандық ғалымдар Tulegenova, S., Zhantokov, B., Beisenova, R және тағы басқалар *Chlorella sp.* өсу қарқыны мен өсу тежелуін зерттей отырып, фармацевтикалық препараттардың су биотасына әсерін тексеру үшін тест - жүйені пайдаланды. Зерттеу OECD Test No 201: 2011, IDT (тұщы су балдырлары мен циано бактериялардың өсуін тежеу сынағы) зерттеу әдісіне сәйкес жүргізілді.

Қазақстанның су ресурстарын ластау әлеуеті жоғары кетоконазол, тербинафин, дротаверин гидрохлориді, телмисартан, бензилпенциллин және азитромицин сияқты препараттар зерттелді. Азитромицин *Chlorella sp.* үшін аса уытты болып шықты ($0,33 \pm 0,05$ мг/л), амоксициллин аздаған уытты әсер көрсетті ($853,54 \pm 0,27$ мг/л). Азитромицин *Chlorella sp.* төзімділігіне айтарлықтай әсер етті, бұл әсіресе минималды эксперименттік концентрацияда байқалды. Азитромицин бақылаумен салыстырғанда 0,2 мг/л концентрацияда өсу қарқынын екі есе төмендетті, 0,15 мг/л концентрацияда өсудің тежелуі 87 % - дан асты ($r^2=0,89$). *Chlorella sp.* амоксициллиннің жоғары концентрациясында өсуді аздап төмендетіп, минималды сезімталдықты көрсетті (1 мг/л - де 2 %, 1000 мг/л - де 57 %) (Tulegenova et al., 2024).

Антибиотиктердің төмен концентрациясы микробалдырлардың өсуін күшейтеді, ал антибиотиктердің жоғары концентрациясы микробалдырлардың өсуін тежеуі мүмкін (Chen et al., 2017). Кейбір зерттеулердің есептерінде микробалдырлардың түрлерінің бактериялық түрлермен салыстырғанда антибиотиктердің жоғары концентрациясына төзімділігі бар екені көрсетілген (Liu, X et al., 2018). Жасыл микробалдырлар мен цианобактериялар су экожүйелерінде қоректік тізбектің маңызды бөлігі болып табылады. Көпшілік зерттеулерде *Chlorella sp.* мен салыстырғанда, цианобактериялар көп жағдайда антибиотиктердің төмен концентрациясына төзе алады (Valitalo et al., 2017). Нақтырақ айтсақ, цианобактериялар жасыл балдырларға қарағанда аса сезімтал болып келеді. Сонымен қатар, микробалдырлардың әр

түрлі түрлері тіршілік етеді және көк жасыл балдырлардың мүмкіндігі мен түрлі антибиотиктерге сезімталдығын зерттеу кезек күттірмейді (Zhong et al., 2021).

Антибиотиктердің су ағзаларында биоаккумуляциялануы және қоректік тізбек арқылы берілуі

Manyi - Loh C, Mamphweli S. және басқалар антибиотиктермен ластану қоршаған ортада қоректік тізбектің жолдарын, биоаккумуляцияны және биомагнификацияны қамтитын тұйық циклде жүретінін анықтады: ауылшаруашылығы дақылдары тазарту қондырғыларының ағынды суларымен суарылады және сол кезде топырақтың су айдындарын ластауы орын алады. Мұндай жағдайда антибиотиктер аквадақылдардың (балықтар және теңіз шаяндары) тіршілік ортасында жинақталып трофикалық деңгейлер арқылы беріледі (Manyi - Loh et al., 2018).

Антибиотиктердің аквадақылдарда аккумуляциялануы туралы қызықты жұмыстар Бразилиялық ғалымдармен жүргізілді. Сульфадиазин (Sulfadiazine), аквадақыл өсіруде кеңінен қолданылатын антибиотиктер қатарына жатады және тұщы су орталарынан айтарлықтай концентрацияда табылған. Сонымен қатар, сульфадиазиннің (Sulfadiazine) балық шаруашылығында қолданылуы танымал болғанымен, оны қолдану реттелмеген және Бразилия заңнамасында максималды қалдық шегі ұғымы жоқ (МҚШ). Америка Құрама Штаттарында және Еуропалық Одақта сульфадиазин (Sulfadiazine) үшін максималды қалдық шегі 100 мкг/кг құрайды. Бұл қосылыстың балықтағы биоаккумуляциясы адам денсаулығына және су экожүйелерінің биологиялық әртүрлілігін сақтауға қауіп төндіруі мүмкін. Осылайша мал шаруашылығында антибиотиктерді қолданудың артуы бұл қосылыстардың су экожүйелеріне әсері туралы ғаламдық алаңдатушылыққа әкелді, өйткені аквадақыл шаруашылықтарының ағынды сулары антибиотиктердің маңызды көзіне айналды. Ламбари балық шаруашылығы шағын өндірушілер өсіріп отырған, Бразилиядағы дамып келе жатқан нарық, оның өндірісі жылына шамамен 1000 тонна. Бұл түрді өсірумен қатар, жабайы ламбари балығын тұщы су нысандарының маңында қоныстанған тұрғындар кеңінен тұтынады. Ламбари аллохтонды (жемістер, тұқымдар және жердегі бунақденелілерді) және автохтонды (жәндіктер, су өсімдіктері, қабыршақтар және ооциттер т.б.) ресурстарды тұтына отырып, әр түрлі қоректену әдеттеріне ие. Олар барлық трофикалық деңгейлерді иеленеді, яғни бастапқы (өсімдіктермен және фитопланктондармен қоректенеді), екінші ретті немесе үшінші ретті (зоопланктон, жәндіктер және балықтармен қоректенеді) тұтынушы бола алады. Тұнбалар мен қалдықтарды да қорек ретінде тұтына алады. Қоректенудің мұндай сипаты олардың антибиотиктерді де қоса қабылдауына әсер етеді. Осылайша, сульфадиазин (Sulfadiazine) препаратының экологиялық тағдырын жақсы түсіну үшін, ламбаридегі оның биоаккумуляциясы мен сарқылуын бағалау өте маңызды (Evangelista et al., 2023).

Антибиотиктер су ортасына ене отырып, фитопланктон, зоопланктон, омыртқасыз жануарлар және балықтарды қоса алғанда гидробионттардың ағзаларында жинақталып, ауыр зардаптарға әкеледі.

Су ағзаларының антибиотиктерді сіңіруі:

- Микробалдырлар мен фитопланктондар антибиотиктерді судан сіңіре алады, бұл олардың өсуіне, фотосинтез процесіне және жасуша метаболизміне әсер етеді. Мысалы, тетрациклин және эритромицин сияқты антибиотиктер микробалдырлардың фотосинтетикалық белсенділігін тежейтіні көрсетілген.
- Зоопланктон фитопланктонмен қоректену арқылы антибиотиктерді сіңіреді, бұл олардың көбеюін баяулатады және қоректену әдеттерін өзгертеді.
- Су түбіндегі ағзалар (мысалы, моллюскалар, шаян тәрізділер) өз ұлпаларында антибиотиктерді жинақтай алады, бұл олардың тіршілік белсенділігіне, өсуіне және репродуктивті қызметіне әсер етеді (Liu, S et al., 2017).

Құрамында антибиотиктер бар ұсақ ағзаларды ірі жыртқыштар тұтынған кезде биомагнификация процесі жүреді – жоғары трофикалық деңгейлерде ластаушы заттардың концентрациясының жинақталуы.

- Балықтар мен басқа да су жыртқыштары зақымданаған омыртқасыздармен және плактондармен қоректеніп, олардың эндокринді жүйесіне, өсуіне және инфекцияларға тұрақтылығына әсер ететін антибиотик дозаларын алады.
- Теңіз құстары мен сүтқоректілер де антибиотиктердің әсеріне ұшырап, біраз уақыттардан кейін олардың иммундық функциялары мен физиологиясында өзгеріс тудырады (Шульгина және т.б., 2015).
- Теңіз өнімдерін тұтынатын адамдар да антибиотиктердің қалдықтарының әсеріне ұшырауы мүмкін, одан аллергиялық реакциялардың даму қаупі, ішек микрофлорасының бұзылуы орын алады және патогенді бактериялардың антибиотиктерге төзімділігі артады (Huang et al., 2020).

Антибиотиктердің биожинақталуының экологиялық жүйеге жалпы әсері популяция балансының бұзылуынан, негізгі түрлердің санының төмендеуінен, генетикалық мутациялардан және резистенттіліктен көрінеді.

Осылайша, су ағзаларында антибиотиктердің биожинақталуы экологиялық жүйелер мен адам денсаулығына үлкен қауіп төндіреді. Бұл процесс қоректік тізбектердің бұзылуына, биологиялық әртүрліліктің төмендеуіне және антибиотиктерге төзімді бактериялардың таралуына әкеледі.

Антибиотиктерге төзімділік және су экожүйелері

Су экожүйелері тірі ағзаларда антибиотиктерге төзімділіктің қалыптасуы мен таралуында шешуші рөл атқарады, себебі олар әртүрлі микроағзалардың, соның ішінде антибиотиктерге төзімділік гендерін тасымалдайтын бактериялардың (*ARG – антибиотиктерге төзімділік гендері*) резервуары болып табылады. Бұл гендер бактериялар арасында беріліп, экологиялық жүйеге де, адам денсаулығына да қауіп төндіретін жаңа төзімді штаммдар жасай алады (Zhou et al., 2025).

Chukwu, K, B., Abafe, O, A., Amoako, D, G., сияқты ғалымдар қоршаған ортада микроағзаларда микробқа қарсы төзімділікті дамытуға ықпал ететін стресс факторларының әсер ету механизмдері әлі жеткілікті зерттелмеген деп санайды (Chukwu et al., 2023).

Антибиотиктерге жоғары төзімділіктің себебі – антибиотиктерді медицинада қолдану ғана емес, сонымен қатар оларды ветеринария мен ауылшаруашылығында бақылаусыз пайдаланудың артуы. Статистика көрсеткендей, ветеринарияда антибиотиктерді қабылдау медицинаға қарағанда екі есе көп. Ветеринарияда антибиотиктерді тұтынуды есепке алу әлемнің барлық елдерінде жүргізілмейді. Сондықтан ауылшаруашылық кәсіпорындарынан қоршаған ортаға түсетін экологиялық жүктеме әлемде үлкен экологиялық мәселе тудырып отыр (Тимофеева және т.б., 2021; Akbayeva et al., 2019).

Антибиотиктерге төзімділікті қалыптастырудың негізгі механизмдері бактериялық гендердегі мутациялар және гендердің көлденең тасымалдануы болып табылады. Су ортасында гендердің көлденең тасымалдануы әсіресе микробтық қауымдастықтың жоғары тығыздығына, органикалық заттардың болуына және антибиотиктердің тұрақты белсенді әсеріне байланысты.

Бактериялық гендерде мутациялар антибиотиктер ұзақ мерзімді әсер еткенде пайда болады, содан кейін бактерияларда ақуыздардың, ферменттердің және мембраналық - транспорттық жүйелерінің құрылымын өзгертетін стихиялық мутациялар пайда болуы мүмкін. Мысалы, бактериялар антибиотиктердің әсеріне ұшырағанда ақуыз синтезін бұзбас үшін, рибосомалардың құрылымын өзгерте алады.

Гендердің көлденең тасымалдануы (*HGT – horizontal gene transfer*) .

Бактериялар төзімділік гендерін үш негізгі жолмен алмастыра алады: трансформация, трансдукция, конъюгация – бактериялармен байланысқан кезде плазмидтер арқылы төзімділік гендерінің берілуі.

Соңғы кездері микробқа қарсы препараттарға төзімді бактериялар қоғамдық денсаулық сақтауға үлкен қауіп төндіріп отыр. Антибиотиктерге төзімділік гендері (*ARG - antibiotic resistance genes*) гендердің көлденең тасымалдануы арқылы таралады. Осылайша,

микробтардың әртүрлі жағдайларда гендердің көлденең тасымалдануы арқылы гендерін алмастыру механизмдерін түсіну бактериялардың эволюциясы мен бейімделуі және антибиотиктерге төзімділік гендерінің таралуының эпидемиологиялық негізі туралы маңызды түсініктер береді (Tokuda et al., 2024).

Резистенттілік резервуары ретінде су қоймаларында тұрақтылықтың таралуына ықпал ететін факторлар антибиотиктермен ластану, ауыр металдардың және басқа да ластаушылардың болуы.

Су ортасының антибиотиктермен ластануы орын алғанда антибиотиктердің қалдықтары селекциялық қысым тудырып, төзімді бактериялардың өмір сүруіне және сезімтал штамдарды ығыстыруына ықпал етеді. Сонымен қатар, антибиотиктердің төмен концентрациясы да төзімділіктің дамуын ынталандырады және гендердің көлденең тасымалдану механизмдерін белсендіреді.

Ағынды сулардың құрамында ауыр металл тұздарының (мысалы, сынап, қорғасын, кадмий) және басқа ластаушы заттардың болуы бактериялардың төзімділігін тудыруы мүмкін, себебі көптеген төзімділік гендері антибиотиктерге ғана емес, басқа да токсикалық заттарға қарсы қорғаныс механизмдерін іске қосады (Qiu X al., 2021).

Антибиотиктер мен ауыр металдардың аралас әсері микроағзалардың бейімделу процесін тездетеді.

Резистенттілік резервуары ретінде су экожүйесінің биоценоздары 3 негізгі формамен ұсынылған:

- Су көптеген бактериялардың тіршілік ету ортасы болып табылады, олардың арасында қоздырғыштар (мысалы, ішек таяқшалары, салмонелла, тырысқақ, вибриондар), комменсалдар және басқалары болуы мүмкін, соның ішінде ластану әсерінен антибиотиктерге төзімділік қалыптастыратын түрлер де бар.

- Су қоймаларында төзімді гендердің таралуына ықпал ететін бактериялар арасында гендердің көлденең тасымалдануы жүреді.

- Өздерінің антибиотиктерге төзімділігін арттырып және адамдар мен жануарларда емдік терапияның тиімділігін төмендете отырып симбионттар мен патогенді бактериялар суда резистенттілік гендерімен плазмидтермен алмасады (Liu, Y et al., 2020). Көптеген төзімді микроағзалар экзополисахарид матриксімен қорғалған күрделі көп түрлі қауымдастықтар - биопленкалар түзеді. Биопленкалар төзімділіктің таралуына ықпал етеді, олардың ішіндегі бактериялар генетикалық материалмен белсенді алмасады.

Түпті шөгінділерде және тұнбаларда механикалық әсер етуі арқылы таралуы мүмкін антибиотиктерге резистенттілік гендері бар бактериялар да жинақталады (мысалы, су тасқыны, су түбін тереңдету, қазу жұмыстары кезінде (Zhang et al., 2022)).

Су экожүйелерінен құрлық экожүйелеріне антибиотиктерге төзімділік гендері тарала бастағанда, кері процесс те жоққа шығарылмайды (Андрюков және т.б., 2022). Ағынды суларды тазарту қондырғылары арқылы, ескірген жабдықта бактериялар мен төзімділік гендері әрдайым тиімді түрде жойылмаса, антибиотикке төзімді бактериялары бар су сумен жабдықтау жүйесіне еніп, адамдардың ауру жұқтыру қаупін арттырады.

Биопленка түзетін бактериялар, көбінесе оларды антибиотиктерге, ультракүлгін сәулелерге, химиялық биоцидтерге, иесінің иммундық реакцияларына және басқа сыртқы стрестерге төзімділігін арттыратын қасиеттерге ие болады. Биопленкалар кедергі қызметін атқарып, микроағзаларды экстремальды температура, рН, жоғары тұздылық, қысым, нашар қоректік заттар және антибиотиктер т.б. сияқты қоршаған ортаның қатал жағдайларынан қорғай алады. Құрылымдық кедергілер, биопленка ішіндегі төзімді жасушалармен бірге антибиотиктерге төзімділікте шешуші рөл атқарады. Зерттеулер көрсеткендей, биопленкалармен байланысты инфекцияларды емдеу қиын. Сәйкесінше, антибиотиктерді тағайындау биопленкамен байланысты инфекцияларды олардың антибиотиктерге төзімділігіне және генетикалық мутацияларына байланысты жоймайды. Биопленка қазіргі уақытта созылмалы инфекциялардың негізгі себебі болып саналады және антибиотиктерге

төзімді бактериялар осы формада жиі кездеседі. Созылмалы инфекциялық аурулардың 80 % - дан астамы биопленкамен туындаған деп есептеледі және әдеттегі антибиотиктер бұл инфекцияларды толығымен жоя алмайды (Abebe et al., 2020).

Ауыл шаруашылығы өнімдері мен суару арқылы да төзімді бактериялардың таралуы ықтимал. Ластанған су егістіктерді суару үшін пайдаланылады, салдарынан төзімді бактериялар ауылшаруашылық дақылдарына түседі.

Сол сияқты, антибиотиктерге төзімділік су ағзалары арқылы да таралады: адам қорек ретінде тұтынатын балық пен теңіз өнімдері төзімді бактерияларды жинақтай алады. Зақымданған су мен қоректі тұтынатын жабайы құстар мен жануарлар төзімді патогендерді алыс қашықтықтарға тасымалдай алады (Brunton et al., 2019). Табиғи су айдындарымен байланыста болған кезде өзендерде, көлдерде және теңіздерде шомылатын адамдар дәрілік препараттарға төзімді микроағзалар бар суды жұтып, емделуі қиын инфекцияларды жұқтыру қаупін арттыруы мүмкін. Бұндай жағдайда балықшылар, аквадақыл өсірумен айналысатын фермерлер және тазарту қондырғыларының жұмысшылары жоғары қауіп тобында болады.

Антибиотиктердің қоршаған ортада, атап айтқанда жер үсті суларында таралуы келесі медициналық және экологиялық зардаптарға әкелуі мүмкін (Munita et al., 2016).

- Антибиотиктер гидробионттардың (балықтар, моллюскалар), ұлпаларында жиналады, бұл жыртқыштар мен адамдарға қауіп төндіреді.
- Бактериялардың антибиотиктерге төзімділігінің артуы адамдар мен жануарларда көптеген инфекцияларды емдеуді қиындатады.
- Микробтық қауымдастықтардың құрамының өзгеруі органикалық заттардың, қоректік заттардың айналымы және су айдындарының өнімділігі сияқты экожүйелік процестерді бұзуы мүмкін.
- *Vibrio cholerae* (холера) немесе *Salmonella* (сальмонелла) сияқты патогендердің төзімділігінің артуы эпидемияның ықтималдығын арттырады.

Су ағзаларының биологиялық әртүрлілігінің азаюы

Табиғи су қоймаларына түсе отырып, антибиотиктер тірі ағзаларға улы және селективті әсер етеді (Buschmann et al., 2012).

Кейбір антибиотиктер (мысалы, тетрациклиндер) фитопланктондар мен су өсімдіктері үшін улы, өйткені олар фотосинтез процесіне кедергі келтіреді және көбеюді тежейді.

Антибиотиктер жас омыртқасыздар мен дернәсілдерінің метоболизмін өзгерту арқылы олардың дамуын бұзады. Олар шаян тәрізділердің, моллюскалардың, жәндіктердің өсуі мен көбеюіне кедергі келтіреді. Судың фильтрация процесі бұзылады, өйткені моллюскалар мен зоопланктондар оны тазартуда маңызды рөл атқарады. Салдарынан зоопланктон санының азаюы, және оның артынша олар қорек ретінде тұтынатын балықтар популяциясының қысқаруы орын алады. Моллюскалардың өлім-жітімінің салдарынан судың өздігінен тазаруы бәсеңдейді.

Антибиотиктер улы әсер ете отырып, балық ұлпаларында жинақталуы мүмкін. Мутацияларға және репродуктивті қабілетін жоюға әкеле отырып, балықтардың гормондық қызметтерін өзгертеді. Популяцияның тірі қалуын төмендетіп, эмбриондар мен жас особьтардың дамуын бұзады. Нәтижесінде балық санының, әсіресе жыртқыш түрлерінің азаюы, түрлер арасындағы қорек үшін бәсекелестіктің артуы, балық қорының азаюы байқалады.

Жыртқыш құстарда (аққұтандар, шағлалалар, қырандар) және сүтқоректілерде (күзендер мен итбалықтар) зат алмасуды бұзатын улы қосылыстар жинақталады. Антибиотиктер жануарлардың иммунитеті мен ас қорытуын нашарлатып, ішек микрофлорасына әсер етеді. Гормоналды бұзылыстармен байланысты, жануарлардың мінез құлқының өзгеруі байқалады. Салдарынан құстардың денсаулығының нашарлауына және қоректік базаның азаюына байланысты құстар мен сүтқоректілердің санының азаюы орын алады (Гласкович және т.б., 2010).

Биологиялық әртүрліліктің төмендеуінің және антибиотиктерге төзімді бактериялардың көбеюінің салдарынан су қоймаларында мүлдем тіршілік жоқ «өлі аймақтар» пайда болады. Кейбір түрлер жергілікті және ғаламдық деңгейде жойылып, су экожүйесінің құрылымын өзгертеді.

Экожүйелік процесстердің тұрақсыздануы

Антибиотиктер органикалық заттардың ыдырауына жауапты бактериялардың санын азайта алады, бұл пайдалы элементтердің айналымын, мысалы, көміртегі, азот және фосфордың биохимиялық циклдарын баяулатады (Zhu et al., 2017).

Қоректік заттардың айналымының бұзылуы экологиялық жүйелердің деградациясына және өзін - өзі реттеу қабілетінің бұзылуына алып келеді.

Антибиотиктердің уытты әсеріне байланысты зоопланктон мен балықтардың негізгі түрлерінің азаюы экологиялық жүйеде каскадты әсерлерге әкеледі.

Бактериялардың атап айтқанда, судың өзін - өзі тазартуына жауапты гетеротрофты бактериялардың биологиялық алуантүрлілігінің төмендеуі минералдану процесін және қол жетімді көміртегінің жинақталуын баяулатады. Бұл жағдайда антибиотиктер фитопланктонның құрылымын өзгертеді, ол судағы оттегінің мөлшерін азайтып, ОХҚ пен ОБҚ арттырады. Сонымен қатар табиғи сулардың өзін - өзі тазартуын қиындатады. Бактериялардың функционалды топтарының арақатынасының бұзылуы су қоймасының өзін - өзі тазарту қабілетін төмендетіп, эвтрофикация процесін жеделдетеді (Akbaeva et al., 2020; Akbaeva et al., 2014). Антибиотиктер микроағзалардың қатынасына әсер етіп, «судың гүлденуіне» ықпал ететін төзімді микробалдырлардың (мысалы, көк - жасыл балдырлар) белсенді көбеюіне әкеледі. Бұл да оттегінің деңгейін төмендетеді, балықтардың қырылуына және су сапасының нашарлауына алып келеді (Akbaeva et al., 2025).

Антибиотиктерге төзімді микроағзалар көмірқышқыл газы мен органикалық қосылыстардың арасындағы балансты өзгертіп, көміртегін тиімсіз өңдейді (He et al., 2021).

Түпті шөгінділердегі және судағы бактериялық қауымдастықтың құрамының өзгеруі қоректік тізбектердің құрылымына әсер етіп, су қоймаларының өнімділігін төмендетеді.

Антибиотиктер азот пен фосфор қосылыстарымен химиялық реакцияларға тікелей қатыспайды, бірақ олар биогеохимиялық процестерді реттейтін микробтық қауымдастықтарға әсер ету арқылы осы элементтердің айналымына жанама әсер етуі мүмкін (Сурет 2).

1. Антибиотиктердің әсерінен нитрификацияның (азот айналымы) бұзылуы

Антибиотиктер нитрификациялаушы бактериялардың (*Nitrosomonas*, *Nitrobacter*) белсенділігін тежейді, ол аммонийдің жинақталуына және нитраттардың түзілуінің төмендеуіне әкеледі.

Қалыпты жағдайда (антибиотиктердің қатысынсыз):

- $\text{NH}_4^+ + 1,5 \text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_2^- + 2\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O}$ (нитрификация, 1 - саты – *Nitrosomonas*)
- $\text{NO}_2^- + 0,5 \text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_3^-$ (нитрификация, 2 - саты – *Nitrobacter*)

Антибиотиктердің қатысында:

- Бактериялардың белсенділігінің төмендеуі $\Rightarrow$ реакция баяулауы.
- Аммонийдің (NH_4^+) және нитриттердің (NO_2^-) жиналуы, олар уытты болуы мүмкін.

2. Антибиотиктердің әсерінен денитрификацияның бұзылуы

Денитрификациялаушы бактериялар (мысалы, *Pseudomonas*, *Paracoccus*, *Bacillus*) нитраттарды молекулалық азотқа дейін (N_2) түрлендіреді:

Қалыпты жағдайда (антибиотиктердің қатысынсыз):

- $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$ (газ тәрізді азот атмосфераға кетеді).

Антибиотиктердің қатысында:

- Ферментативті белсенділіктің бұзылуы.
- Нитраттардың (NO_3^-) және азот оксидтерінің (NO , N_2O) жинақталуы $\rightarrow$ парниктік газдар және эвтрофикация.

3. Органикалық фосфорды минерализациялауға ықпалы

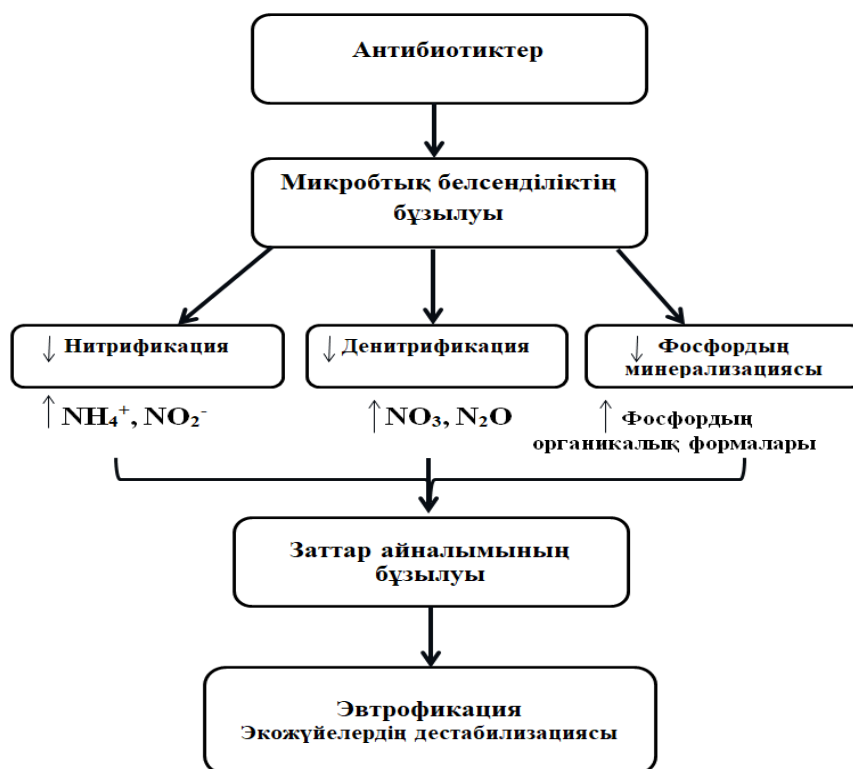
Антибиотиктер бактериялардың фосфатазалық белсенділігін тежейді, бұл органикалық фосфор формаларының минерализациясын төмендетеді:

Қалыпты жағдайда (антибиотиктердің қатысынсыз):

- $C_6H_{13}O_9P$ (органикалық фосфат) $\rightarrow PO_4^{3-}$ + көміртекті қосылыстар (фосфатазалардың әсерінен).

Антибиотиктердің қатысында:

- **Фосфатазалардың тежелуі** $\Rightarrow$ органикалық фосфордың қолжетімді PO_4^{3-} формасына ауысуын баяулатады.
- Антибиотиктерге төзімді ағзалардың өлі биомассасы ыдыраған кезде — көп мөлшерде PO_4^{3-} бөлініп шығады $\Rightarrow$ эвтрофикацияға орын алады.



Сурет 2. Антибиотиктердің азот және фосфор айналымдарына әсері

Төзімді микроағзалардың көбеюі кейбір бактериялардың метаболизмінің өзгеруіне ықпал етіп, салдарынан азот айналымының типтік емес жолдарының пайда болуына әкеледі. Фитопланктон үшін нитраттардың жетіспеушілігі балдырлардың өнімділігін шектейді. Судағы аммоний азотының (NH_4^+) құрамының артуы балықтар мен басқа ағзалар үшін уыттылықты арттырады. Денитрификацияның төмендеуі «судың гүлденуіне» әкелетін нитраттардың жинақталуын тудырады.

Денитрификация сағалық және жағалаулық экожүйелердегі азотты кетіру және азот оксидін (N_2O) өндірудің маңызды жолы болып табылады және азоттың шамадан тыс жүктемелерінен туындайтын су эвтрофикациясына қарсы тұруда маңызды рөл атқарады (Нон et al., 2015).

Осылайша, судың химиялық құрамының өзгеруі (артық аммоний мен нитриттер гидробионттар үшін улы); биохимиялық процестерді өзгертетін антибиотиктерге төзімді бактериялардың көбеюі; су қоймасының эвтрофикациясының жоғарылауы, атап айтқанда көк - жасыл балдырлардың белсенді өсуі, оттегі деңгейінің төмендеуі, ағзалардың жаппай қырылуы орын алады.

Сол сияқты фосфор айналымы бұзылады. Қалыпты жағдайда органикалық фосфор (биомассадан ыдырайтын) фосфаттарды (PO_4^{3-}) шығара отырып, бактериялармен минералданады. Фосфаттар фитопланктондар және балдырлармен сіңіріледі. Шөгу процесінде фосфордың бір бөлігі түпті тұнбаларға өтеді, бірақ бактериялармен ыдырап суға қайта түсуі мүмкін. Антибиотиктер фосфатты минералдайтын бактериялардың белсенділігін төмендетеді, осылайша органикалық фосфордың қол жетімді фосфаттарға айналуының тежелуіне алып келеді. Бактериялық қауымдастықтың құрамының өзгеруі түпті тұнбалардан фосфаттардың бөлінуіне ықпал ететін анаэробты процестерді күшейтеді. Антибиотиктерге төзімді цианобактериялардың көбеюі, көк - жасыл балдырлардың қолжетімді фосфаттарды белсенді тұтынуына әкеледі, бұл «судың гүлденуіне» ықпал етеді. Нәтижесінде қоректік заттардың теңгерімсіздігіне байланысты эвтрофикация жоғарылайды; улы метоболиттерді (микроцистиндер) бөлетін уытты балдырлар дамиды; органикалық заттардың ыдырауы баяулайды; жас балықтар мен дернәсілдердің дамуы бұзылып, тірі қалу мүмкіндігі төмендейді.

Күкірт айналымы су экожүйелеріндегі негізгі биогеохимиялық процестерде, оның ішінде күкіртсутегінің (H_2S) түзілуінде, сульфаттардың (SO_4^{2-}) түрленуінде және микроағзалардың энергия алмасуына қатысуында шешуші рөл атқарады. Су нысандарына түсе отырып, антибиотиктер күкірттің балансын бұзуға алып келетін, құрамында күкірті бар қосылыстардың трансформациясына жауап беретін микробтық қауымдастықтың тіршілігін шектейді (Титова және т.б., 2017).

Су экожүйелері құрамында күкірті бар қосылыстарды өңдеуге қатысатын микроағзалардың қызметіне тәуелді. Табиғи жағдайда күкіртсутегінің (H_2S) сульфаттарға (SO_4^{2-}) дейін тотығуы жүреді. Осылайша аэробты күкірт бактериялары (*Beggiatoa*, *Thiobacillus*) улы күкіртсутегін күкіртке (S) немесе сульфаттарға (SO_4^{2-}) дейін тотықтырады. Бұл процесс су ағзалары үшін қауіпті күкіртсутегінің жинақталуына жол бермейді. Бір мезгілде сульфаттардың (SO_4^{2-}) күкіртсутегіне (H_2S), дейін тотықсыздануы жүреді, анаэробты десульфатор - бактериялар (*Desulfovibrio*, *Desulfotomaculum*) сульфаттарды күкіртсутегіне дейін тотықсыздандырады. Бұл процесс оттегісіз аймақтарда (түпті шөгінділер, оттегі тапшылығы бар аймақтар) жүреді. Балдырлар мен бактериялар құрамында күкірті бар аминқышқылдары мен ақуыздардың биосинтезі үшін сульфаттарды сіңірген кезде ортада күкірттің органикалық заттарға интеграциялануы жүреді. Органикалық заттардың ыдырауы кезінде күкірт айналымға қайтып оралады (Wasmund et al., 2017).

Антибиотиктер күкіртсутегінің (H_2S) тотығуына жауапты аэробты бактериялардың белсенділігін тежейді, бұл күкіртсутегінің түпті тұнбаларда жиналуын және оттегінің сарқылуын тудырады. Күкіртсутегі балықтар мен моллюскалар үшін улы. Салдарынан судың күкіртсутегінен өздігінен тазаруы төмендейді, H_2S - тің улылығынан гидробионттардың өлімі артады, аэробты жағдайларда күкірт айналымы баяулайды. Күкіртсутегінің (H_2S) түзілуіне және анаэробты бактериялардың өсуіне әкелетін сульфатредукция белсенді жүреді. *Desulfovibrio* және *Desulfotomaculum* сияқты сульфатредукциялаушы бактериялардың әрекетін күшейту, тіпті антибиотиктердің түсуін тоқтатқаннан кейін де аэробты және анаэробты қауымдастықтар арасындағы теңгерімсіздікке әкеледі. Бұл құбылыстың салдары суда экожүйенің тепе - теңдігін бұзатын анаэробты зоналардың көбеюі (гипоксия, аноксия); атмосфераға күкіртсутегінің шығарылуы; аэробты ағзаларға қысым жасау (Весегга et al., 2024).

Органикалық заттардағы күкірт балансының бұзылуы фитопланктондар үшін сульфаттардың қолжетімділігін азайтып, су қоймаларының бастапқы өнімділігін төмендетеді; детриттен күкірттің бөлінуі баяулайды. Нәтижесінде фитопланктон санының азаюына әкелетін, құрамында күкірті бар қосылыстардың жетіспеушілігі байқалады. Тұнбаларда теңгерімсіз органикалық заттар жиналады.

Суда және түпті тұнбаларда күкіртсутегінің (H_2S) концентрациясының артуы оттегі жетіспеушілігінен және токсикалық әсерден балықтардың, моллюскалардың және зоопланктондардың өлуіне әкеледі.

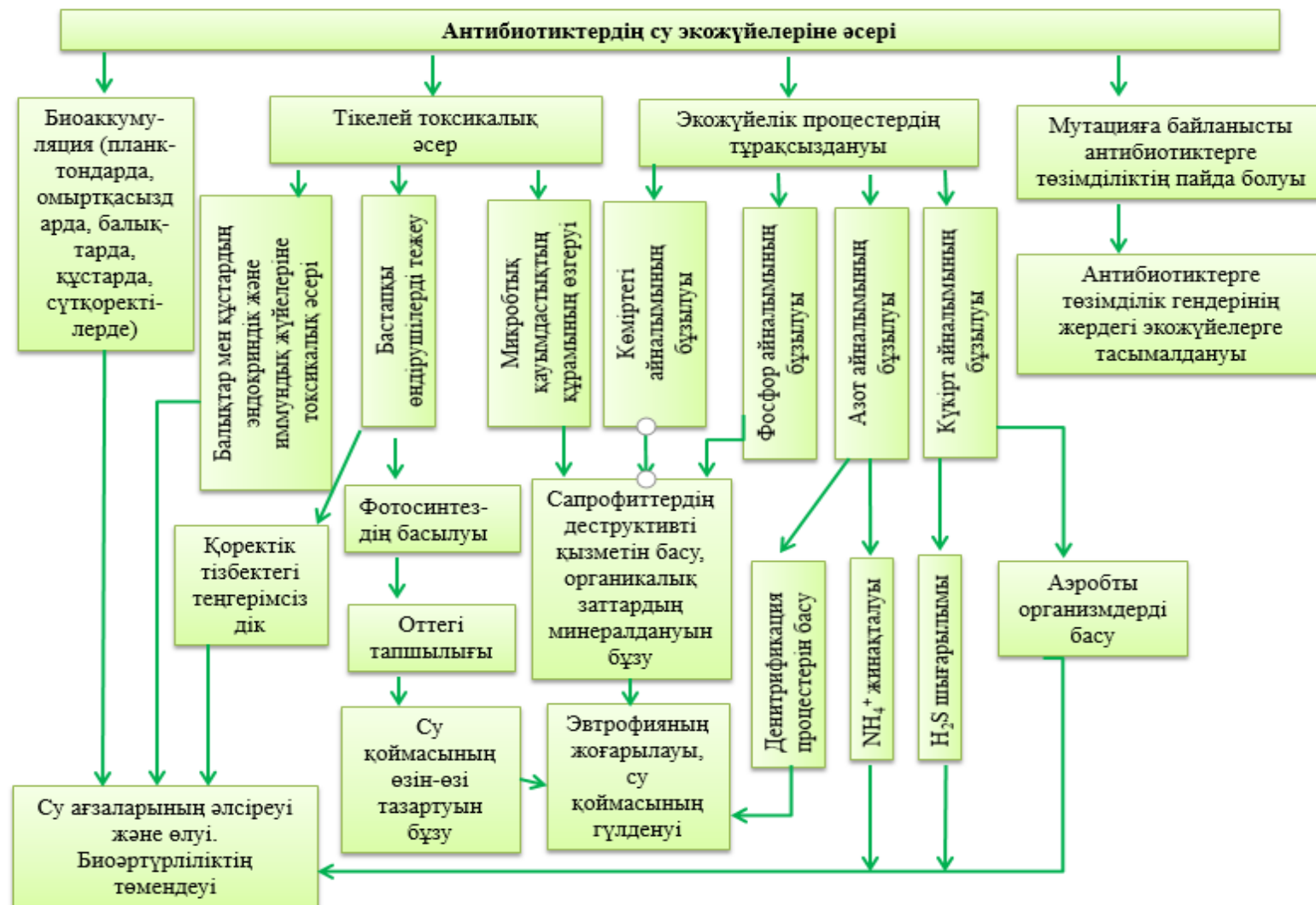
Тек қана төзімді анаэробты бактериялар ғана өмір сүре алатын оттегі жетіспейтін «өлі аймақтардың» дамуы орын алады. Сульфидтердің пайда болуы салдарынан су мөлдірлігін жояды, күн сәулесінің енуі төмендейді. Бұл балдырларда фотосинтез процесін басып, оттегін өндіруді төмендетеді.

Артық күкіртсутегі органикалық заттардың аэробты жолмен ыдырауын тежейді, ол өз кезегінде детриттің жинақталуын арттырады. Оттегінің тапшылығына қосымша ықпал ететін ыдырау процестері жылдамдайды.

Ағынсыз су қоймаларындағы (көлдер, тоғандар, су қоймалары) күкіртсутегінің артық мөлшері «шіріген жұмыртқаның» өткір иісі бар токсикалық шығарынды ретінде судың беткі қабатына көтеріледі. Жағалаудағы аудандарда мұндай шығарындылар ауа сапасына әсер етіп, адамдардың тыныс алу жолдарын тітіркендіруі мүмкін.

Сипатталған барлық процестер ғаламдық экожүйелер үшін мүмкін болатын ұзақ мерзімді әсерді жоққа шығармайды. Су ортасында бактериялардың антибиотиктерге төзімділігінің артуы емделмейтін инфекциялармен байланысты ғаламдық эпидемиялардың қаупін арттырады (Mancuso et al., 2021). Антибиотиктер су жануарларының ағзасында жинақталып, болашақта олардың өліміне немесе мутациясына әкеледі. Антибиотиктердің экологиялық жүйелерге ұзақ мерзімді әсері олардың деградациясына, биологиялық әртүрліліктің төмендеуіне және көміртегі, азот және күкірт айналымдарымен байланысты климаттық процестердің өзгеруіне әкелуі мүмкін.

Біз қарастырған зерттеулерді антибиотиктердің қоршаған ортаға экотоксикалық әсерінің динамикалық жүйесі ретінде көрсетуге болады (сурет 3).



Сурет 3. Антибиотиктердің су экожүйелеріне әсері

Қазіргі кезде су нысандарының антибиотиктермен ластану қаупін азайту және су айдындарында антибиотиктерге төзімділіктің таралуын төмендетумен күрес жүргізуде келесідей кешенді тәсілдер ұсынылады (Okeke et al., 2022).

- Су айдындарында антибиотиктер және төзімді микроағзалардың болуына мониторинг жасау. Табиғи су айдындарында антибиотиктердің концентрациясын және олардың биологиялық әртүрлілікке әсерін анықтау үшін мониторинг бағдарламасын дамыту.
- Биологиялық фильтрлерді, белсендірілген көмірді және нанотехнологиялар мен озондауды қолдануды қоса алғанда, ағынды суларды тазарту технологиясын жетілдіру.
- Медицинада және ауылшаруашылығында антибиотиктерді қолдануды азайту, баламалы емдеу әдістерін дамыту (бактериофагтар, микробқа қарсы пептидтер, пробиотиктер). Халық пен медицина қызметкерлері арасында антибиотиктерді ұтымды пайдалануды насихаттау.
- Төзімділікті тудырмайтын және қоршаған ортаға қауіпсіз микробқа қарсы балама препараттарды іздеу, табиғи қосылыстарға негізделген жаңа антибиотиктерді әзірлеу, бактериофагтарды, микробқа қарсы пептидтерді, пробиотиктерді және гендік терапияның инновациялық әдістерін қолдану.
- Биологиялық жолмен ыдырайтын антибиотиктерді әзірлеу:
 - қазіргі зерттеулер қоршаған ортада улы өнімдер түзбестен, ыдырайтын антибиотиктерді жасауға бағытталған;
 - микроағзалардың әсерінен ыдырайтын қосылыстар негізінде препараттарды әзірлеу перспективті бағыт болып табылады;
 - судағы антибиотиктердің жартылай ыдырау мерзімінің қысқаруы олардың жинақталуын және экологиялық жүйеге әсерін азайтуға мүмкіндік береді (Smola - Dmochowska et al., 2023).
- Ауылшаруашылығында және медицинада антибиотиктерді қолдануды қатаң бақылау және реттеу:
 - мал шаруашылығы, құс пен аквадақыл өсіруде антибиотиктерді қолданудың қатаң нормаларын енгізу;
 - пробиотиктер мен вакциналарды қоса алғанда, аурулардың алдын алудың балама әдістерін әзірлеу;
 - антибиотиктерді сатуды және жоюды бақылау, оларды медицинада және ветеринарияда бақылаусыз пайдалануды азайту;
 - мерзімі өткен антибиотиктерді дұрыс жою – олады кәрізге немесе қоқыс жәшігіне тастауға болмайды.
- Антибиотиктерді бақылаусыз қолдануды азайту және олардың қоршаған ортаға енуіне жол бермеу үшін білім беру бағдарламалары мен заңнамалық реттеу.

Антибиотиктердің динамикасы мен экотоксикокинетикасының әр түрлі механизмдерінің болуымен қатар, дәрілік препараттардың қоршаған орта элементтеріне таралуы мен әсер етуінің барлық жолдары өзара байланысты, өзара тәуелді және осының барлығын биогеохимиялық процестерді тұрақсыздандырудың біртұтас жүйесі ретінде көрсетуге болатыны анықталды.

3. Қорытынды

1. Антибиотиктердің су ортасына енуінің ең үлкен көздері құрамында препараттардың қалдықтары бар медициналық мекемелердің, фармацевтикалық өндірістердің және тұрмыстық шаруашылықтың ағынды сулары; антибиотиктерді өсуді ынталандыру және инфекциялардың алдын алу үшін қолданатын ауыл шаруашылығы, әсіресе мал шаруашылығы мен аква дақыл өсіру саласы; антибиотиктерді толығымен жоя алмайтын және олардың өзендерде, көлдерде, теңіздерде таралуына әкелетін тиімділігі жеткіліксіз тазарту қондырғылары.

2. Су экожүйелерінде антибиотиктерге төзімділіктің қалыптасуы мен таралуы ғаламдық экологиялық және медициналық мәселе болып табылады. Су ортасында антибиотиктер төзімді бактериялардың эволюциясын жеделдету арқылы селекциялық қысым жасайды, содан кейін олар құрлық экожүйелеріне еніп, адам денсаулығына қауіп төндіреді.

3. Су ортасында антибиотиктердің болуы экожүйелік процестерді тұрақсыздандырады: органикалық заттардың ыдырауын төмендетуге, азот пен фосфордың улы формаларының жинақталуына, судың эвтрофикациясы мен сапасының нашарлауына, экологиялық жүйенің метоболизмін бұзатын антибиотиктерге төзімді бактериялардың көбеюіне әкелетін биогеохимиялық айналымды бұзады.

4. Су антибиотиктерге төзімді бактериялардың резервуарына айналады, бұл дәстүрлі емдеуге келмейтін инфекциялық аурулардың пайда болуын тудырады. Мұндай бактериялар тек су ағзаларының арасында ғана таралмайды, сонымен қатар сумен байланысқанда немесе зақымдалған өнімдерді тұтынғанда адам ағзасына да өтеді.

5. Антибиотиктер су ортасында аэробты және анаэробты процестер арасындағы теңгерімді бұзады, сульфатты деструкциялайтын бактериялардың белсенділігін арттырады, бұл улы күкіртсутегінің жинақталуына, өлі аймақтардың дамуына, судың химиялық құрамының өзгеруіне және гипоксияның күшеюіне алып келеді.

6. Қоршаған ортада антибиотиктердің экожүйелік процестерге теріс әсерімен күресу антибиотиктерді қолдануды бақылауды, реттеуді және суды тазартудың жаңа технологияларын әзірлеу сияқты кешенді шараларды қажет етеді.

4. Қосымша материалдар: Қосымша материалдар берілген жоқ

5. Авторлық үлестер:

Концептуализация, Л.А. және Ж.Б.; әдістемесі, Л.А.; валидация, Л.А., Е.П. және Е.Т.; формалды талдау, Л.А.; зерттеу, Ж.Б.; ресурстар, Н.М.; деректерді өңдеу, Е.П., Н.М.; жазу - түпнұсқа жобасын дайындау, Ж.Б., Е.Т.; жазу - шолу және өңдеу, Л.А., Ж.Б.; визуализация, Ж.Б.; жетекшілік, Л.А. Барлық авторлар қолжазбаның жарияланған нұсқасымен танысып, келісті.

6. Авторлар туралы ақпарат

Акбаева Ляйля Хамидуллаевна – доцент, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан, 010000; email: akbaeva659@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2192-454X>

Бакешова Жумабике Уалихановна – аға оқытушы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан, 010000; email: bakeshova.z@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4983-3073>

Тихомирова Есения Андреевна – 4 курс студенті, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан, 010000; email: 623et03@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-7145-6338>

Мамытова Нургуль Сагиевна – аға оқытушы, Қазақ технология және бизнес университеті, Қайым Мұхаметханов көш., 37 А, Астана, Қазақстан, 010000; email: mamytovanur@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9363-8745>

Панғалиев Ербол Махамбетұлы – аға оқытушы, PhD, Ш. Есенов атындағы Каспий технология және инжиниринг университеті, 32 мкр, Ақтау, Қазақстан, 130000; email: erbolpm@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2392-4180>

7. Қаржыландыру: Бұл зерттеу сыртқы қаржыландыруды алған жоқ.

8. Алғыстар: Алғыс айтылмайды.

9. Мүдделер қақтығыстары: Мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейміз.

10. Әдебиеттер тізімі

1. Abebe, G.M. (2020). The role of bacterial biofilm in antibiotic resistance and food contamination. *International Journal of Microbiology*, 1705814. <https://doi.org/10.1155/2020/1705814>
2. Akbayeva, L., Tulegenov, E., Omarbayeva, A., Kobetaeva, N., Nurgalieva, Z., Nurkeyev, Y., Martišová, P., Vietoris, V., Zhanabaev, A. (2019). Ecotoxicological studies of Akmola region lakes. *Potravinárstvo Slovak Journal of Food Sciences* 13(1), 25–31. <https://doi.org/10.5219/824>
3. Akbayeva, L., Bakeshova, Z., Mamytova, N., Yelikbayev, B., Abzhalelov, A., Tazitdinova, R., Beisenova, R. (2024). Determination of the microorganisms' resistance to antibiotics in the bacterioplankton community in the Akmola Region lakes. *Journal of Ecological Engineering* 25(6), 99–108. <https://doi.org/10.12911/22998993/187024>
4. Akbayeva, L., Mamytova, N., Beisenova, R., Tazitdinova, R., Abzhalelov, A., Akhayeva, A. (2020). Studying the self-cleaning ability of water bodies and watercourses of Arshalyn District of Akmola Region. *Journal of Environmental Management and Tourism* 11(5), 1095–1104. [https://doi.org/10.14505/jemt.v11.5\(45\).07](https://doi.org/10.14505/jemt.v11.5(45).07)
5. Akbayeva, L., Muratov, R., Zhamangara, A., Beisenova, R., Zhantokov, B. (2014). Seasonal dynamics of phytoplankton and bacterial plankton characteristics in Esil River. *Biosciences Biotechnology Research Asia* 11(3), 1087–1093. <https://doi.org/10.13005/bbra/1493>
6. Akbayeva, L., Yevneyeva, D., Temreshev, I., Abzhalelov, A., Tekebayeva, Z., Temirbekova, A., Mkilima, T. (2025). Potential biodiversity disruptions caused by changes in water body coverage: A case of Lake Taldykol, Kazakhstan. *Polish Journal of Environmental Studies*, 34(3), 3011–3031. <https://doi.org/10.15244/pjoes/188834>
7. Akhter, S., Bhat, M. A., Ahmed, S., Siddiqui, W.A. (2024). Antibiotic residue contamination in the aquatic environment, sources and associated potential health risks. *Environmental Geochemistry and Health* 46(10), 387. <https://doi.org/10.1007/s10653-024-02146-5>
8. Andryukov, B.G., Besednova, N.N., Zaporozhec, T.S. (2022). Mikroplastik i ego rol' v sokhranении i rasprostranении genov rezistentnosti k antibiotikam v morskikh ekosistemakh [Microplastics and their role in the maintenance and spread of antibiotic resistance genes in marine ecosystems]. *Antibiotiki i Khimioterapiya [Antibiotics and Chemotherapy]* 67(7–8), 61–70. <https://doi.org/10.37489/0235-2990-2022-67-7-8-61-70>
9. Apreja, M., Sharma, A., Balda, S., Kataria, K., Capalash, N., Sharma, P. (2022). Antibiotic residues in environment: Antimicrobial resistance development, ecological risks, and bioremediation. *Environmental Science and Pollution Research International* 29(3), 3355–3371. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17374-w>
10. Bacanlı, M., Başaran, N. (2019). Importance of antibiotic residues in animal food. *Food and Chemical Toxicology* 125, 462–466. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2019.01.033>
11. Becerra, C.A., Murphy, B., Veldman, B.V., Nüsslein, K. (2024). Biogenic sulfide-mediated iron reduction at low pH. *Microorganisms* 12(10), 1939. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12101939>
12. Brunton, L.A., Desbois, A.P., Garza, M., Wieland, B., Mohan, C.V., Häslér, B., Tam, C.C., Le, P.N.T., Phuong, N.T., Van, P.T., Nguyen-Viet, H., Eltholth, M.M., Pham, D.K., Duc, P.P., Linh, N.T., Rich, K.M., Mateus, A.L.P., Hoque, M.A., Ahad, A., Khan, M.N.A., Guitian, J. (2019). Identifying hotspots for antibiotic resistance emergence and selection, and elucidating pathways to human exposure: Application of a systems-thinking approach to aquaculture systems. *The Science of the Total Environment* 687, 1344–1356. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.134>
13. Buschmann, A.H., Tomova, A., López, A., Maldonado, M.A., Henríquez, L.A., Ivanova, L., Moy, F., Godfrey, H.P., Cabello, F.C. (2012). Salmon aquaculture and antimicrobial resistance in the marine environment. *PLOS ONE* 7(8), e42724. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0042724>

14. Cao, L., Naylor, R., Henriksson, P., Leadbitter, D., Metian, M., Troell, M., Zhang, W. (2015). Global food supply. China's aquaculture and the world's wild fisheries. *Science* 347(6218), 133–135. <https://doi.org/10.1126/science.1260149>
15. Chen, H., Jing, L., Teng, Y., Wang, J. (2018). Characterization of antibiotics in a large-scale river system of China: Occurrence pattern, spatiotemporal distribution and environmental risks. *The Science of the Total Environment* 618, 409–418. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.054>
16. Chukwu, K.B., Abafe, O.A., Amoako, D.G., Essack, S.Y., Abia, A.L.K. (2023). Environmental concentrations of antibiotics, biocides, and heavy metals fail to induce phenotypic antimicrobial resistance in *Escherichia coli*. *The Science of the Total Environment* 899, 165721. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165721>
17. Cowieson, A., Klünter, A.M. (2019). Contribution of exogenous enzymes to potentiate the removal of antibiotic growth promoters in poultry production. *Animal Feed Science and Technology* 250, 81–92. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2018.04.026>
18. Dolina, L.F., Savina, O.P. (2018). Ochistka vod ot ostatkov lekarstvennykh preparatov [Water cleaning from residues of medicinal preparation]. *Vestnik Dnepropetrovskogo natsional'nogo universiteta zhelezнодорожного транспорта [Bulletin of the Dnepropetrovsk National University of Railway Transport]* 3(75), 36–51. <https://doi.org/10.15802/stp2018/134675>
19. Dyagelev, M.Y., Abramova, A.A. (2023). Analiz metodov obnaruzheniya antibiotikov v gorodskikh stochnykh vodakh [Analysis of methods for the detection of antibiotics in wastewater]. *Inzhenerno-stroitel'nyy vestnik Prikaspiya [Engineering-construction Bulletin of the Caspian Region]* 4(46), 24–28. <https://doi.org/10.52684/2312-3702-2023-46-4-24-28>
20. Ekwanzala, M.D., Lehutso, R.F., Kasonga, T.K., Dewar, J.B., Momba, M.N.B. (2020). Environmental dissemination of selected antibiotics from hospital wastewater to the aquatic environment. *Antibiotics (Basel, Switzerland)* 9(7), 431. <https://doi.org/10.3390/antibiotics9070431>
21. Evangelista, P.A., Lourenço, F.M.O., Chakma, D., Shaha, C.K., Konate, A., Pimpinato, R.F., Louvandini, H., Tornisiello, V.L. (2023). Bioaccumulation and depletion of the antibiotic sulfadiazine 14C in lambari (*Astyanax bimaculatus*). *Animals: An Open Access Journal from MDPI* 13(15), 2464. <https://doi.org/10.3390/ani13152464>
22. Get'man, M.A., Narkevich, I.A. (2013). Lekarstvennye sredstva v okruzhayushchej srede [Medicines in the environment]. *Remedium. Zhurnal o rossiyskom rynke lekarstv i meditsinskoj tekhnike [Remedium. A magazine about the Russian market of medicines and medical equipment]* 2, 50–54.
23. Glaskovich, M.A., Kapitonova, E.A. (2010). Vliyanie kormovykh antibiotikov na kishechnyy mikrobiotsenoz sel'skokhozyaystvennykh zhivotnykh: kratkiy analiticheskiy obzor [Effect of feed antibiotics on the intestinal microbiocenosis of farm animals: A brief analytical review]. *Uchenye zapiski uchrezhdeniya obrazovaniya Vitebskaya ordena Znak pocheta gosudarstvennaya akademiya veterinarnoi meditsiny [Scientific notes of the educational institution of the Vitebsk Order of Honor of the State Academy of Veterinary Medicine]* 46(1-1), 194–197. <http://repo.vsavm.by/handle/123456789/2821>
24. Gorito, A.M., Ribeiro, A.R.L., Rodrigues, P., Pereira, M.F.R., Guimarães, L., Almeida, C.M.R., Silva, A.M.T. (2022). Antibiotics removal from aquaculture effluents by ozonation: Chemical and toxicity descriptors. *Water Research* 218, 118497. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118497>
25. Gudda, F., Odinga, E.S., Tang, L., Waigi, M.G., Wang, J., Abdalmegeed, D., Gao, Y. (2023). Tetracyclines uptake from irrigation water by vegetables: Accumulation and antimicrobial resistance risks. *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)* 338, 122696. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122696>
26. Haciosmanoğlu, G.G., Arenas, M., Mejías, C., Martín, J., Santos, J.L., Aparicio, I., Alonso, E. (2023). Adsorption of fluoroquinolone antibiotics from water and wastewater by colemanite.

- International Journal of Environmental Research and Public Health* 20(3), 2646. <https://doi.org/10.3390/ijerph20032646>
27. He, G., Jiang, X., Yao, L., Liu, G., Yang, Y., Jiang, Y., Liu, W. (2021). Effects of tetracycline on nitrogen and carbon cycling rates and microbial abundance in sediments with and without biochar amendment. *Chemosphere* 270, 129509. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129509>
28. Herrero-Villar, M., Taggart, M.A., Mateo, R. (2024). Pharmaceuticals in avian scavengers and other birds of prey: A toxicological perspective to improve risk assessments. *The Science of the Total Environment* 948, 174425. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174425>
29. Hou, L., Yin, G., Liu, M., Zhou, J., Zheng, Y., Gao, J., Zong, H., Yang, Y., Gao, L., Tong, C. (2015). Effects of sulfamethazine on denitrification and the associated N₂O release in estuarine and coastal sediments. *Environmental Science & Technology* 49(1), 326–333. <https://doi.org/10.1021/es504433r>
30. Hu, Y., Cheng, H. (2016). Health risk from veterinary antimicrobial use in China's food animal production and its reduction. *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)* 219, 993–997. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.04.099>
31. Huang, A., Yan, M., Lin, J., Xu, L., Gong, H., Gong, H. (2021). A review of processes for removing antibiotics from breeding wastewater. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 18(9), 4909. <https://doi.org/10.3390/ijerph18094909>
32. Huang, L., Mo, Y., Wu, Z., Rad, S., Song, X., Zeng, H., Bashir, S., Kang, B., Chen, Z. (2020). Occurrence, distribution, and health risk assessment of quinolone antibiotics in water, sediment, and fish species of Qingshitan reservoir, South China. *Scientific Reports* 10(1), 15777. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72324-9>
33. Huong, N.T.M., Thuy, N.T., Hoai, P.T.T., Thi Huong, P. (2025). Effective inhibition of antibiotic residues and bacterial pathogens in wastewater using TiO₂ metal oxide photocatalyst. *Journal of Environmental Science and Health. Part B, Pesticides, Food Contaminants and Agricultural Wastes* 60(2), 70–78. <https://doi.org/10.1080/03601234.2025.2450931>
34. Kenneth, M.J., Koner, S., Hsu, G.J., Chen, J.S., Hsu, B.M. (2023). A review on the effects of discharging conventionally treated livestock waste to the environmental resistome. *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)* 338, 122643. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122643>
35. Kümmerer, K. (2009). Antibiotics in the aquatic environment - A review - Part I. *Chemosphere* 75(4), 417–434. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.11.086>
36. Liu, K., Yin, X., Zhang, D., Yan, D., Cui, L., Zhu, Z., Wen, L. (2018). Distribution, sources, and ecological risk assessment of quinolone antibiotics in the surface sediments from Jiaozhou Bay wetland, China. *Marine Pollution Bulletin* 129(2), 859–865. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.10.010>
37. Liu, S., Zhao, H., Lehmler, H.J., Cai, X., Chen, J. (2017). Antibiotic pollution in marine food webs in Laizhou Bay, North China: Trophodynamics and human exposure implication. *Environmental Science & Technology* 51(4), 2392–2400. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04556>
38. Liu, X., Lu, S., Guo, W., Xi, B., Wang, W. (2018). Antibiotics in the aquatic environments: A review of lakes, China. *The Science of the Total Environment* 627, 1195–1208. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.271>
39. Liu, Y., Tong, Z., Shi, J., Jia, Y., Yang, K., Wang, Z. (2020). Correlation between exogenous compounds and the horizontal transfer of plasmid-borne antibiotic resistance genes. *Microorganisms* 8(8), 1211. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8081211>
40. Lulijwa, R., Rupia, E.J., Alfaro, A.C. (2020). Antibiotic use in aquaculture, policies and regulation, health and environmental risks: A review of the top 15 major producers. *Reviews in Aquaculture* 12(2), 640–663. <https://doi.org/10.1111/raq.12344>

41. Lykov, I.N. (2020). Pharmaceutical contamination of the environment. *Problemy Regional'noj Ekologii* 3, 23–27. <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2020-13023>
42. Lyu, J., Yang, L., Zhang, L., Ye, B., Wang, L. (2020). Antibiotics in soil and water in China - a systematic review and source analysis. *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)* 266(Pt 1), 115147. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115147>
43. Mallory, T.G. (2013). China's distant water fishing industry: Evolving policies and implications. *Marine Policy* 38, 99–108. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2012.05.024>
44. Tang, Y., Lou, X., Yang, G., Tian, L., Wang, Y., Huang, X. (2022). Occurrence and human health risk assessment of antibiotics in cultured fish from 19 provinces in China. *Frontiers in cellular and infection microbiology* 12, 964283. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2022.964283>
45. Mancuso, G., Midiri, A., Gerace, E., Biondo, C. (2021). Bacterial antibiotic resistance: The most critical pathogens. *Pathogens (Basel, Switzerland)* 10(10), 1310. <https://doi.org/10.3390/pathogens10101310>
46. Manyi-Loh, C., Mamphweli, S., Meyer, E., Okoh, A. (2018). Antibiotic use in agriculture and its consequential resistance in environmental sources: Potential public health implications. *Molecules (Basel, Switzerland)* 23(4), 795. <https://doi.org/10.3390/molecules23040795>
47. Munita, J.M., Arias, C.A. (2016). Mechanisms of antibiotic resistance. *Microbiology Spectrum* 4(2). <https://doi.org/10.1128/microbiolspec.VMBF-0016-2015>
48. Ogunbanwo, O.M., Kay, P., Boxall, A.B., Wilkinson, J., Sinclair, C.J., Shabi, R.A., Fasasi, A.E., Lewis, G.A., Amoda, O.A., Brown, L.E. (2022). High concentrations of pharmaceuticals in a Nigerian river catchment. *Environmental Toxicology and Chemistry* 41(3), 551–558. <https://doi.org/10.1002/etc.4879>
49. Okeke, E.S., Chukwudozie, K.I., Nyaruaba, R., Ita, R.E., Oladipo, A., Ejeromedoghene, O., Atakpa, E.O., Agu, C.V., Okoye, C.O. (2022). Antibiotic resistance in aquaculture and aquatic organisms: A review of current nanotechnology applications for sustainable management. *Environmental Science and Pollution Research International* 29(46), 69241–69274. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22319-y>
50. Postigo, C., Richardson, S.D. (2014). Transformation of pharmaceuticals during oxidation/disinfection processes in drinking water treatment. *Journal of Hazardous Materials* 279, 461–475. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.07.029>
51. Qian, W., Yang, Y., Xinyue, D., Hanqi, L., Lanlan, C., Wenhui, H., Juan-Ying, L. (2024). Reducing baseline toxicity in fishery product-related sediments from land to sea: Region-specific solutions are required. *The Science of the Total Environment* 946, 174024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174024>
52. Qiu, X., Zhou, G., Wang, H., Wu, X. (2021). The behavior of antibiotic-resistance genes and their relationships with the bacterial community and heavy metals during sewage sludge composting. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 216, 112190. Advance online publication. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112190>
53. Rigos, G., Bitchava, K., Nengas, I. (2010). Antibacterial drugs in products originating from aquaculture: Assessing the risks to public welfare. *Mediterranean Marine Science* 11(1), 33–41. <https://doi.org/10.12681/mms.89>
54. Sharma, M., Yadav, A., Dubey, K.K., Tipple, J., Das, D.B. (2022). Decentralized systems for the treatment of antimicrobial compounds released from hospital aquatic wastes. *The Science of the Total Environment* 840, 156569. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156569>
55. Shulgina, L.V., Yakush, E.V., Shulgin, Yu.P., Shenderyuk, V.V., Chukalova, N.N., Baholdina, L.P. (2015). Antibiotiki v ob"ektah akvakul'tury i ih ekologicheskaya znachimost'. [Antibiotics in aquaculture and their ecological significance]. *Obzor. Izvestiya TINRO (Tihookeanskogo nauchno-issledovatel'skogo rybohozyajstvennogo centra) [Review. Izvestiya TINRO (Pacific Scientific Research Fisheries Center)]* 181, 216–230. <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2015-181-216-230>

56. Siedlewicz, G., Białk-Bielińska, A., Borecka, M., Winogradow, A., Stepnowski, P., Pazdro, K. (2018). Presence, concentrations and risk assessment of selected antibiotic residues in sediments and near-bottom waters collected from the Polish coastal zone in the southern Baltic Sea - Summary of 3 years of studies. *Marine Pollution Bulletin* 129(2), 787–801. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.10.075>
57. Smola-Dmochowska, A., Lewicka, K., Macyk, A., Rychter, P., Pamuła, E., Dobrzyński, P. (2023). Biodegradable polymers and polymer composites with antibacterial properties. *International Journal of Molecular Sciences* 24(8), 7473. <https://doi.org/10.3390/ijms24087473>
58. Spielmeyer, A., Petri, M.S., Höper, H., Hamscher, G. (2020). Long-term monitoring of sulfonamides and tetracyclines in manure amended soils and leachate samples - A follow-up study. *Heliyon* 6(8), e04656. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04656>
59. Tang, Y., Lou, X., Yang, G., Tian, L., Wang, Y., Huang, X. (2022). Occurrence and human health risk assessment of antibiotics in cultured fish from 19 provinces in China. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology* 12, 964283. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2022.964283>
60. Timofeeva, S.S., Gudilova, O.S. (2021). Antibiotiki v okruzhayushchej srede: sostoyanie i problemy [Antibiotics in the environment: Status and problems]. *XXI vek. Tekhnosfernaya bezopasnost' [The 21st century. Technosphere safety]* 6(3(23)), 251–265. <https://doi.org/10.21285/2500-1582-2021-3-251-265>
61. Titova, K.V., Kokryatskaya, N.M., Zhibareva, T.A., Vahrameeva, E.A. (2017). Raspredelenie soedineniy sery v rezul'tate protsessy sulfatredukcii v presnovodnom ozere Svyatoye [Distribution of sulfur compounds as a result of the sulfate reduction process in freshwater lake Svyatoye]. *Trudy Karelskogo Nauch'nogo Tsentra Rossijskoj Akademii Nauk [Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]* 10, 28–37. <https://doi.org/10.17076/lim510>
62. Tokuda, M., Shintani, M. (2024). Microbial evolution through horizontal gene transfer by mobile genetic elements. *Microbial Biotechnology* 17(1), e14408. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.14408>
63. Tulegenova, S., Zhantokov, B., Shingisbayeva, Z., Beisenova, R., Dukenbayeva, A., Rakhymzhan, Z., Shamshedenova, S., Zhupysheva, A., Rymbayeva, R., Turlybekova, G., Zhaznayeva, Z. (2024). Toxic effects of aquatic pharmaceuticals on *Chlorella* sp. in Kazakhstan. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics* 19(6), 1919–1929. <https://doi.org/10.18280/ijdne.190608>
64. Urbano, V.R., Maniero, M.G., Pérez-Moya, M., Guimarães, J.R. (2017). Influence of pH and ozone dose on sulfaquinoxaline ozonation. *Journal of Environmental Management* 195(Pt 2), 224–231. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.08.019>
65. Väitalo, P., Kruglova, A., Mikola, A., Vahala, R. (2017). Toxicological impacts of antibiotics on aquatic micro-organisms: A mini-review. *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 220(3), 558–569. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2017.02.003>
66. Vinogradova, K.A., Bulgakova, V.G., Polin, A.N., Kozhevin, P.A. (2013). Uстойчивость микроорганизмов к антибиотикам: резистенция, ее объем, разнообразие и развитие [Microbial antibiotic resistance: Resistence, its volume, diversity, and development]. *Antibiotiki i himioterapiya [Antibiotics and chemotherapy]* 58(5-6), 38–48.
67. Wang, A., Ran, C., Wang, Y., Zhang, Z., Ding, Q., Yang, Y., Olsen, R.E., Ringø, E., Bindelle, J., Zhou, Z. (2019). Use of probiotics in aquaculture of China - A review of the past decade. *Fish & Shellfish Immunology* 86, 734–755. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2018.12.026>
68. Wang, M., Helbling, D.E. (2016). A non-target approach to identify disinfection byproducts of structurally similar sulfonamide antibiotics. *Water Research* 102, 241–251. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.06.042>

69. Wasmund, K., Mußmann, M., Loy, A. (2017). The life sulfuric: Microbial ecology of sulfur cycling in marine sediments. *Environmental Microbiology Reports* 9(4), 323–344. <https://doi.org/10.1111/1758-2229.12538>
70. Wilkinson, J.L., Boxall, A.B.A., Kolpin, D.W., Leung, K.M.Y., Lai, R.W.S., Galbán-Malagón, C., Adell, A.D., Mondon, J., Metian, M., Marchant, R.A., Bouzas-Monroy, A., Cuni-Sanchez, A., Coors, A., Carriquiriborde, P., Rojo, M., Gordon, C., Cara, M., Moermond, M., Luarte, T., Petrosyan, V., Teta, C. (2022). Pharmaceutical pollution of the world's rivers. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 119(8), e2113947119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2113947119>
71. Yang, M., Xu, Q., Gu, K., Wen, R., Zhou, C., Zhao, Y., Guo, B., Xu, W., Zhang, Y., Li, C., Lei, C., Wang, H. (2025). Development of a nanobody-horseradish peroxidase fusion-based competitive ELISA to rapidly and sensitively detect enrofloxacin residues in animal-derived foods. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 327, 125309. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2024.125309>
72. Yin, X., Zhong, Y., Chen, A., Bao, T., Deng, Q., Zhang, Y., Yang, R. (2024). A triple-channel sensor array utilizing fluorescent carbon dots for simultaneous discrimination and detection of multiple fluoroquinolones. *Talanta* 279, 126608. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2024.126608>
73. Zeng, Y., Chang, F., Liu, Q., Duan, L., Li, D., Zhang, H. (2022). Recent advances and perspectives on the sources and detection of antibiotics in aquatic environments. *Journal of Analytical Methods in Chemistry* 2022, 5091181. <https://doi.org/10.1155/2022/5091181>
74. Zhang, G., Ju, P., Lu, W., Li, A., Zhang, Q., Jiang, L., Zhang, E. (2024). Rational design of a novel Zn-MOF for fluorescent detection of nitrofurantoin antibiotics: The synthesis, structure and sensing applications. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 322, 124836. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2024.124836>
75. Zhang, T., Ding, Y., Peng, J., Dai, Y., Luo, S., Liu, W., Ma, Y. (2022). Effects of broad-spectrum antibiotic (florfenicol) on resistance genes and bacterial community structure of water and sediments in an aquatic microcosm model. *Antibiotics (Basel, Switzerland)* 11(10), 1299. <https://doi.org/10.3390/antibiotics11101299>
76. Zhang, Y., Li, X., Liu, Z., Zhao, X., Chen, L., Hao, G., Ye, X., Meng, S., Xiao, G., Mu, J., Mu, X., Qiu, J., Qian, Y. (2023). The neurobehavioral impacts of typical antibiotics toward zebrafish larvae. *Chemosphere* 340, 139829. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139829>
77. Zhong, X., Zhu, Y., Wang, Y., Zhao, Q., Huang, H. (2021). Effects of three antibiotics on growth and antioxidant response of *Chlorella pyrenoidosa* and *Anabaena cylindrica*. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 211, 111954. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111954>
78. Zhou, J., Wu, H., Wang, H., Wu, Z., Shi, L., Tian, S., Hou, L.A. (2025). Metagenomics reveals the resistance patterns of electrochemically treated erythromycin fermentation residue. *Journal of Environmental Sciences (China)* 148, 567–578. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2024.01.030>
79. Zhu, Y.G., Gillings, M., Simonet, P., Stekel, D., Banwart, S., Penuelas, J. (2018). Human dissemination of genes and microorganisms in Earth's Critical Zone. *Global Change Biology* 24(4), 1488–1499. <https://doi.org/10.1111/gcb.14003>

Risks to the ecosystem when antibiotics enter water bodies

Lyailya Akbayeva, Zhumabike Bakeshova, Eseniya Tihomirova, Nurgul Mamytova, Yerbol Pangaliyev

Abstract: The problem of antibiotic pollution in the environment has serious consequences for ecosystems and poses a threat to human health. Research in this field covers a wide range of tasks and objects. This article reviews domestic and international literature on the dynamics and distribution of antibiotics in environmental components, the key sources of antibiotic contamination

in aquatic environments, and the mechanisms of antibiotic impact on hydrobionts. The migration pathways of antibiotics from their sources, as well as their persistence in various environments, including wastewater from medical institutions, pharmaceutical production, households, agricultural fertiliser use, animal husbandry, and aquaculture, are described. Particular attention is given to the formation and further spread of antibiotic resistance in hydrobionts. Particular interest is given to studies on ecotoxic concentrations of pharmaceuticals in the environment.

The role of antibiotics in environment processes is examined, including their impact on the decomposition of organic matter, the accumulation of toxic nitrogen and phosphorus compounds, and eutrophication. It has been found that, in addition to the existence of various mechanisms of antibiotic dynamics and ecotoxicokinetics, all pathways of pharmaceutical distribution and their impact on environmental components are generally interconnected and interdependent. All of this can be seen as a unified system of biogeochemical process destabilization.

Based on the research review, a set of integrated measures has been proposed, including monitoring, regulation of antibiotic use, and the development of new technologies for removing ecotoxicants from water.

Keywords: aquatic contamination; pharmaceuticals; wastewater, antibiotics, resistance, ecotoxicants, hydrobionts, bioaccumulation, microorganisms.

Риски для экосистемы при попадании антибиотиков в водные объекты

Ляйля Акбаева, Жумабике Бакешова, Есения Тихомирова, Нургуль Мамытова, Ербол Пангалиев

Аннотация. Проблема загрязнения объектов окружающей среды антибиотиками влечет за собой серьезные последствия в экосистеме и представляет угрозу здоровью человека. Направления исследований в этой области охватывают широкий спектр задач и объектов.

В статье представлен обзор отечественных и зарубежных литературных данных по динамике и распределению антибиотиков в объектах окружающей среды, о ключевых источниках загрязнения антибиотиками водных объектов, рассмотрены механизмы воздействия антибиотиков на гидробионты. Были описаны пути миграции антибиотиков от источников их образования, а также их персистирования между такими объектами, как сточные воды, медицинские учреждения, фармацевтическое производство, домашние хозяйства, применение удобрений в сельском хозяйстве, животноводство и аквакультура. Уделено внимание проблемам формирования и дальнейшего распространения устойчивости гидробионтов к антибиотикам. Особый интерес представляют работы по исследованию экотоксичных концентраций лекарственных препаратов в окружающей среде. Выявлены связи антибиотиков в среде с дестабилизацией экосистемных процессов через нарушение разложения органического вещества, накоплению токсичных форм азота и фосфора и эвтрофикации. Выявлено, что наряду с тем, что имеют место различные механизмы динамики и экотоксикокинетики антибиотиков, в целом все пути распространения и влияния препаратов на элементы окружающей среды взаимосвязаны, взаимообусловлены и все это можно представить как единую систему дестабилизации биогеохимических процессов. На основании обзора исследований предложены комплексные меры, включающие мониторинг, регулирование использования антибиотиков и разработку новых технологий очистки воды от экотоксикантов.

Ключевые слова: загрязнение водной среды, фармацевтические препараты, сточные воды, антибиотики, резистентность, экотоксиканты, гидробионты, биоаккумуляция, микроорганизмы.