ӘОЖ 556.166.32/504.054
ҒТАХР 38.35.29/34.15.23
DOI 10.37238/2960-1371.2960-138X.2026.103(3).38

**Килыбаева Қ.С.**

**Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан**

E-mail: kalimova@mail.ru

# ШЫҒЫС ҚАЗАҚСТАН ТАУЛЫ-ҮЛБІ АУМАҒЫНДА САРҚЫНДЫ СУЛАРМЕН ОРМАНДЫ ҚАЛПЫНА КЕЛТІРУДІҢ ЭКОЛОГИЯЛЫҚ ҚАУІПСІЗДІК КРИТЕРИЙЛЕРІ ЖӘНЕ МОНИТОРИНГ ИНДИКАТОРЛАРЫ

**Аңдатпа.** Мақалада Шығыс Қазақстандағы Таулы Үлбі аумағында тазартылған сарқынды суларды қолдана отырып орманды қалпына келтірудің экологиялық қауіпсіздік критерийлері мен мониторинг индикаторлары негізделеді. Зерттеу мақсаты су топырақ өсімдік жүйесінде тәуекелдерді ерте анықтауға мүмкіндік беретін өлшенетін көрсеткіштер жиынтығын ұсыну және оларды таулы ландшафт жағдайына бейімдеу болып табылады. Әдістемелік тұрғыдан тәуекелге негізделген басқару қағидасы қолданылып, тәжірибелік және бақылау учаскелеріндегі су сапасы, топырақтың тұздану мен натрийлену динамикасы, минералдық азоттың миграциясы, сондай-ақ көшеттердің тіршілікке бейімділігі мен бастапқы өсімі салыстырмалы талданды. Нәтижелер бойынша сарқынды су қолданылған учаскелерде көшеттердің сақталуы мен биіктік өсімі жоғары деңгейде байқалды, бұл ылғал тапшылығы жағдайында қалпына келтіру тиімділігін арттыру әлеуетін көрсетеді. Сонымен қатар қауіпке ең сезімтал индикаторлар ретінде су мен топырақтың минералдануын сипаттайтын электрөткізгіштік көрсеткіштерінің өсуі, топырақта натрийленудің бастапқы белгілерінің пайда болуы және нитраттардың төменгі қабаттарға көшу ықтималдығы айқындалды. Зерттеудің ғылыми жаңалығы таулы орманды экожүйелер үшін қауіпсіздік критерийлері мен индикаторларды бір жүйеге біріктіріп, оларды мониторинг дизайнымен байланыстыру арқылы дәлелденеді. Практикалық маңыздылығы ұсынылған индикаторлар кешенін орманды қалпына келтіру жобаларын экологиялық сүйемелдеу, тәуекелді басқару және ұзақ мерзімді бақылау бағдарламаларын әзірлеуде қолдану мүмкіндігімен анықталады.

**Кілт сөздер:** Таулы Үлбі, сарқынды су, орманды қалпына келтіру, экологиялық қауіпсіздік, мониторинг индикаторлары, топырақ тұздануы, натрийлену, нитрат миграциясы, су сапасы.

*Кіріспе*

Шығыс Қазақстан өңірі табиғи-географиялық тұрғыдан алғанда орман экожүйелері мен таулы су жинау алаптары тоғысқан, экологиялық тұрғыдан сезімтал аймақтардың қатарына жатады. Таулы-Үлбі аумағында бедердің күрделілігі, ылғалдың беткей экспозициясына қарай әркелкі таралуы, топырақ жамылғысының мозаикалығы және су режимінің маусымдық құбылмалылығы орманды қалпына келтіру жұмыстарын жоспарлауда ерекше дәлдікті талап етеді. Орман жамылғысы бұл өңірде тек биоалуантүрлілікті сақтайтын табиғи ресурс қана емес, сонымен қатар эрозияны

тежеу, беткей тұрақтылығын арттыру, сел мен лай көшкіні қаупін төмендету, жерүсті және жерасты суларының сапасын қорғау сияқты маңызды экожүйелік қызмет атқарады. Сондықтан деградацияға ұшыраған немесе антропогендік ықпалдан әлсіреген учаскелерде орманды қайта қалпына келтіру өңірлік экологиялық қауіпсіздіктің негізгі тетіктерінің бірі ретінде қарастырылады.

Сонымен бірге орманды қалпына келтірудің тиімділігі көбіне су жеткіліктілігіне тәуелді. Қуаң кезеңдерде көшеттердің тамырлануы баяулап, тіршілікке бейімділігі төмендейді, ал тұрақты суару табиғи су көздеріне түсетін жүктемені күшейтіп, экономикалық шығынды арттырады. Осы тұрғыдан тазартылған сарқынды суларды орманды қалпына келтіруде пайдалану су тапшылығы жағдайында баламалы шешім ретінде өзекті. Сарқынды су құрамындағы ылғал мен қоректік элементтер жас көшеттердің өсуін жеделдетуі мүмкін, алайда мұндай тәжірибе экологиялық қауіпсіздік талаптарын қатаң сақтауды қажет етеді. Негізгі тәуекелдерге топырақтың тұздануы мен сортаңдануы, қышқылдық тепе-теңдігінің өзгеруі, ауыр металдар мен тұрақты органикалық ластағыштардың жинақталуы, нитраттардың төменгі қабаттарға шайылуы, беткейлік ағын арқылы жақын су объектілеріне таралуы, сондай-ақ санитарлық-микробиологиялық қауіптер жатады. Таулы-Үлбі сияқты еңісті, гидрологиялық тұрғыдан байланысы күшті ландшафттарда бұл қауіптер күшейе түседі, өйткені ластағыштардың миграциясы мен шоғырлануы кеңістік бойынша тез өзгеруі мүмкін.

Осыған байланысты сарқынды суларды қолдана отырып орманды қалпына келтірудің экологиялық қауіпсіздігін бағалауға арналған нақты критерийлер жүйесін қалыптастыру және мониторинг индикаторларын анықтау ғылыми әрі практикалық тұрғыдан маңызды. Бұл мақалада су, топырақ, өсімдік жамылғысы және су ресурстары компоненттерін қамтитын өлшенетін критерийлер ұсынылып, тәуекелдерді ерте анықтауға мүмкіндік беретін мониторингтік көрсеткіштер кешені негізделеді. Ұсынылған тәсіл жобалау кезеңінен бастап іске асыру мен кейінгі бақылауға дейінгі барлық кезеңде басқарушылық шешім қабылдауға мүмкіндік беріп, орманды қалпына келтіру тиімділігін экожүйелік тұрақтылықпен үйлестіруге бағытталады.

*Материалдар мен әдістер*

Зерттеудің материалдары ретінде Таулы-Үлбі аумағындағы орманды қалпына келтіру үшін таңдалған тәжірибелік учаскелерден алынған су, топырақ, өсімдік және қажет болған жағдайда жерасты суы үлгілері пайдаланылды. Негізгі дереккөздерге тазартылған сарқынды судың сапалық көрсеткіштері бойынша өндірістік бақылау мәліметтері, далалық үлгі алу нәтижелері, сондай-ақ орман дақылдарының өсуі мен тіршілікке бейімділігін сипаттайтын биометриялық өлшемдер кірді. Зерттеу дизайны су ресурстарын қайта пайдалану тәжірибесінде кең қолданылатын тәуекелге негізделген тәсілге сүйеніп құрылды, яғни қауіпті факторларды айқындау, әсер ету жолдарын белгілеу, тәуекел деңгейін бағалау және басқару шараларын мониторинг арқылы тексеру қағидасы басшылыққа алынды. Әдістемелік негіз ретінде тазартылған сарқынды суды қайта пайдаланудағы қауіпсіздік қағидаларын сипаттайтын халықаралық ұсынымдар, сондай-ақ суармалау суының сапасы мен басқару талаптарына қатысты стандарттық тәсілдер қолданылды.

Далалық зерттеу үшін салыстырмалы бақылау қағидасы енгізілді: бір жағынан сарқынды су қолданылатын тәжірибелік учаскелер, екінші жағынан табиғи ылғалмен немесе таза сумен суарылатын бақылау учаскелері белгіленді. Учаскелер беткей экспозициясы мен еңістік дәрежесі ұқсас болатын, топырақ типі мен өсімдік

жамылғысы жағынан салыстыруға келетін орындардан таңдалып, әр учаскеде тұрақты бақылау нүктелері бекітілді. Су беру технологиясы ретінде жергілікті жағдайға бейімделетін төмен қысымды жүйелер қарастырылып, суару мөлшері мен жиілігі көшеттердің вегетациялық кезеңдегі су қажеттілігіне және топырақ ылғалдылығының нақты көрсеткіштеріне сәйкес реттелді. Сарқынды судың берілу көлемі есептелген агрономиялық нормамен ғана емес, экологиялық шектеулермен де сәйкестендірілді, өйткені орманды қалпына келтіру жағдайында негізгі мақсат өнім алу емес, экожүйелік тұрақтылықты сақтау болып табылады.

Су сапасын бағалау үшін физика-химиялық және санитарлық-микробиологиялық көрсеткіштер кешені қолданылды. Физика-химиялық блокта сутектік көрсеткіш, электрөткізгіштік, лайлылық немесе қалқыма заттар, биохимиялық және химиялық оттек сұранысы, негізгі иондар құрамы, азот пен фосфордың минералдық формалары анықталды. Қауіпсіздік тұрғысынан ерекше мән берілетін ауыр металдар тобы бойынша кадмий, қорғасын, никель, хром, мыс және мырыш сияқты элементтер қарастырылды. Санитарлық блокта индикаторлық микроағзалар арқылы жалпы микробиологиялық қауіп деңгейі бағаланды, себебі қайта пайдаланылатын су жобаларында қоғамдық денсаулық тәуекелін төмендету мониторингтің міндетті бағыты ретінде көрсетіледі.

Топырақ мониторингі орман екпелерінің тамырлану аймағын және ластағыштардың төменге көшу ықтималдығын қамту үшін екі қабат бойынша жүргізілді. Әдетте 0–20 сантиметр және 20–40 сантиметр тереңдіктерден аралас үлгілер алынып, топырақтың реакциясы, электрөткізгіштігі, тұздардың жалпы мөлшері, сіңірілген натрий үлесі, органикалық зат мөлшері, минералдық азот формалары және ауыр металдардың қорлық концентрациялары анықталды. Беткейлік ағынмен байланысты қауіптерді бақылау үшін жауыннан кейінгі кезеңдерде үстіңгі қабаттағы өзгерістерге ерекше назар аударылды. Егер зерттеу аумағында жерасты суы жақын немесе бақылау ұңғымалары қолжетімді болса, нитраттар, электрөткізгіштік және металдар бойынша қосымша өлшемдер жүргізілді, өйткені нитраттардың шайылуы мен тұздардың миграциясы қайта пайдалану жобалары үшін негізгі тәуекелдердің бірі саналады.

Өсімдік жамылғысын бағалау үшін орман дақылдарының тіршілікке бейімділігі мен физиологиялық күйін көрсететін индикаторлар қолданылды. Әр учаскеде көшеттердің сақталу үлесі, биіктік өсімі, дің жуандығы, жапырақ немесе қылқан түсінің өзгеруі, хлороз бен күйік белгілері сияқты фитоуыттылық көрсеткіштері тіркелді. Қажет болған жағдайда өсімдік ұлпасынан үлгі алынып, ауыр металдардың биоаккумуляциясы бағаланды, бұл ұзақ мерзімді жинақталу қаупін ертерек анықтауға мүмкіндік береді. Қалпына келтірудің экожүйелік әсерін жанама бағалау үшін учаскелердегі шөптесін жамылғының жамылғылау дәрежесі мен эрозия белгілері де бақылауға енгізілді.

Мониторингтің уақыттық құрылымы үш кезеңмен ұйымдастырылды: бастапқы фондық бағалау, вегетациялық кезеңдегі операциялық бақылау және маусым соңындағы жинақтаушы әсерлерді бағалау. Фондық кезеңде су беру басталғанға дейін бастапқы топырақ және су параметрлері анықталды. Операциялық бақылауда су мен топырақтың жылдам өзгеретін көрсеткіштері ай сайын немесе тәуекел жоғары болған жағдайда жиірек өлшенді. Жинақтаушы әсерлерді бағалау үшін маусым соңында топырақтағы тұздану, натрийлену және металдардың қорлық өзгерістері қайта өлшеніп, бақылау учаскелерімен салыстырылды. Мәліметтерді өңдеу кезінде

сипаттамалық статистика қолданылып, тәжірибелік және бақылау учаскелері арасындағы айырмашылықтарды бағалау үшін параметрлік немесе параметрлік емес салыстыру тәсілдері пайдаланылды. Нәтижелер экологиялық қауіпсіздік критерийлері бойынша интерпретацияланып, шекті мәндерге жақындау немесе трендтің теріс бағытта өзгеруі басқару шараларын күшейту қажеттілігі ретінде қарастырылды.

*Нәтижелер мен талқылау*

Таулы Үлбі аумағында (1,2-сурет) сарқынды су қолданылған тәжірибелік учаскелер мен бақылау учаскелерінде алынған деректерді салыстыру арқылы қалыптастырылды. Талдау су сапасының негізгі параметрлерін, топырақтағы маусымдық өзгерістерді және орман екпелерінің бастапқы өсім көрсеткіштерін бір жүйеде қарастыруға мүмкіндік берді. Жиналған мәліметтер маусымдық динамика тұрғысынан бағаланғанда, қауіпке ең сезімтал индикаторлар ретінде су мен топырақтың минералдану деңгейін сипаттайтын электрөткізгіштік, топырақтағы натрийленудің күшею белгілері және нитраттардың төменгі қабаттарға көшу ықтималдығы айқын көрінді. Сонымен қатар қалпына келтіру тиімділігін сипаттайтын көрсеткіштер, яғни көшеттердің сақталу үлесі мен биіктік өсімі тәжірибелік учаскелерде тұрақты түрде жоғары деңгейде тіркелді.



1-сурет - Таулы-Үлбі көшетханасы

Алдымен берілетін су сапасы қарастырылды. Бақылау суында қышқылдық көрсеткіш маусым бойы айтарлықтай өзгермей, бейтарап аймақта сақталды, ал сарқынды суда pH сәл төменірек болып, бірақ тұрақты диапазонда қалды. Электрөткізгіштік бойынша тәжірибелік су айқын жоғары мән берді және бұл маусымның ортасында күшейе түсті. Бұл құбылыс жазғы кезеңде буланудың артуымен және жүйеге түсетін органикалық жүктеменің маусымдық өзгеруімен үйлесіп отырды. Органикалық ластануды сипаттайтын BOD5 және COD тәжірибелік суда бақылауға қарағанда жоғары тіркелді, алайда бұл көрсеткіштер өсімдікке тікелей фитоуыттылық беретін деңгейге жетпеген жағдайда да, топыраққа түсетін органикалық жүктеменің артуын білдіріп, топырақтағы оттектік режимнің уақытша нашарлауына әкелуі мүмкін екенін көрсетті. Қалқыма заттар мөлшері де сарқынды суда жоғары болып, су беру технологиясын таңдауда сүзгілеу және біркелкі тарату мәселесін маңызды етті. Қоректік элементтер бойынша нитраттар мен аммоний тәжірибелік суда едәуір жоғары тіркелді, бұл бір жағынан жас көшеттерге қоректік артықшылық берсе, екінші жағынан шайылу арқылы төменгі қабаттарға көшу тәуекелін күшейтетін фактор ретінде көрінді. Фосфаттардың деңгейі де бақылаудан жоғары болды, бұл биогендік жүктемені арттыруы мүмкін, сондықтан суарудың маусымдық нормасын таңдауда фосфордың топырақта бекітілу ерекшеліктерін ескеру қажет екені байқалды.



Сурет 2 – Таулы-Үлбі көшетханасы

Ауыр металдар бойынша су үлгілерінде кадмий, қорғасын, никель және хромның мәндері төмен деңгейде тіркеліп, жедел тәуекел туғызбады, бірақ жинақталатын әсерді жоққа шығармайды, сондықтан топырақ пен өсімдік ұлпасындағы бақылау нәтижелерімен бірге қарастырылды. Су сапасының маусымдық орташа мәндері мен шашыраңқылығы 1-кестеде берілген, мұнда тәжірибелік судағы минералдану мен биогендік компоненттердің жоғары екені анық көрінеді.

1-Кесте – Берілетін судың маусымдық орташа көрсеткіштері

| **Көрсеткіш** | **Бақылау суы орташа ± SD** | **Тәжірибелік сарқынды су орташа ± SD** |
|---|---|---|
| pH | 7.45 ± 0.18 | 7.18 ± 0.22 |
| Электрөткізгіштік, мкСм/см | 540 ± 60 | 1020 ± 140 |
| Қалқыма заттар, мг/л | 14 ± 6 | 32 ± 10 |
| BOD5, мг/л | 4.3 ± 1.2 | 13.1 ± 3.5 |
| COD, мг/л | 18 ± 6 | 58 ± 14 |
| Нитрат NO3, мг/л | 9.2 ± 3.1 | 24.6 ± 7.8 |
| Аммоний NH4, мг/л | 0.18 ± 0.09 | 1.25 ± 0.55 |
| Фосфат PO4, мг/л | 0.20 ± 0.08 | 0.68 ± 0.26 |
| Cd, мкг/л | 0.2 ± 0.1 | 0.6 ± 0.2 |
| Pb, мкг/л | 1.8 ± 0.7 | 4.5 ± 1.2 |

Су сапасындағы айырмашылықтар топырақ көрсеткіштерінен нақты көрініс тапты. Тәжірибелік учаскелерде 0–20 сантиметр қабаттағы электрөткізгіштік бақылаудан жоғары болып, маусым ортасында ең жоғары деңгейге жетіп, кейін жаңбырлы кезеңдерден соң біршама төмендегенімен, бақылаудан жоғары күйде сақталды. Бұл топырақтың әлсіз тұздану тенденциясын білдіреді. 20–40 сантиметр қабатта электрөткізгіштік өзгерісі баяулау болды, бұл тұздардың негізгі бөлігі жоғарғы қабатта уақытша шоғырланатынын, бірақ ұзақ мерзімде төменге көшу ықтималдығы бар екенін көрсетті. pH көрсеткіші екі учаскеде де бейтарапқа жақын сақталып, тәжірибелік алаңда маусым соңында сәл жоғарылауы байқалды, мұны натрий иондарының үлесі артқан жағдайда болатын сілтілену үрдісінің бастапқы белгісі ретінде қарастыруға болады. Натрийлену тәуекелі сіңірілген натрий үлесі немесе

натрийге байланысты индекстердің өсуімен нақтыланды. Тәжірибелік учаскеде бұл көрсеткіштің жоғарылауы топырақ құрылымының нашарлауына, су өткізгіштіктің төмендеуіне және беткейлік ағынның күшеюіне әкелуі мүмкін екенін айқындап, экологиялық қауіпсіздік критерийлері ішінде топырақтың физикалық тұрақтылығы да маңызды екенін көрсетті. Минералдық азот бойынша тәжірибелік алаңда 0–20 сантиметр қабаттағы нитрат мөлшері бақылаудан жоғары болып, жауыннан кейінгі бақылауларда 20–40 сантиметр қабатта да нитраттың артуы байқалды. Бұл нәтиже нитраттың шайылу тәуекелін күшейтетін нақты сигнал болып саналады және суару нормасын таңдауда басты шектеуші фактор ретінде қарастырылуы керек.

Ауыр металдардың топырақтағы қорлық концентрациясы бойынша тәжірибелік учаскелерде маусым соңында аздаған өсу тенденциясы тіркелгенімен, қысқа маусым аясында күрт жинақталу байқалмады. Дегенмен металдардың ұзақ мерзімді кумуляциясы бірнеше маусымнан кейін айқын көрінуі мүмкін, сондықтан қысқа мерзімді нәтижелер қауіпсіздіктің толық кепілі емес, тек бастапқы кезеңде басқарылатын тәуекел бар екенін көрсетеді. Осы логикада өсімдік индикаторлары ерекше маңызды болды. Орман дақылдарының сақталуы тәжірибелік учаскелерде жоғары болып, биіктік өсімі мен дің жуандауы да бақылаудан артық мән көрсетті. Бұл сарқынды су арқылы ылғалдың тұрақты түсуі және қоректік элементтердің қосымша келуі жас көшеттердің бастапқы бейімделуін жақсартатынын білдіреді. Сонымен бірге маусым ортасында кейбір нүктелерде жапырақтың немесе қылқанның ашықтануы, ұштарының әлсіз күйігі сияқты стресс белгілері байқалды, бұл көбіне топырақ электрөткізгіштігінің жоғарылаған кезеңімен сәйкес келді. Демек тиімділік өсімен қатар, минералдану тәуекелі де қатар жүретінін көрсететін нәтижелік байланыс қалыптасты: суару режимі тым жиілегенде немесе булану күшейгенде тұздардың уақытша шоғырлануы өсімдік физиологиясына әсер ете бастайды.

Топырақ пен өсімдік көрсеткіштерінің негізгі сандық нәтижелері 2- кестеде салыстырмалы түрде берілген. Бұл кесте экологиялық қауіпсіздік критерийлерін тәжірибеде қолдануға ыңғайлы, өйткені бір кестеде тәуекел индикаторлары мен тиімділік индикаторлары қатар көрсетіледі. Мұндай формат мониторингтің басқарушылық функциясын күшейтеді: егер көшет өсімі жақсы болғанымен топырақтың тұздану немесе нитрат шайылу индикаторлары тұрақты өссе, онда технологиялық түзету қажет екені бірден көрінеді.

2- Кесте – Топырақ және өсімдік индикаторларының маусым соңындағы салыстырмасы

| **Индикатор** | **Бақылау учаскесі** | **Тәжірибелік учаске** |
|---|---|---|
| Топырақ pH, 0–20 см | 7.30 | 7.55 |
| Топырақ EC, мкСм/см, 0–20 см | 610 | 980 |
| Топырақ EC, мкСм/см, 20–40 см | 540 | 720 |
| NO3, мг/кг, 0–20 см | 12.5 | 28.0 |
| NO3, мг/кг, 20–40 см | 9.0 | 15.8 |
| Сіңірілген натрий үлесі, шартты бірлік | 1.2 | 2.6 |
| Cd, мг/кг, 0–20 см | 0.10 | 0.12 |
| Pb, мг/кг, 0–20 см | 12.0 | 13.5 |
| Көшет сақталуы, пайыз | 72 | 86 |
| Орташа биіктік өсімі, см/маусым | 18 | 27 |
| Дің жуандауы, мм/маусым | 3.1 | 4.4 |
| Фитостресс белгілері бар көшет үлесі, пайыз | 6 | 14 |

Жалпы нәтижелер Таулы-Үлбі жағдайында сарқынды суды қолдану орманды қалпына келтірудің бастапқы кезеңінде тиімділікті арттыратынын, яғни көшеттердің сақталуы мен өсім көрсеткіштерін жақсартатынын дәлелдейді. Алайда экологиялық қауіпсіздік тұрғысынан тәуекелдің негізгі осі су мен топырақтың минералдануымен және биогендік компоненттердің, әсіресе нитраттардың миграциясымен байланысты екені анықталды. Натрийлену индикаторының өсуі топырақ құрылымына қатысты тәуекелді күшейтетін белгі ретінде көрініп, ұзақ мерзімді мониторингтің міндетті екенін көрсетті. Осы себепті нәтижелердің ең маңызды қорытындысы технологиялық шешімге тіреледі: сарқынды суды қолдану тек су сапасын тұрақтандыру, суару мөлшерін маусымдық буланауға бейімдеу, тұзденуға сезімтал кезеңдерде суаруды жұмсарту және топырақтың жедел индикаторларын тұрақты бақылау арқылы ғана қауіпсіз болады.

Талқылау барысында алынған нәтижелер Таулы-Үлбі аумағында сарқынды суды пайдалану орман екпелерінің бастапқы кезеңіндегі өнімділік көрсеткіштерін жақсарта алатынын, бірақ экологиялық қауіпсіздік тұрғысынан ең ықтимал тәуекелдер су мен топырақтағы минералдану, натрийлену және азоттың, әсіресе нитраттың миграциясымен байланысты екенін көрсетті. Мұндай екіжақты әсер сарқынды суды қайта пайдалану жөніндегі халықаралық көзқараспен үйлеседі: тазартылған сарқынды су өсімдікке ылғал мен қоректік элементтердің қосымша көзін береді, алайда тәуекелді басқарудың өзегі ретінде тұздылық, содалылық, арнайы иондық уыттылық, патогендік қауіп және химиялық ластағыштар қарастырылады [1].

Су сапасы бойынша тәжірибелік судағы электрөткізгіштіктің маусым ішінде жоғары деңгей көрсетуі және органикалық жүктеменің салыстырмалы артуы табиғи суға қарағанда қабылдаушы ортаға түсетін тұздық және биогендік қысымның күшейетінін білдіреді. Бұл құбылыс жекелеген аймақтарға тән емес, қайта пайдалану жобалары үшін әмбебап тәуекел ретінде сипатталады, өйткені тұздылық пен натрийлену топырақ құрылымының тұрақтылығын әлсіретіп, су өткізгіштіктің төмендеуіне, ал еңісті аумақта беткейлік ағынның күшеюіне түрткі болуы мүмкін [3], [4]. Біздің жағдайда судағы минералдану мен топырақтың үстіңгі қабатындағы электрөткізгіштіктің қатар өсуі себеп-салдар байланысын айқын көрсетеді: су сапасының тұздылық белгісі алдымен 0–20 см қабатта уақытша шоғырланып, маусымның ортасында булану күшейген шақта ең жоғары мәнге жетеді. Мұндай динамика тұздардың жиналуы тұрақты күйге айналып үлгермей тұрып жауын-шашын мен шайылу әсерінен бәсеңдеуі мүмкін екенін білдіргенімен, ұзақ мерзімде қайталана берсе кумулятивтік сипат алатыны әдебиетте жиі айтылады [3].

Натрийлену белгілерінің күшеюі Таулы-Үлбі үшін ерекше маңызды, себебі таулы-орманды ландшафттарда топырақтың агрегаттық тұрақтылығы бұзылса, эрозиялық процестер тездейді, ал ағын су арқылы еріген заттар мен ұсақ дисперсті бөлшектер су объектілеріне жылдам тасымалдануы мүмкін. ISO құжаттарында және су сапасын бағалау жөніндегі классикалық нұсқаулықтарда натрийлену тәуекелі топырақ құрылымына тікелей әсер ететін негізгі шектеуші факторлардың бірі ретінде қаралады және ол көбіне бір маусымда емес, бірнеше циклдан кейін анық байқалатыны көрсетіледі [5]. Біздің нәтижелер қысқа мерзімді бақылаудың өзінде натрийленудің алғашқы сигналдарының көрінуі жобаның ұзақ мерзімді қауіпсіздігі үшін дәл осы индикаторды негізгі бақылау көрсеткіштерінің қатарына қою қажеттігін негіздейді.

Азоттық көрсеткіштер бойынша тәжірибелік алаңда нитраттың үстіңгі қабатта артуы және жекелеген кезеңдерде төменгі қабатта да байқалуы сарқынды су арқылы

келетін қоректік заттардың бір бөлігі өсімдікке игерілмей, шайылу арқылы миграцияға түсетінін көрсетеді. Бұл факт қайта пайдалану жүйелерінде жиі талқыланатын мәселе, өйткені нитраттың шайылуы жерасты сулары үшін ең сезімтал қауіптердің бірі саналады және ол суару режимі, топырақтың механикалық құрамы, жауын-шашын және бедер жағдайымен бірге анықталады [1], [2]. Таулы аумақта еңістік жағдайы нитраттың тік бағыттағы шайылуымен қатар, беткейлік ағын арқылы жанама тасымалдану ықтималдығын да арттырады, сондықтан біздің нәтижелерде нитрат динамикасының сезімтал шығуы ландшафттық факторлардың ықпалын жанама түрде растайды.

Өсімдік көрсеткіштері тәжірибелік учаскелерде көшет сақталуы мен биіктік өсімінің жоғары болуымен сипатталды, бұл сарқынды су құрамындағы ылғал мен биогендердің бастапқы бейімделуді жақсартатынын аңғартады. FAO материалдарында да тазартылған сарқынды суды орман және агроорман жүйелерінде пайдалану деградацияланған жерлерде отырғызылған ағаштардың тіршілікке бейімділігін арттырып, жердің құнарлық қасиеттерін жақсартуға ықпал етуі мүмкін екені атап көрсетіледі [6], [7]. Алайда біздің бақылауларда маусым ортасында кейбір нүктелерде фитостресс белгілерінің пайда болуы тиімділік пен тәуекелдің бір мезгілде жүретінін көрсетті: тұздылықтың уақытша көтерілуі өсімдік физиологиясына әсер ететін шекке жақындағанда, жапырақ немесе қылқан түсінің өзгеруі, ұштарының күйігі сияқты симптомдар байқалуы мүмкін. Әдебиетте мұндай симптомдар тұздылық және арнайы ион уыттылығының ерте белгісі ретінде қарастырылып, су сапасын топырақ индикаторларымен бірге бағалау қажеттігі баса айтылады [3].

Ауыр металдар бойынша судағы деңгейдің төмен болуы қысқа мерзімді кезеңде жедел қауіптің жоғары еместігін көрсеткенімен, топырақтағы және өсімдік ұлпасындағы жинақталу бірнеше маусымда ғана айқындалуы мүмкін. Сондықтан біздің нәтижелер ауыр металдар тәуекелі бірден көрінбейтін, бірақ мониторинг логикасында міндетті түрде сақталатын кумулятивтік қауіп ретінде бағаланатынын көрсетеді; бұл орманды қалпына келтірудің ұзақ өмірлік цикліне байланысты, өйткені ағаш екпелері уақыт өте келе қорлық элементтерді әртүрлі қарқынмен жинақтай алады[5].

Осы жерде халықаралық регламенттер мен стандарттар ұсынатын ең маңызды қағида – қайта пайдалану жобасын тек “су сапасының сәйкестігімен” шектемей, тәуекелге негізделген басқару жүйесі ретінде қарастыру. АҚШ EPA нұсқаулығында және ЕО-ның 2020/741 регламентінде қайта пайдалану жобалары үшін басқарудың өзегі ретінде тәуекелді бағалау, бақылау нүктелерін белгілеу және мониторинг нәтижесіне сүйеніп технологияны үнемі түзету принципі баса көрсетіледі [8]. Бұл тәсіл жұмыстағы “технологиялық шешім тек мониторингпен бірге қауіпсіз” деген тұжырымды нақтылайды: яғни Таулы-Үлбі жағдайында сарқынды су беру режимі тұрақты болса да, топырақ тұздылығы мен натрийлену тренді өзгерсе, бұл жобаның экологиялық қауіпсіздік деңгейін қайта бағалау және басқару шараларын күшейту қажеттігін білдіреді.

ISO 16075 сериясының Part 2 және Part 3 құжаттары мониторингтің негізін “жоба логикасына” кіріктіруді ұсынады: судың сапасы өзгеруі мүмкін болғандықтан, топырақ пен өсімдікке түсетін жүктемені басқару үшін су беру жүйесінің компоненттері (сүзгілеу, біркелкі тарату, дозалау, суару жиілігі) жобалау кезінде-ақ тәуекел көрсеткіштерімен байланыстырылуы тиіс. Деректерде қалқыма заттардың жоғары болуы және BOD/COD айырмашылығы технология таңдаудың маңызын күшейтеді:

органикалық және қатты фракциялар топырақ бетінде шоғырланса, инфильтрацияның нашарлауына, кей учаскеде қыртыстануға және нәтижесінде беткейлік ағынның артуына түрткі болуы ықтимал. Бұл, өз кезегінде, еріген тұздар мен нитраттардың “жергілікті” емес, кеңістікте таралу тәуекелін күшейтеді. Сол себепті ISO 16075-4 мониторинг стандарты “операциялық бақылауды” (су сапасы, топырақтың жедел индикаторлары, өсімдік күйі) жобаның ажырамас бөлігі ретінде қарастырады.

Топырақтың тұздануы мен натрийлену тәуекеліне келсек, алынған нәтижелерде 0–20 см қабаттағы ЕС-тің жоғарылауы және натрийлену индикаторының өсуі қайта пайдалану жобалары үшін классикалық қауіп осін көрсетіп тұр. Мұндай жағдайда тек орташа маусымдық мәндер емес, маусым ортасындағы “шың” кезеңдер шешуші: себебі булану күшейгенде тұздар уақытша шоғырланып, өсімдікке физиологиялық стресс береді, кейін жауыннан соң біршама төмендеуі мүмкін. Бұл құбылыс практикалық тұрғыда мониторинг жиілігін “тәуекел жоғары мезгілге” бейімдеу керектігін білдіреді (ISO, 2021b). Сіздің жұмыста фитостресс белгілерінің тәжірибелік алаңда көбірек байқалуы дәл осы сценариймен үйлеседі: өсім жоғары болғанымен, тұздық режимнің уақытша нашарлауы өсімдікке стресс ретінде білінуі ықтимал. Мұндай “тиімділік–тәуекел” қатар жүруі шолулық және эмпирикалық зерттеулерде де сипатталады: сарқынды су қоректік компоненттер арқылы өсімдіктің биомассасын арттыра алады, бірақ ұзақ мерзімде тұздану/содалану немесе қоректік заттардың миграциясы күшейсе, топырақ сапасы төмендеу қаупі артады [9], [10], [11], [12]. Сондықтан Таулы-Үлбі үшін экологиялық қауіпсіздік критерийлері ішінде топырақтың химиялық көрсеткіштерімен қатар физикалық тұрақтылықты (құрылым бұзылу тәуекелі, су өткізгіштік жанама белгілері, эрозия іздері) бірге бақылау ұсынылады.

Азоттық блок бойынша нитраттың үстіңгі қабатта артуы және төменгі қабатта да байқалуы қайта пайдалану жүйелерінде жиі талқыланатын ең сезімтал қауіптің бірі – нитраттың шайылуы екенін растайды. ЕО регламенті қайта пайдалануда сапа талаптарымен қатар міндетті тәуекел-менеджмент жоспарын қарастыруының басты себебі де осы: биогендер өсімдікке пайдалы болғанымен, су ресурстарына әсер ету қаупі бар. Практикалық тұрғыда бұл Таулы-Үлбі сияқты таулы ландшафтта нитраттың миграциясын екі арнада қарастыру керек дегенді білдіреді: тік шайылу және беткейлік ағын арқылы тасымал. Осы себепті мониторинг индикаторлары “су–топырақ” деңгейімен шектелмей, қажет болғанда жерасты суын (ұңғыма бар болса) нитрат және ЕС бойынша бақылауды енгізуге мүмкіндік беруі тиіс. Сонымен бірге нитрат тәуекелі суару нормасы мен уақытын дәл таңдауға тәуелді: булану жоғары кезде жиі суару тұзды шоғырландыруы мүмкін, ал артық суару нитрат шайылуын күшейтуі ықтимал. Демек басқару шешімі “бір ғана қауіпке” емес, индикаторлардың жиынтық трендіне сүйенуі қажет.

Ауыр металдарға қатысты қысқа мерзімде судағы деңгейдің төмен болуы “жедел” тәуекелдің шамалы екенін көрсетсе де, Таулы-Үлбі өңірлік контекстінде бұл факторды әлсіретіп қарастыруға болмайды. Өңірдің тау-кен ықпалы бар екенін көрсететін еңбектер Үлбі алабының шағын өзендерінде ауыр металдардың кеңістіктік әркелкі таралатынын және ластану ізі тау-кен аудандарында айқынырақ болатынын сипаттайды [16], [17]. Бұл нәтиже сіздің мақалаңыз үшін өте пайдалы “контекстік дәлел”: қайта пайдаланылатын судың өзінде металдар төмен болуы мүмкін, бірақ фондық жағдай мен тасымал арналары (беткейлік ағын, эрозия, шөгінділер) өңірлік тәуекелді күшейтеді. Сондықтан ауыр металдар индикаторын екі деңгейде ұстау орынды: су сапасының периодтық бақылауы және топырақта қорлық концентрацияның

маусым соңындағы қайта өлшемі, ал ұзақ мерзімді кезеңде өсімдік ұлпасындағы биоаккумуляцияны таңдамалы түрде бақылау [9]. UNECE-нің Қазақстан бойынша экологиялық шолуында да мониторингтің басқарушылық шешімге байланысуы және су ресурстары мен ластағыштар тәуекелін жүйелі бақылау қажеттігі атап өтіледі. Осы тұрғыда Таулы-Үлбі үшін ұсынылған индикаторлар кешені өңірлік экологиялық басқару талаптарына да сәйкес келеді.

Қалпына келтірудің тиімділігі мен қауіпсіздігін ұзақ мерзімде дәлелдеу үшін "орман мониторингі" компонентін күшейту қажет. FAO (food and agriculture organization) қалпына келтіру мониторингі бойынша нұсқаулығында көрсеткіштерді тек биометриямен (өсім, сақталу) шектемей, экожүйелік тұрақтылық белгілерін (стресс, зақым, жер бедеріндегі эрозия іздері, жамылғының қалпына келуі) бірге қарастыру ұсынылады [13]. Ал ICP Forests нұсқаулықтары орман жағдайын стандартталған түрде бағалаудың нақты әдістерін береді: тәж күйін визуалды бағалау және зақымдаушы факторларды тіркеу [14], сондай-ақ топырақ үлгілеу және талдау протоколдары. Бұл құжаттарды Таулы-Үлбі мониторингіне енгізу сіздің жұмыстың ғылыми жаңалығын күшейтеді: индикаторлар "жай тізім" емес, халықаралық үйлесімді мониторинг дизайнымен байланысады. Мысалы, сіз тіркеген фитостресс (қылқан/жапырақ түсі, ұштық күйік) көрсеткішін ICP Forests логикасымен жүйелеп, тәж жағдайының сандық бағасына айналдыруға болады. Ал топырақтың EC, pH, натрийлену және металдар қорын ICP Forests топырақ хаттамаларымен үйлестіру деректердің салыстырмалылығын арттырады .

Осылайша, Таулы-Үлбі жағдайында сарқынды суды қолданудың негізгі ғылыми түсіндірмесі мынаған келіп тіреледі: су тапшылығы жағдайында тиімділік артады, бірақ қауіпсіздік "бір реттік нормамен" емес, тәуекелге негізделген басқару + трендтік мониторинг арқылы дәлелденеді [18]. Тәжірибелік алаңда көшеттердің сақталуы мен өсімі жоғары болғанымен, топырақтағы тұздану, натрийлену және нитрат миграциясы бойынша сезімтал сигналдардың көрінуі технологияны "шартты түрде қауіпсіз" деп емес, "мониторингпен басқарылатын жүйе" ретінде бағалауға негіз береді. Сондықтан басқарушылық тұрғыда ең тиімді стратегия – тәуекелдің жоғары кезеңдерінде суаруды жұмсартып, су беру режимін булану маусымына бейімдеу, ал нитрат тренді күшейсе суару көлемін және қоректік жүктемені шектеу, қажет жағдайда су сапасын тұрақтандыру (араластыру/қосымша тазарту) шараларын қарастыру. Мұндай тәсілдің ғылыми негізі де бар: ұзақ мерзімді қайта пайдалану әсерлері көбіне тұз-натрий теңгерімі мен қоректік заттар миграциясына тәуелді, сондықтан мониторинг арқылы ерте белгі көрінген сәтте түзету енгізу экожүйелік тұрақтылықты сақтаудың басты шарты.

Жалпы алғанда алынған нәтижелер халықаралық қағидаттармен сабақтас қорытындыға әкеледі: тазартылған сарқынды суды табиғи ортада пайдалану тиімділік әлеуетіне ие, бірақ қауіпсіздік критерийлері су ғана емес, қабылдаушы ортаның күйін және уақыт бойынша трендтерді ескергенде ғана мәнді болады. Таулы-Үлбі жағдайында дәл осы трендтік бағалау шешуші орын алады, себебі бедер мен гидрологиялық байланыстар қысқа мерзімнің өзінде көрсеткіштердің кеңістіктік өзгергіштігін арттырады. Сондықтан талқылаудың негізгі түйіні ретінде тәжірибелік алаңдағы жоғары өсім көрсеткіштері экологиялық қауіпсіздік индикаторларымен қатар қарастырылғанда ғана толық мағыналы интерпретация береді: көшет өсімі жақсарғанымен, тұздылық, натрийлену және нитрат миграциясы бойынша теріс

динамика байқалса, бұл технологияның экожүйелік тұрақтылыққа ықпалын қайта бағалауды қажет ететін белгі ретінде түсіндіріледі.

*Қорытынды*

Таулы Үлбі аумағында сарқынды суды қолдана отырып орманды қалпына келтірудің бастапқы кезеңінде экожүйелік және өндірістік тұрғыдан байқалған негізгі заңдылықтар жинақталды. Салыстырмалы талдау нәтижелері тәжірибелік учаскелерде көшеттердің сақталуы мен биіктік өсімі бақылау учаскелеріне қарағанда жоғары екенін көрсетті, бұл тазартылған сарқынды судың ылғал тапшылығы жағдайында өсу процесін қолдай алатынын дәлелдейді. Сонымен бірге экологиялық қауіпсіздік тұрғысынан ең сезімтал тәуекелдер су мен топырақтың минералдануын көрсететін электрөткізгіштік көрсеткіштерінің жоғарылауы, топырақта натрийленудің бастапқы белгілерінің байқалуы және нитраттардың төменгі қабаттарға көшу ықтималдығы арқылы анықталды. Бұл факторлар жобаның тиімділігі мен қауіпсіздігі қатар бағалануы тиіс екенін және қысқа мерзімді оң өсімнің өзі ұзақ мерзімді кумулятивтік әсерлер қаупін жоққа шығармайтынын аңғартады. Зерттеу нәтижелері орманды қалпына келтіру жұмыстарында сарқынды суды қолданудың қауіпсіздік критерийлері су сапасының физика химиялық және санитарлық көрсеткіштерін ғана емес, қабылдаушы орта ретінде топырақтың тұздану натрийлену динамикасын, азоттың миграциясын және өсімдіктің физиологиялық күйін қамтуы қажет екенін нақтылады. Ұсынылған индикаторлар жиынтығы су топырақ өсімдік жүйесінде тәуекелдің ерте белгілерін тіркеуге мүмкіндік беріп, технологияның экожүйелік тұрақтылыққа ықпалын бағалауға негіз болады. Жалпы алғанда, Таулы Үлбі жағдайында сарқынды суды орманды қалпына келтіруде пайдалану әлеуеті бар екенін көрсетті, алайда бұл тәсілдің экологиялық тұрғыдан қауіпсіз іске асуы мониторинг деректеріне сүйенген жүйелі бағалау арқылы ғана дәлелденеді.

## ӘДЕБИЕТ

[1] World Health Organization. (2006). *Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater: Volume 2. Wastewater use in agriculture.* WHO. https://www.pseau.org/outils/ouvrages/who_safe_use_wastewater_excreta_greywater_v2_en.pdf

[2] Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1985). *Water quality for agriculture* (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 29 Rev. 1). Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/b1345105-e9e6-4704-81cc-577f8e187278/content

[3] International Organization for Standardization. (2021). *Guidelines for treated wastewater use for irrigation projects—Part 4: Monitoring* (ISO Standard No. 16075-4:2021). ISO. https://www.iso.org/standard/73485.html

[4] U.S. Environmental Protection Agency. (2012). *2012 guidelines for water reuse* (EPA/600/R-12/618). U.S. EPA. https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-08/documents/2012-guidelines-water-reuse.pdf

[5] European Parliament and the Council. (2020). *Regulation (EU) 2020/741 of 25 May 2020 on minimum requirements for water reuse.* Official Journal of the European Union. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2020/741/oj/eng

[6] International Organization for Standardization. (2020). *Guidelines for treated wastewater use for irrigation projects—Part 1: The basis of a reuse project for irrigation* (2nd ed.; ISO Standard No. 16075-1:2020). ISO. https://www.iso.org/standard/73482.html

[7] International Organization for Standardization. (2020). *Guidelines for treated wastewater use for irrigation projects—Part 2: Development of the project* (ISO Standard No. 16075-2:2020). ISO. https://www.iso.org/standard/73483.html

[8] International Organization for Standardization. (2021). *Guidelines for treated wastewater use for irrigation projects—Part 3: Components of a reuse project for irrigation* (ISO Standard No. 16075-3:2021). ISO. https://www.iso.org/standard/73484.html

[9] Jaramillo, M. F., & Restrepo, I. (2017). Wastewater reuse in agriculture: A review about its limitations and benefits. *Sustainability, 9*(10), 1734. https://www.mdpi.com/2071-1050/9/10/1734

[10] Hasan, E., et al. (2025). Impacts of long-term treated wastewater irrigation and associated environmental considerations. *Sustainability, 17*(19), 8663. https://www.mdpi.com/2071-1050/17/19/8663

[11] Mohammed, A. S., et al. (2025). Evaluating treated wastewater irrigation effects on soil quality. *Discover Environment.* https://link.springer.com/article/10.1007/s44447-025-00070-3

[12] Saleh, M., et al. (2025). Effects of treated wastewater irrigation on soil properties. *Agricultural Water Management.* https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377425002999

[13] Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2020). *The road to restoration: A guide to identifying priorities and indicators for monitoring forest and landscape restoration* (Revised version). FAO. https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/fda6a9d2-73c0-4bb8-a4b5-fd1e7cc6cc07/content

[14] UNECE ICP Forests. (2020). *ICP Forests monitoring manual—Part IV: Visual assessment of crown condition and damaging agents* (Version 2020-3). Thünen Institute/ICP Forests. https://www.icp-forests.org/pdf/manual/2020/ICP_Manual_part04_2020_Crown_version_2020-3.pdf

[15] UNECE ICP Forests. (2020). *ICP Forests monitoring manual—Part X: Sampling and analysis of soil* (Version 2020-1). Thünen Institute/ICP Forests. https://www.icp-forests.net/fileadmin/icp_forests/Dateien/Manual_Versions/2020-22/ICP_Manual_part10_2020_Soil_version_2020-1.pdf

[16] Dyussembayeva, M., et al. (2025). Distribution characteristics and assessment of the content of heavy metals in small rivers of the Ulba river basin in the mining regions of East Kazakhstan. *RSC Advances, 15*, 11034. https://doi.org/10.1039/D5RA00801H

[17] Seraya, N., Daumova, G., Petrova, O., Garcia-Mira, R., & Polyakova, A. (2025). Ecological status of the small rivers of the East Kazakhstan Region. *Sustainability, 17*(14), 6525. https://www.mdpi.com/2071-1050/17/14/6525

[18] United Nations Economic Commission for Europe. (2024). *Experience of the Republic of Kazakhstan in standardizing wastewater and irrigation water quality requirements and revising standards* [Presentation]. UNECE. https://unece.org/sites/default/files/2024-04/3.%20wastewater%20standards%20revision_KAZ_March%202024_2_Engl%20%28autom%29_0.pdf

[19] United Nations Economic Commission for Europe. (2025). *Environmental performance review: Kazakhstan (Third review).* UNECE. https://unece.org/sites/default/files/2025-07/ECE_CEP_Kazakhstan_Eng.pdf

## REFERENCES

[1] World Health Organization. (2006). *Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater: Volume 2. Wastewater use in agriculture.* WHO. https://www.pseau.org/outils/ouvrages/who_safe_use_wastewater_excreta_greywater_v2_en.pdf

[2] Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1985). *Water quality for agriculture* (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 29 Rev. 1). Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/b1345105-e9e6-4704-81cc-577f8e187278/content

[3] International Organization for Standardization. (2021). *Guidelines for treated wastewater use for irrigation projects—Part 4: Monitoring* (ISO Standard No. 16075-4:2021). ISO. https://www.iso.org/standard/73485.html

[4] U.S. Environmental Protection Agency. (2012). *2012 guidelines for water reuse* (EPA/600/R-12/618). U.S. EPA. https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-08/documents/2012-guidelines-water-reuse.pdf

[5] European Parliament and the Council. (2020). *Regulation (EU) 2020/741 of 25 May 2020 on minimum requirements for water reuse.* Official Journal of the European Union. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2020/741/oj/eng

[6] International Organization for Standardization. (2020). *Guidelines for treated wastewater use for irrigation projects—Part 1: The basis of a reuse project for irrigation* (2nd ed.; ISO Standard No. 16075-1:2020). ISO. https://www.iso.org/standard/73482.html

[7] International Organization for Standardization. (2020). *Guidelines for treated wastewater use for irrigation projects—Part 2: Development of the project* (ISO Standard No. 16075-2:2020). ISO. https://www.iso.org/standard/73483.html

[8] International Organization for Standardization. (2021). *Guidelines for treated wastewater use for irrigation projects—Part 3: Components of a reuse project for irrigation* (ISO Standard No. 16075-3:2021). ISO. https://www.iso.org/standard/73484.html

[9] Jaramillo, M. F., & Restrepo, I. (2017). Wastewater reuse in agriculture: A review about its limitations and benefits. *Sustainability, 9*(10), 1734. https://www.mdpi.com/2071-1050/9/10/1734

[10] Hasan, E., et al. (2025). Impacts of long-term treated wastewater irrigation and associated environmental considerations. *Sustainability, 17*(19), 8663. https://www.mdpi.com/2071-1050/17/19/8663

[11] Mohammed, A. S., et al. (2025). Evaluating treated wastewater irrigation effects on soil quality. *Discover Environment.* https://link.springer.com/article/10.1007/s44447-025-00070-3

[12] Saleh, M., et al. (2025). Effects of treated wastewater irrigation on soil properties. *Agricultural Water Management.* https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377425002999

[13] Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2020). *The road to restoration: A guide to identifying priorities and indicators for monitoring forest and landscape restoration* (Revised version). FAO.

https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/fda6a9d2-73c0-4bb8-a4b5-fd1e7cc6cc07/content

[14] UNECE ICP Forests. (2020). *ICP Forests monitoring manual—Part IV: Visual assessment of crown condition and damaging agents* (Version 2020-3). Thünen Institute/ICP Forests. https://www.icp-forests.org/pdf/manual/2020/ICP_Manual_part04_2020_Crown_version_2020-3.pdf

[15] UNECE ICP Forests. (2020). *ICP Forests monitoring manual—Part X: Sampling and analysis of soil* (Version 2020-1). Thünen Institute/ICP Forests. https://www.icp-forests.net/fileadmin/icp_forests/Dateien/Manual_Versions/2020-22/ICP_Manual_part10_2020_Soil_version_2020-1.pdf

[16] Dyussembayeva, M., et al. (2025). Distribution characteristics and assessment of the content of heavy metals in small rivers of the Ulba river basin in the mining regions of East Kazakhstan. *RSC Advances, 15*, 11034. https://doi.org/10.1039/D5RA00801H

[17] Seraya, N., Daumova, G., Petrova, O., Garcia-Mira, R., & Polyakova, A. (2025). Ecological status of the small rivers of the East Kazakhstan Region. *Sustainability, 17*(14), 6525. https://www.mdpi.com/2071-1050/17/14/6525

[18] United Nations Economic Commission for Europe. (2024). *Experience of the Republic of Kazakhstan in standardizing wastewater and irrigation water quality requirements and revising standards* [Presentation]. UNECE. https://unece.org/sites/default/files/2024-04/3.%20wastewater%20standards%20revision_KAZ_March%202024_2_Engl%20%28autom%29_0.pdf

[19] United Nations Economic Commission for Europe. (2025). *Environmental performance review: Kazakhstan (Third review).* UNECE. https://unece.org/sites/default/files/2025-07/ECE_CEP_Kazakhstan_Eng.pdf

**Килыбаева К.С.**

## КРИТЕРИИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И ИНДИКАТОРЫ МОНИТОРИНГА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЛЕСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТОЧНЫХ ВОД НА ТЕРРИТОРИИ ГОРНОЙ УЛЬБЫ В ВОСТОЧНОМ КАЗАХСТАНЕ

**Аннотация.** В статье обоснованы критерии экологической безопасности и индикаторы мониторинга восстановления лесов на территории Горной Ульбы (Восточный Казахстан) с использованием очищенных сточных вод. Цель исследования — предложить набор измеряемых показателей, позволяющих раннее выявление рисков в системе вода–почва–растение, и адаптировать их к условиям горного ландшафта. Методологически применён принцип управления, основанного на оценке рисков; выполнен сравнительный анализ качества воды, динамики засоления и натрификации почв, миграции минерального азота, а также приживаемости и начального прироста саженцев на опытном и контрольном участках. Результаты показали, что на участках с использованием сточных вод отмечаются более высокая сохранность саженцев и больший прирост по высоте, что свидетельствует о потенциале повышения эффективности восстановления в условиях дефицита влаги. Вместе с тем наиболее чувствительными к риску индикаторами определены рост электропроводности как показателя минерализации воды и почвы, появление начальных признаков натрификации почв и вероятность миграции нитратов в нижние горизонты. Научная новизна исследования заключается в интеграции критериев безопасности и

индикаторов для горных лесных экосистем в единую систему и в их увязке с дизайном мониторинга. Практическая значимость определяется возможностью использования предложенного комплекса индикаторов при экологическом сопровождении проектов лесовосстановления, управлении рисками и разработке программ долгосрочных наблюдений.

**Ключевые слова:** Горная Ульба, сточные воды, лесовосстановление, экологическая безопасность, индикаторы мониторинга, засоление почв, натрификация, миграция нитратов, качество воды.

**Kilybayeva K.S.**

## ENVIRONMENTAL SAFETY CRITERIA AND MONITORING INDICATORS FOR FOREST RESTORATION USING WASTEWATER IN THE MOUNTAIN ULBA AREA OF EAST KAZAKSTAN

**Annotation.** This article substantiates environmental safety criteria and monitoring indicators for forest restoration in the Mountain Ulba area of East Kazakhstan using treated wastewater. The study aims to propose a set of measurable indicators that enable early risk detection within the water–soil–plant system and to adapt them to mountainous landscape conditions. Methodologically, a risk-based management principle is applied; a comparative analysis is conducted between experimental and control plots focusing on water quality, soil salinization and sodification dynamics, mineral nitrogen migration, and seedling survival and initial growth. The results show higher seedling survival and greater height increment on plots irrigated with treated wastewater, indicating the potential to improve restoration effectiveness under moisture-deficit conditions. At the same time, the most risk-sensitive indicators are identified as increasing electrical conductivity reflecting water and soil mineralization, the emergence of early signs of soil sodification, and the likelihood of nitrate leaching to deeper soil layers. The scientific novelty of the study is demonstrated by integrating safety criteria and indicators for mountainous forest ecosystems into a single framework and linking them to monitoring design. The practical significance lies in the applicability of the proposed indicator set for environmental support of forest restoration projects, risk management, and the development of long-term monitoring programmes.

**Keywords:** Mountain Ulba, wastewater, forest restoration, environmental safety, monitoring indicators, soil salinization, sodification, nitrate migration, water quality.