



Ғылыми мақала

ТИХАЯ ӨЗЕНІ ЖЕР ҮСТІ СУЛАРЫНЫҢ ҚЫШҚЫЛ-НЕГІЗДІК КҮЙІНІҢ ДИНАМИКАСЫ

Наталья В. Серая¹ х.ғ.к., профессор , Гульжан К. Даумова^{1*} т.ғ.к., профессор , Ольга А. Петрова¹ т.ғ.к., қауымдастырылған профессор

¹Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан; NSeraya@edu.ektu.kz (НВС), GDaumova@edu.ektu.kz (ГКД), OPetrova@edu.ektu.kz (ОАП)
Автор корреспондені: Гульжан К. Даумова, GDaumova@edu.ektu.kz

ТҮЙІН СӨЗДЕР

сутектік көрсеткіші (рН), жер үсті сулары, Тихая өзені, Шығыс Қазақстан облысы, маусымдық динамика, көпжылдық өзгерістер, су сапасының мониторингі, жылу картасы, кластерлеу.

АБСТРАКТ

Бұл жұмыста 2017...2025 жылдар аралығындағы Тихая өзенінің (Шығыс Қазақстан облысы) жер үсті суларындағы сутектік көрсеткішінің (рН) көпжылдық динамикасына кеңейтілген талдау келтірілген. Зерттеу айлық және жылдық орташа мәндерді, сондай-ақ маусым аралық және жыл аралық рН ауытқуларын қамтиды. Статистикалық және графикалық бейнелеу әдістері, соның ішінде термиялық карта, ауқым диаграммалары және сызықтық регрессиялық жуықтау қолданылды. Сондай-ақ, сызықтық регрессия модельдерін қолдана отырып, трендік талдау жүргізілді және ай бойынша кластерлеудің жылу картасы салынды. Өзен суының сутектік көрсеткіші қышқылданудың тұрақты белгілерінсіз сәл сілтілі реакция шегінде өзгертінді анықталды. Сонымен қатар, әсіресе жазда табиғи және антропогендік факторларға байланысы болуы мүмкін жеке ауытқулар анықталды. Келтірілген деректер су қоймасының жоғары буферлік қабілетін және оның экологиялық өзін-өзі реттеу қабілетін көрсетеді.

Мақала жайында:

Жіберілді: 29.04.2025
Қайта қаралды: 08.08.2025
Қабылданды: 23.09.2025
Жарияланды: 01.10.2025

Дәйексөз үшін:

Серая Н., Даумова Г., Петрова О.
Тихая өзені жер үсті суларының қышқыл-негіздік күйінің динамикасы // Гидрометеорология и экология, 118 (3), 2025, 88-102.

1. КІРІСПЕ

Сутектік көрсеткіші заттардың ерігіштігіне, ластаушы компоненттердің сипатына, биохимиялық процестерге және су түбі организмдерінің өмір сүруіне әсер ететін су ортасының маңызды сипаттамасын білдіреді. Климаттың өзгеруі және антропогендік әсердің жоғарылауы жағдайында су экожүйелерінің қышқылдық-негіздік балансының бұзылуы байқалады.

Сутектік көрсеткіштің өзгерістері химиялық заттардың суда ерігіштігіне тікелей әсер етеді. Мысалы, бірқатар авторлардың [1...2] деректері бойынша, рН төмендеген кезде алюминий, темір, кадмий және қорғасын сияқты металдардың ерігіштігі артып, бұл олардың қозғалғыштығы мен уыттылығын күшейтуі мүмкін екен. Сонымен қатар, рН су объектілерінің буферлік қабілеті үшін маңызды көмірқышқылдық-карбонаттық тепе-теңдікті реттейді [3].

Сутектік көрсеткіштің оңтайлы диапазоннан (6.5...8.5) ауытқуы су түбі организмдеріне кері әсер етуі мүмкін. Келесі авторлардың [4...5] ғылыми жұмыстарында, рН мәні 5.5-тен төмен болған кезде сезімтал түрлердің, соның ішінде жас балықтардың өлімі орын алатыны анықталған. Басқа зерттеуде [6] сутектік көрсеткіштің балықтардағы репродуктивті процестерге теріс әсері дәлелденді.

Сутектік көрсеткіштің жоғарылауы аммиактың (NH₃) уыттылығын арттыруы мүмкін екенін атап өтуге болады [7].

Тау-кен металлургия кешені гидрохимиялық параметрлерге, соның ішінде сутектік көрсеткіштің, әсіресе өндіруші және өңдеуші кәсіпорындарға жақын өзендерде айтарлықтай әсер ететіні белгілі. Негізгі мәселеге күкірт қышқылының түзілуіне және рН төмендеуіне әкелетін сульфидтердің (негізінен пириттің) сумен және оттегімен

жанасуынан туындайтын шахталардың қышқылдық дренажы болып табылады. Авторлардың [8...9] зерттеулеріне сәйкес шахталардың қышқылдық дренажына ұшыраған су объектілерінің рН мәні 2.5...4.0-ге дейін төмендеуі мүмкін, бұл өз кезегінде су флорасы мен фаунасына өткір уытты әсер етеді. Мұндай сулар қышқыл ортада қозғалғыштығы артатын еритін ауыр металдардың жоғары концентрациясымен сипатталады [10...11].

Сонымен қатар, кенді байыту қалдықтарында көбінесе реагенттер мен қышқыл түзетін заттардың қалдықтары болатыны белгілі. Қалдық қоймаларының оқшаулануы бұзылған жағдайда қышқыл сулардың іргелес өзендерге сүзілуі жүреді [12].

Халықаралық деңгейде пассивті тазарту жүйелерін (әктасты дренаждық арналар, анаэробты биореакторлар) қоса алғанда, шахталардың қышқылдық дренажын бейтараптандыру шаралары әзірленуде, алайда іс жүзінде дамушы елдерде бақылау әлсіз болып қалады. Мысалы, Латын Америкасы, Африка және Орталық Азия аймақтарында тау-кен металлургия кешенінің өзендердің сутектік көрсеткішіне әсері үлкен экологиялық проблема болып қала береді [13...15].

Дүниежүзілік денсаулық сақтау ұйымының ұсыныстарына [16] сәйкес ауыз су мен жер үсті суларының орташа рН диапазоны 6.5...8.5 құрайды. АҚШ қоршаған ортаны қорғау агенттігі [17] экожүйелердің қауіпсіздігін қамтамасыз ету үшін осы диапазондағы сутектік көрсеткішті үнемі бақылау қажеттілігін атап өтеді. Сонымен қатар, Еуропалық су бойынша рамалық директивасы [18] су объектілерінің экологиялық жағдайын бағалау кезінде рН көрсеткішінің маңыздылығын атап көрсетеді.

Ауылшаруашылық және өндірістік ағындардың қышқылдық-негіздік балансына, әсіресе белсенді урбанизация аймақтарына әсерін зерттеуге көп көңіл бөлінеді [19].

Сутектік көрсеткішті бақылау өзен суының сапасы мен экожүйелердің жағдайын бағалаудың ажырамас бөлігі болып табылады. Шетелдік тәжірибе мониторингті, модельдеуді және халықаралық стандарттарды қолдануды біріктіретін кешенді тәсілдің маңыздылығын көрсетеді. Тау-кен металлургиялық кәсіпорындарының ықпалы алдын алу және қалпына келтіру шараларын енгізу қажеттілігін айқындайды. рН деңгейін тұрақты ұстау әсіресе жаһандық экологиялық сын-қатерлер жағдайында маңызды екенін атап өтуге болады.

Осылайша, жүргізілген әдеби шолудың негізінде рН көрсеткіші табиғи сулар сапасының маңызды сипаттамасы болып табылатыны және ол су ортасының қышқылдық немесе сілтілік дәрежесін көрсететіні анықталынды. Қалыпты рН диапазонынан ауытқулар ластану дәрежесін, биохимиялық өзгерістерді немесе экожүйедегі гидрологиялық өзгерістерді көрсетуі мүмкін.

Шығыс Қазақстан облысында (ШҚО) орналасқан Тихая өзені (1-сурет) жергілікті мониторинг объектісі ретінде, әсіресе климаттың өзгеруі және антропогендік әсердің өсуі жағдайында қызығушылық тудырады. Қысқа қашықтығына қарамастан, ол жергілікті экожүйелер мен шаруашылық қызметі үшін жоғары экологиялық маңыздылыққа ие.

Табиғи, сонымен қатар, антропогендік факторлар да су объектілеріне айтарлықтай әсер ететін Шығыс Қазақстан облысы жағдайында рН мониторингі ерекше өзектілікке ие болады.

Бұл зерттеудің мақсаты 2017 жылдан 2025 жылдарға дейінгі Тихая өзенінің маусымдық және көпжылдық ағындысының рН өзгерістерін талдау болып табылады. Тихая өзенінің жер үсті суларының көпжылдық және маусымдық сутектік көрсеткіші динамикасының заңдылықтарын анықтауға, сондай-ақ гидрохимиялық сипаттамалардың тұрақтылық дәрежесін бағалауға ерекше назар аударылған.



Сурет 1. Тихая өзенінің көрінісі

2. МӘЛІМЕТТЕР МЕН ӘДІСТЕР

Мәліметтерді өңдеу үшін сипаттамалық статистика әдістері (орташа, медианалық мәндер, ауқым) пайдаланылды, уақыт қатарларының графиктері, жылу карталары, ауқым диаграммалары, сондай-ақ трендтерді бағалау үшін сызықтық регрессиялық модельдер салынды. Деректерді өңдеу және визуализация Microsoft Excel және Python бағдарламалық құралдарының көмегімен жүзеге асырылды.

3. НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

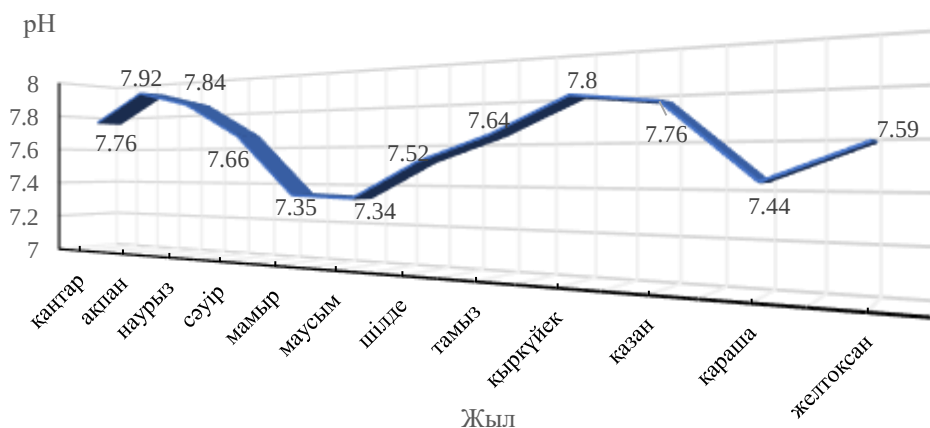
Талдау үшін 2017 жылдан 2025 жылдарға дейінгі кезеңді қамтитын рН мониторингінің эмпирикалық деректері пайдаланылды. Өлшеуді Ұлттық Гидрометеорологиялық қызмет ай сайын дала жағдайында параметрлерді өлшеудің және сынамаларды іріктеудің бірыңғай әдістемелерін сақтай отырып жүргізді. Бастапқы мәндер Қазақстан Республикасы экология, геология және табиғи ресурстар министрлігінің «Қазгидромет» РМК экологиялық мониторинг Департаментінің қоршаған ортаның жай-күйі туралы ақпараттық бюллетеньдерде ұсынылған белгіленген көрсеткіштер де, интервалдық бағалаулар да болды [20]. Алынған мәліметтер маусымдық және жылдық өзгерісті бағалау мақсатында айлар мен жылдар бойынша топтастырылды (1-кесте).

Әр ай үшін есептелген рН орташа мәндерінің негізінде (2-сурет) көпжылдық кезең үшін келесі заңдылықтарды ажыратуға болады. рН минималды мәндері мамыр (7.35) және маусым (7.34) аралығында байқалады. Бұл қардың белсенді еруі, су тасқыны және ауылшаруашылық аумақтарынан ағынның ұлғаюы кезеңімен сәйкес келеді, яғни бұл органикалық жүктеменің артуынан, өзенге гумус пен қышқыл қосылыстардың төгілуімен байланысты болуы мүмкін. Сондай-ақ, лайлы, тұнбасы бар суда осы уақытта фотосинтетикалық белсенділік төмендеуі мүмкін.

рН максималды мәндері ақпан (7.92), наурыз (7.84), қыркүйек (7.80) және қаңтар (7.76) айларында болатыны белгілі болды. Қыс және көктемнің басындағы (қаңтар–наурыз) төмен температура, ағынның болмауы, биологиялық белсенділіктің төмендеуі сияқты жағдайлар өзгеріске аз әкелетін кезең болып табылады. Бұл сутектік көрсеткіштің тұрақты сілтілік мәніне әкеледі. Наурыз, өтпелі ай ретінде, қыс мезгілінің тұрақтылығын да, сонымен қатар экожүйенің биологиялық «оянуы» және қышқыл өнімдермен араласқан қардың жартылай еруінен көктемгі рН көтерілуінің басталуын да көрсете алады. Қыркүйек, керісінше, жаздың соңындағы фотосинтетикалық белсенділіктің шыңы, су алмасудың төмендеуі және ағынның азаю кезеңі. Фотосинтез процесінде көмірқышқыл газын тұтынудың жоғарылауы есебінен рН мәні артады.

Кесте 1*Тихая өзені суының 2017...2025 жылдардағы орташа айлық және аралық рН мәндері*

Жыл	Айлар											
	қаңтар	ақпан	наурыз	сәуір	мамыр	маусым	шілде	тамыз	қыркүйек	қазан	қараша	желтоқсан
2017	7.45	7.61	7.78	7.22	7.32	-	7.55	8.06	8.15	7.48	7.24	7.27
2018	7.65	7.76	8.21	7.5	7.61	6.79	6.85	7.28	7.56	7.32	7.28	8.4
2019	8.24-8.45	8.03-8.41	7.75-8.56	7.87-7.89	7.08-7.15	7.35-7.46	7.97-8.00	7.38-7.43	7.40-7.48	7.89-7.96	7.41-7.42	7.59-7.66
2020	7.54-8.87	7.82-8.37	7.56-8.10	7.87-7.73	7.38-7.51	7.35-7.54	6.93-8.24	6.82-8.09	7.9-8.0	7.64-9.47	7.36-7.63	7.66-7.77
2021	7.69-7.78	7.65-8.37	7.37-7.87	7.61-8.12	7.41-7.47	7.93-7.96	7.59-7.67	7.71-7.92	7.74-7.94	7.97-8.02	7.59-8.24	7.35-7.51
2022	8.0-8.17	7.85-8.45	7.95-8.02	7.45-8.11	7.96-7.97	7.14-7.33	7.45-8.05	7.27-8.15	7.48-7.55	7.83-7.90	7.48-7.77	7.55
2023	7.29-7.34	7.83-7.96	7.53-7.98	7.50-7.74	6.90-6.96	7.25-7.56	7.35-7.36	7.34-7.70	7.56-8.40	7.21-7.25	7.34-7.36	7.52-7.68
2024	7.39-7.65	7.62-7.72	7.11-7.66	7.55-7.74	6.94-7.08	7.12-7.15	7.41-7.45	7.72-7.96	7.9-7.97	7.56-7.94	7.19-7.23	7.0-7.22
2025	7.27-7.82	7.84-7.87										



Сурет 2. 2017...2025 жылдар аралығындағы Тихая өзені жер үсті суларының рН орташа айлық мәндерінің графигі

Өтпелі кезеңдер (сәуір, қазан, қараша) орташа мәні 7.44...7.76-ға дейін рН мәндерімен сипатталады. Сәуірде рН мәні қыс айларымен салыстырғанда төмендейді, бұл құрамында органикалық заттар мен қышқыл компоненттері бар еріген қар суының түсуіне байланысты. Бұл қалыпты қышқылдануға жағдай жасайды. Қазан және қараша айларында, керісінше, жазғы максимумнан кейін рН төмендеуі байқалады, яғни бұл фотосинтетикалық белсенділіктің азаюымен, температураның төмендеуімен және экожүйенің қысқы күйге көшуімен байланысты. Желтоқсан қыс мезгіліне жататындықтан, рН мәндері біраз төмендеп, 7.0...7.77 құрайды. Оның себебі төмен температура мен мұз жамылғысы жағдайында су организмдерінің белсенділігі, фотосинтез және органикалық заттардың ыдырау процестері айтарлықтай төмендеуіне байланысты болып келеді. Сондай-ақ, жер үсті ағынының баяулауына байланысты сыртқы заттардың ағыны шектеулі болып, судың химиялық құрамын тұрақтандырады. Мұндай жағдайларда рН су экожүйесінің инерциялық күйін көрсететін басқа маусымдармен салыстырғанда ең аз өзгергіштікті көрсетеді.

Айлар бойынша ең үлкен рН өзгергіштігі жазғы-күзгі кезеңде байқалады, бірақ бұл жағдайда орташа мәндер диапазоны тек 0.58 рН бірлігін құрайды, яғни 7.34 (наурыз) – 7.92 (тамыз). Бұл гидрохимиялық режимнің жалпы тұрақтылығын және жыл бойына қышқылдық-негіздік балансының күрт өзгеруінің болмауын көрсетеді. Биологиялық белсенділіктің жоғарылауы (жаз) және су ағыны көбеюі (көктем) кезеңдерінде де рН рұқсат етілген және экологиялық қолайлы шектерде қалады.

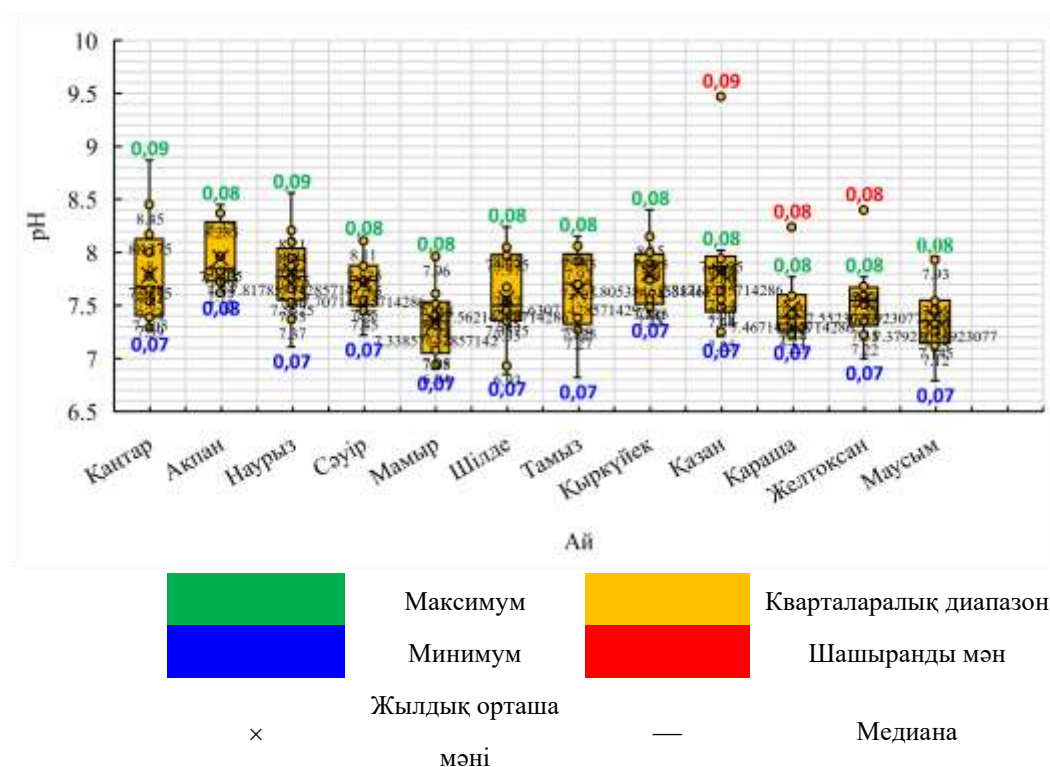
Тихая өзенінің жер үсті суларының көпжылдық кезеңдегі (2017...2025 жж.) айлар бойынша орташа рН мәндерін талдау көктем айларындағы минимумдар мен жазғы кезеңдегі максимумдарды қоса алғанда, тұрақты маусымдық заңдылықтарды анықтауға мүмкіндік берді. Алайда, орташа мәндер әр айдағы деректердің таралуы мен өзгергіштігін әрдайым толық көрсете бермейді. Маусымдық өзгергіштікті егжей-тегжейлі бағалау және рН мәндерінің ай сайынғы ауытқуын анықтау үшін ауқым (boxplot) диаграммасы салынды. Визуализацияның бұл түрі орташа тенденцияны ғана емес, сонымен қатар медианалық мәндерді, квартильаралық ауқымды және экстремалды мәндерді қоса алғанда, деректердің таралу сипатын талдауға мүмкіндік береді. 2017...2025 жылдар аралығындағы айлар бойынша сутектік көрсеткіштің boxplot графигі 3-суретте көрсетілген.

Тихая өзенінің сутектік көрсеткіші (рН) мәндерінің 2017...2025 жылдар аралығындағы жыл сайынғы және маусымдық өзгергіштігін талдау тұрақты заңдылықтарды да, ауқым диаграммасынан көрінетін жеке ауытқуларды да анықтауға мүмкіндік берді. Барлық айлардағы рН диапазоны 6.79 минималды мәнінен (2018

жылдың маусым айы) 9.47 максимумына (2020 жылдың қазан айы) дейін өзгереді, яғни бұл бейтарап ортадан қышқылдық және сілтілік мәндерге қарай мерзімді ауытқуларды көрсетеді.

Ең тұрақты рН мәндері желтоқсан, қаңтар және шілде айларында тіркелген, мұнда медианалық және орташа мәндер 7.3...7.7 аралығында, ал интерквартильдік ауқым 0.3 рН бірлігінен аспайды. Мысалы, желтоқсанда орташа мәні 7.50, ал медианасы 7.55 болған кезде мәндер диапазоны (7.0...8.4) сирек шашыранды мәндермен сипатталды. Мұндай тұрақтылық қыста биологиялық белсенділіктің төмендеуіне және тұрақты гидрологиялық режимде ластаушы заттардың шектеулі түсуіне байланысты болуы мүмкін.

Керісінше, көктем-жаз кезеңі (әсіресе мамыр және маусым айлары) қышқыл реакциямен сипатталады. Атап айтқанда, мамыр айында 6.90 (2023 ж.) және 6.94 (2024 ж.) ең төменгі рН мәндерімен тіркелсе, ал медиана 7.32 құрады, бұл жылдың қалған айларына қарағанда төмен екенін көрсетеді. Маусым айындағы жағдайда рН минималды мәні – 6.79 (2018 ж.), орташа мәні – 7.27, медианасы – 7.29 құрады. Бұл деректер өзен арнасына органикалық заттар мен минералды қосылыстарды ағызфп әкелетін су тасқынының әсерін көрсетуі мүмкін.



Сурет 3. Тихая өзені жер үсті суларының рН мәндерінің айлар бойынша (2017...2025 жж.) ауқымының (boxplot) диаграммасы

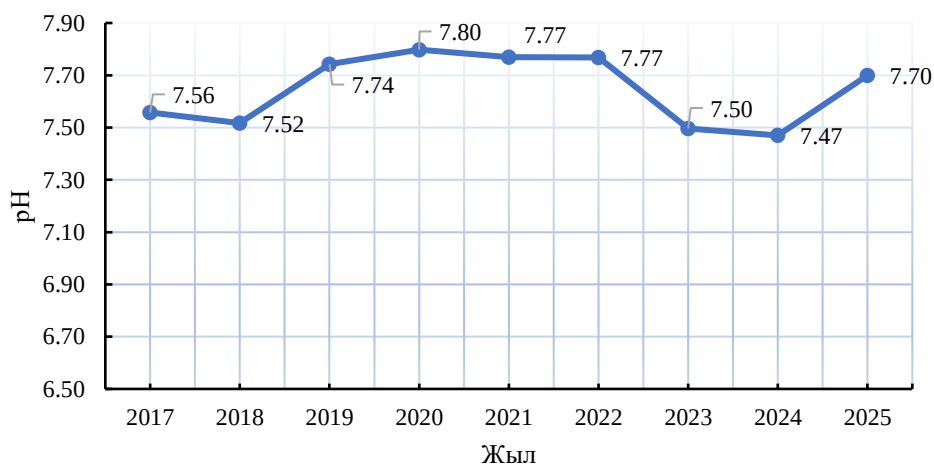
Жазғы-күзгі кезең (тамыз-қазан айлары), керісінше, сілтіліктің жоғарылауын көрсетеді. Тамыз айында рН медианалық мәні 7.70 болған кезде, максимум 8.40 (2023 ж.) құрады. Қыркүйек айында диапазон 8.40 құраса, ал қазан айында барлық бақылау кезеңіндегі ең үлкен рН мәні 9.47 болды. Бұл ретте қазан айындағы рН орташа мәні 7.75, медианалық мәні – 7.78 құрады, бұл таралудың оң жақты асимметриясын және елеулі шашыранды мәндердің болуын көрсетеді.

Диаграммадағы «қораптың» жоғарғы немесе төменгі шекарасынан асатын сутектік көрсеткіштердің шашыранды мәндері жылдың әртүрлі кезеңдерінде, соның ішінде күз-қыс айларында байқалады. Ең жоғары 9.47 мәні 2020 жылдың қазан айында тіркелсе, ал ең төменгі шашыранды мәндер (6.79...6.90 диапазонында) 2018 жылдың маусымында

және 2023 жылдың мамырында белгіленді. Бұл нүктелер диаграммада түспен көрсетілген және экстремалды мәндер ретінде белгіленген. Шашыранды мәндердің себептері жергілікті келесі гидрохимиялық бұзылуларға байланысты болуы мүмкін: ағынды сулардың түсуі, температураның маусымдық тұрақсыздығы, оттегінің жетіспеушілігі және фитопланктондық белсенділік немесе судың қышқылдық-негіздік балансына әсер ететін органикалық заттардың минералдануы [21].

Диаграммада қызыл түспен көрсетілген нүктелердегі рН орташа мәндері медианамен сәйкес келеді, бұл көптеген айларда таралу симметриясын көрсетеді. Алайда, шашыранды мәндері бар кезеңдерде ауытқулар байқалады. Атап айтқанда, қазан айында орташа мән 0.2 рН бірлігіне медианадан асады, бұл 2020 жылы 9.47-ге дейін шығаруды қоса алғанда, қалыптан тыс жоғары мәндердің әсерімен байланысты. Мамыр және маусым айларында, керісінше, орташа мәндер медианадан төмен болатыны анықталынды, бұл 2018 және 2023 жылдары тіркелген төмен сутектік көрсеткіштің шашыранды мәндерінің (6.79 дейін) болуына байланысты. Бұл экстремалды мәндердің орташа көрсеткіштерге әсерін көрсетеді. Осылайша, жүргізілген талдау Тихая өзенінің жер үсті суларының қышқылдық-негіздік режимінің айқын маусымдық өзгергіштігін дәлелдейді. Көктем мен жаздың басы қышқылдануға, ал жаздың соңы мен күз сілтілілік ауысуға мүмкіндік жасайтын кезеңдер болып табылады.

Қышқылдық-негіздік режимінің айқын маусымдылығын көрсететін рН орташа айлық динамикасын егжей-тегжейлі қарастырғаннан кейін орташа жылдық мәндердің өзгеруіне талдау жасалынды (4-сурет). Бұл тәсіл мүмкін болатын көпжылдық трендтерді анықтауға және қарастырылып отырған кезеңдегі Тихая өзеніндегі су ортасының жалпы жағдайын бағалауға мүмкіндік береді. Графикте жыл аралық өзгерістердің төмен амплитудасы, сондай-ақ қалыпты белдеудің су ағындары үшін норма шегінде көрсеткіштің сақталуы айқын көрінеді. Тихая өзеніндегі орташа жылдық рН мәндері қалыпты шектерде қалады (тұщы су экожүйелері үшін қалыпты рН диапазоны 7.2...8.1) және жалпы тұрақты сипатты көрсетеді (орташа жылдық мәндердің нақты аралығы 7.47...7.80). Алайда, 2019 және 2020 сияқты жекелеген жылдары әсіресе жаз айларында тербеліс амплитудасы байқалды. Мұндай ауытқулар гидрологиялық ауытқулармен (құрғақшылық, қатты су тасқыны), сондай-ақ адам әрекетіне немесе жергілікті табиғи процестерге тәуелді болуы мүмкін эпизодтық ластануларға байланысты болуы мүмкін.



Сурет 4. Тихая өзенінің жер үсті суларының орташа жылдық рН мәндерінің графигі

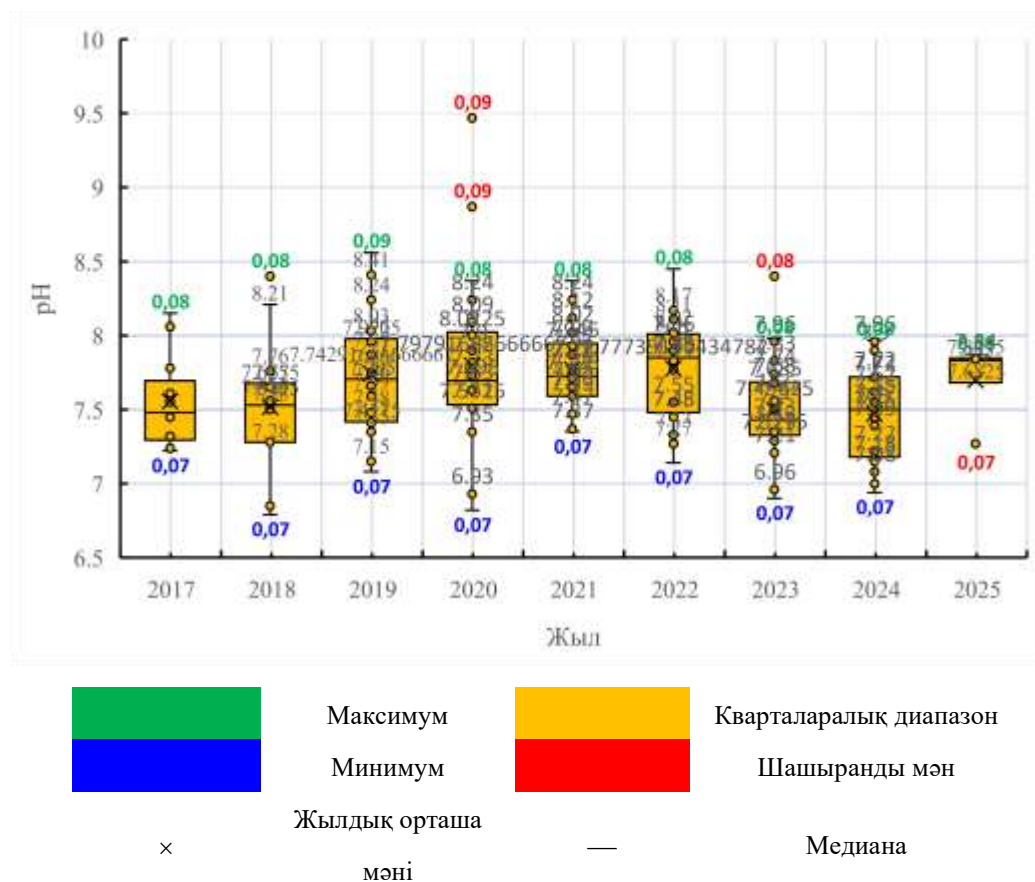
Жылдық өзгергіштікті неғұрлым егжей-тегжейлі түсіну және қалыптан тыс мәндерді анықтау үшін жылдық рН таралуларының ауқым (boxplot) диаграммасы (5-сурет) құрылды. Бұл орташа жылдық көрсеткіштерді ғана емес, сонымен қатар тербеліс

диапазонын, медианалық мәндерді, сондай-ақ әр жылдағы экстремалды мәндер мен шашыранды мәндердің болуын бағалауға мүмкіндік береді.

Жылдар бойынша рН мәндерінің ауқым диаграммасы негізінде Тихая өзенінің жер үсті суларының 2017...2025 жылдар аралығындағы қышқылдық-негіздік күйінің сипаттамалары талданды. Бүкіл кезеңдегі рН мәндері негізінен 6.79...9.47 дейін сәл сілтілі ортада болды.

Ең төменгі тіркелген рН мәні 6.79 құрап, ол 2018 жылдың маусымында байқалды. Оның себебі көктемгі ағынның әсерінен қышқыл сулардың түсуіне байланысты болуы мүмкін. Керісінше, максималды 9.47 құрайтын рН мәні 2020 жылдың қазан айында тіркелген. Бұл шашыранды мәндер маңызды фотосинтетикалық белсенділіктің (CO_2 сіңуінен пайда болатын) немесе антропогендік факторлардың (мысалы, сілтілі ағынды сулардың ағуы) әсерін көрсетеді.

Сутектік көрсеткіштің жыл бойынша таралуы параметрдің жалпы тұрақтылығын көрсетеді: барлық жылдардағы медианалық мәндер 7.41 (2024 ж.) мен 7.93 (2021 ж.) аралығында болды. Оның ішінде, ең үлкен квартиларалық амплитудасы (ауқымы) 2020 жылы байқалды, бұл сутектік көрсеткіштің жыл сайынғы өзгергіштігінің жоғарылауын көрсетеді. Сол жылы, рН – 6.93; 8.87; 9.47 мәндерін құрайтын «қораптан» тыс шашыранды мәндердің ең көп саны тіркелді, бұл осы кезеңдегі жағдайлардың тұрақсыздығын көрсетеді.



Сурет 5. Тихая өзені жер үсті суларының рН мәндерінің жылдар бойынша (2017...2025 жж.) ауқымының (boxplot) диаграммасы

2019...2021 жылдары құрғақ маусымның ұзақтығының артуы және нәтижесінде тасқын сулардың мөлшерінің төмендеуі сияқты климаттық факторлардың әсерін көрсететін медианалық мәндердің де, квартиларалық ауқымның да өсу тенденциясы байқалды.

Сутектік көрсеткіштің ең аз өзгергіштігі 2017 және 2018 жылдары байқалды, «қорап» ішіндегі деректер ауқымы 0.9 рН бірлігінен аз болды және шашыранды мәндер

тіркелген жоқ. Бұл осы жылдардағы тұрақты гидрологиялық жағдайды көрсетуі мүмкін. Әр жылдың орташа рН мәні 7.41 (2024 ж.) мен 7.96 (2021 ж.) аралығында болды. Көптеген боксплоттарда орташа мән медианалық мәннен асып түсті, бұл таралулардың оң асимметриясын көрсетеді.

2023 жылдан бастап мәндер ауқымы азайып, деректердің көп бөлігі жеке экстремумдарды (мысалы, 2023 жылдың қыркүйегіндегі рН 8.40 мәні) қоспағанда, 7.2...7.7 аралығында шоғырланғанын атап өтуге болады. Бұл гидрохимиялық жағдайлардың тұрақтануын немесе сынамаларды іріктеу мен талдау әдістемесінің стандартталуын көрсетуі мүмкін.

Жалпы алғанда, жүргізілген талдау Тихая өзенінің қарастырылып отырған кезеңнің көп бөлігінде қышқылдық-негіздік режимінің тұрақтылығымен қатар, қосымша гидрологиялық немесе антропогендік зерттеулерді қажет ететін сутектік көрсеткіштің күрт өзгеруінің жеке эпизодтарының болуымен сипатталады.

Жылдың әртүрлі кезеңдеріндегі жер үсті суларының қышқылдығының өзгеруі арасындағы байланысты анықтау үшін 2017...2025 жылдардағы көпжылдық мәліметтер негізінде рН орташа айлық мәндерінің корреляциялық матрицасы құрылды (6-сурет). Матрицаның әрбір ұяшығы айлардың жұп сандары арасындағы Пирсонның (r) корреляция коэффициентін көрсетеді, бұл өз кезегінде жылдың әртүрлі кезеңдеріндегі рН өзгергіштігін бағалауға мүмкіндік береді. Пирсонның корреляция коэффициенті -1-ден +1-ге дейін өзгереді. +1-ге жақын мәндер екі ай арасындағы күшті оң сызықтық байланысты көрсетеді, яғни бір айдағы рН өзгерісі екіншісіндегі өзгерістің ұқсас бағытымен бірге жүреді. 0-ге жақын мәндер сызықтық тәуелділіктің жоқтығын көрсетеді, ал теріс мәндер айлар арасындағы кері байланысты білдіреді.



Сурет 6. Тихая өзені жер үсті суларының 2017...2025 жылдар аралығындағы орташа айлық рН мәндерінің корреляциялық матрицасы

Талдау мезгіл бойынша көршілес айлар арасында, әсіресе жазғы және күзгі кезеңдерде айқын оң корреляцияның болуын көрсетті. Ең жоғары корреляция ақпан мен наурыз ($r = 0.90$), шілде мен тамыз ($r = 0.90$) және қараша мен желтоқсан ($r = 0.88$) арасында белгіленді, бұл гидрохимиялық режимнің тиісті маусымдардағы тұрақтылығын

көрсетеді. Корреляцияның орташа мәндері ($r=0.60\ldots 0.80$) су режимі мен биологиялық белсенділік қайта жаңғыру сатысына келетін көктем мен күз сияқты өтпелі кезеңдердегі айлар арасында байқалады.

Сонымен қатар, маусым бойынша алыс орналасқан айлар, мысалы, қаңтар мен шілде ($r=0.39$) арасында корреляция айтарлықтай төмендейді, бұл температура режимі, фотосинтез қарқындылығы, техногендік әсер ету дәрежесі және тасқын сулардың көлемі сияқты жылдың әртүрлі уақыттарында рН анықтайтын тәуелсіз факторлардың болуын көрсетеді. Нәтижелер рН өзгерістерінің айқын маусымдық циклдік сипатын растайды және су қоймасының күйін болжау және климаттық нормадан ауытқуларды [22] анықтау үшін ай сайынғы корреляцияларды пайдалану мүмкіндігін көрсетеді.

Жер үсті суларының маусымдық және жылдық рН ауытқуларын визуалды талдау үшін орташа айлық жылу картасы салынды (7-сурет). Бастапқы деректерге 2017...2025 жылдар аралығында әр айда тіркелген рН мәндері кірді. Бұл әдіс визуалды кластерлерге топтастырылған ұқсас кезеңдерді анықтауға мүмкіндік береді.

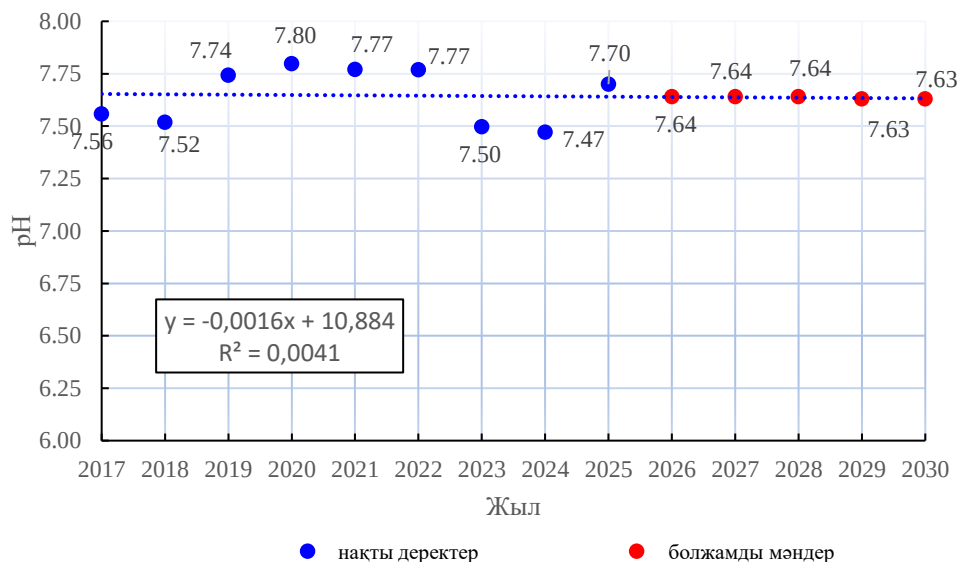
Жыл	рН												рН шкаласы
2017	7,45	7,61	7,78	7,22	7,32		7,55	8,06	8,15	7,48	7,24	7,27	9,0
2018	7,65	7,76	8,21	7,50	7,61	6,79	6,85	7,28	7,56	7,32	7,28	8,40	9,5
2019	8,35	8,22	8,16	7,88	7,12	7,41	7,99	7,41	7,44	7,93	7,42	7,63	8,5
2020	8,21	8,10	7,83	7,80	7,45	7,45	7,59	7,46	7,95	8,56	7,50	7,72	8,0
2021	7,74	8,01	7,62	7,87	7,44	7,95	7,63	7,82	7,84	8,00	7,92	7,43	7,5
2022	8,09	8,15	7,99	7,78	7,97	7,24	7,75	7,71	7,52	7,87	7,63	7,55	7,0
2023	7,32	7,90	7,76	7,62	6,93	7,41	7,36	7,52	7,98	7,23	7,35	7,60	6,5
2024	7,52	7,67	7,39	7,65	7,01	7,14	7,43	7,84	7,94	7,75	7,21	7,11	6,0
2025	7,55	7,86											5,5
Айлар	Қаңтар	Ақпан	Наурыз	Сәуір	Мамыр	Маусым	Шілде	Тамыз	Қыркүйек	Қазан	Қараша	Желтоқсан	

Сурет 7. Тихая өзені жер үсті суларының 2017...2025 жылдар аралығындағы орташа айлық рН мәндерінің жылу картасы

Ұсынылған жылу картасы Тихая өзенінің жер үсті суларындағы орташа айлық рН мәндерінің маусымдық және жылдық ауытқуларын көрсетеді. Талдаудан қыс-көктем айларында (қаңтар–наурыз), әсіресе 2019 және 2020 жылдары, рН мәндері 8.35 (қаңтар 2019 ж.), 8.22 (ақпан 2019 ж.), 8.55 (қыркүйек 2020 ж.) және 8.40 (желтоқсан 2018 ж.) жеткен кездегі рН жоғары мәндеріне тұрақты тенденциясы анықталынды. Жаз айлары (маусым–тамыз) сутектік көрсеткіштің айтарлықтай төмендеуін көрсетті. Аталған фактор су температурасының жоғарылауымен, биологиялық белсенділікпен және органикалық заттардың қарқынды ыдырауымен байланысты болуы мүмкін. Әсіресе рН төмен мәндері 2018 жылдың маусымында (6.79) және 2023 жылдың мамырында (6.93) тіркелді, бұл өз кезегінде басқа қалған жылдардан ерекшеленеді. Ең тұрақты және орташа рН мәндері күзгі кезеңде (қыркүйек–қараша) байқалды, мұнда орташа диапазон 7.2...8.0 аралығында болады. Бұл жылдың осы уақытында өзендегі биологиялық және физикалық-химиялық процестер арасындағы салыстырмалы тепе-теңдікті көрсетуі мүмкін.

Тихая өзенінің жер үсті суларындағы қышқылдық-негіздік балансының динамикасын бағалау үшін 2017...2025 жылдар аралығында сутектік көрсеткіштің орташа жылдық

мәнінің уақыт бойынша өзгеруін көрсететін сызықтық регрессиялық модель салынды (8-сурет). Көлбеу коэффициентінің теріс мәні жылына ~ 0.0016 бірлік жылдамдықпен рН деңгейінің төмендеу тенденциясын көрсетеді. Бұл су ортасының қышқыл жағдайларға біртіндеп ауысуына сәйкес келеді, бірақ өзгеру қарқыны өте аз болып келеді. Детерминация коэффициенті ($R^2=0.0041$) уақыт пен рН мәні арасындағы әлсіз сызықтық байланысты көрсетеді. Бұл уақытпен қатар сутектік көрсеткішке гидрологиялық режим, температура, ауытқуы, биогендік заттар, сондай-ақ ықтимал антропогендік әсер сияқты басқа факторлар да айтарлықтай әсер етуі мүмкін екенін көрсетеді.



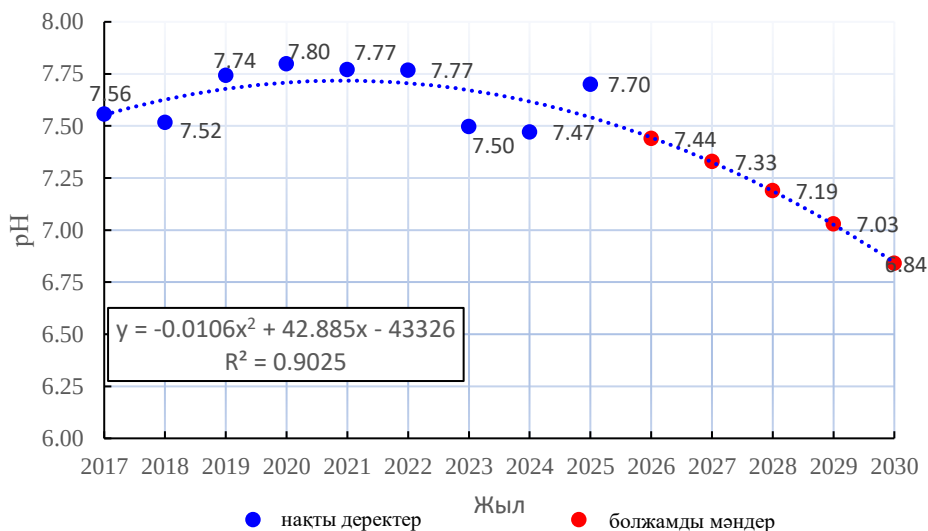
Сурет 8. Тихая өзені жер үсті суларының 2030 жылға дейін орташа жылдық рН мәндерінің болжамы (сызықтық модель)

Сызықтық регрессиялық модель негізінде 2030 жылға дейін Тихая өзенінің жер үсті суларының сутектік көрсеткішінің өзгеруі туралы болжам жасалды. Алынған тренд теңдеуіне сәйкес (7-сурет), ағымдағы тенденцияны сақтай отырып, 2030 жылға қарай рН мәні шамамен 7.63 болуы мүмкін. Осылайша, 2025 жылғы деңгейге қатысты сутектік көрсеткіштің болжамды төмендеуі (~ 7.70) 5 жыл ішінде шамамен 0.07 бірлікті құрайды, бұл қышқылдықтың өте аз өзгеруін көрсетеді. Графикалық тұрғыдан алғанда, тренд өте аз байқалатын біркелкі төмендеу сипатын сақтайды, бірақ сутектік көрсеткіштің шамалы ауытқулары да су экожүйесінде, әсіресе климаттық және антропогендік әсердің күшеюі жағдайында ауыспалы реакцияларды тудыруы мүмкін. Осылайша, сызықтық регрессиялық модельді трендті бағалаудың негізгі құралы ретінде пайдалануға болады, бірақ дәлірек болжау үшін гидрологиялық, климаттық және техногендік факторларды қамтитын күрделі модельдерді қолдану қажет.

Тихая өзенінің жер үсті суларындағы қышқылдық-негіздік балансының өзгеру сипатын нақтылау үшін 2017...2025 жылдар кезеңіндегі орташа жылдық рН мәндерінің негізінде екінші ретті полиномиальды регрессиялық модель (9-сурет) салынды. Аталған модель жалпы трендті ғана емес, одан сызықтық емес ауытқуларды да анықтауға мүмкіндік береді, бұл әсіресе күрделі экологиялық процестерді бағалау үшін маңызды. Талдау көрсеткендей, рН ең үлкен мәні 2020 жылы байқалып, ортаның сілтілі реакциясына сәйкес келетін 7.80 мәнін құрады. Алайда, 2021 жылдан бастап сутегі көрсеткішінің тұрақты төмендеуі тіркелді. Болжамға сәйкес, аздап қышқыл ортаға көшуді көрсететін 2026 жылы рН мәні – 7.44, ал 2030 жылға қарай 6.84-ке жетеді.

Көпмүшелік модель су ортасының қышқылдану процестерінің қарқындылығын болжай отырып, сызықтық трендпен салыстырғанда сутектік көрсеткіштің айқын

төмендеуін көрсетеді. Бұл антропогендік жүктеменің жоғарылауына, гидрологиялық жағдайлардың өзгеруіне немесе су қоймасының буферлік қасиеттерінің бұзылуына байланысты болуы мүмкін. Алынған нәтижелер су сапасының ықтимал нашарлауын көрсетеді, бұл өзгеру көздерін қосымша зерттеуді, сондай-ақ өзен экожүйесіне теріс әсердің алдын алу мақсатында рН көрсеткіштерін тұрақты бақылауды талап етеді.



Сурет 9. Тихая өзені жер үсті суларының 2030 жылға дейін орташа жылдық рН мәндерінің болжамы (полиномиальды модель)

4. ҚОРЫТЫНДЫ

Тихая өзеніндегі рН мәндерінің көпжылдық динамикасы қышқылдық-негіздік режимінің жалпы тұрақтылығын көрсетті. Орташа жылдық мәндерге негізделген сызықтық регрессиялық модель статистикалық маңызды тенденцияны анықтаған жоқ, бұл зерттелетін кезеңде арнайы бағытталған қышқылдану немесе сілтіленудің жоқтығын көрсетеді. Регрессия сызығының көлбеу коэффициенті нөлге жақын, ал детерминация коэффициенті (R^2) төмен болып қалады, бұл ұзақ мерзімді өзгерістердің аз болғанын растайды. Дегенмен, жекелеген жылдардағы жергілікті ауытқулар (мысалы, 2020 жылы жоғары мәндердің күрт өсуі немесе 2019 жылдың жаз айларындағы диапазонның үлкен аралығы) табиғи ауытқуларға немесе антропогендік әсерге байланысты қысқа мерзімді өзгерістердің белгісі болуы мүмкін. Болашақта олардың қайталануы жүйенің тұрақтылығына әсер етуі мүмкін.

Ағымдағы жағдайларды сақтай отырып келесі қорытындыларды атап өтуге болады: жер үсті суларының рН мәні шамалы сілтілі диапазонда қалады деп күтуге болады (7.2...8.1); көктемде төмендеп, жаз–күзде жоғарылайтын маусымдық ауытқулар сақталынады; экстремалды мәндер сирек болып қалады, бірақ климаттық ауытқулар (жылу, құрғақшылық) немесе ағынды сулардың төгілуі жағдайында болуы мүмкін. Осылайша, ағымдағы деректер негізінде қышқылдық-негіздік режимінің елеулі өзгерістері болжанбайды, бірақ та дәлірек бағалау үшін мониторингті жалғастыру қажеттігін атап өтуге болады.

Алынған нәтижелерді экологиялық қадағалау органдары мен су шаруашылығы ұйымдары шағын су ағындарының жай-күйін бағалау, тәуекел аймақтарын нақтылау және профилактикалық іс-шараларды әзірлеу үшін пайдалана алады. Атап айтқанда, рН қысқа мерзімді ауытқуларының анықталған маусымдық ерекшеліктері мен сипаты сынамааларды алуды жоспарлау, ағынды сулардың әсерін бағалау және өзгермелі климат жағдайында суды басқару кезінде бағдар бола алады.

ДЕРЕКТЕРДІҢ ҚОЛ ЖЕТІМДІЛІГІ

Осы зерттеуде пайдаланылған деректерді авторлар «Қазгидромет» РМК ашық деректер базасынан алды.

АВТОРЛАРДЫҢ ҚОСҚАН ҮЛЕСІ

Тұжырымдамалау – НВС; деректерді басқару – НВС; Ресми талдау – НВС, ГKD, ОАП; Әдістеме – НВС, ГKD, ОАП; Визуализация - НВС, ОАП; Бастапқы жобаны жазу - НВС, ГKD, ОАП; Шолу жазу және редакциялау – НВС, ГKD, ОАП.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ

Бұл мақала BR24992854 «Шығыс Қазақстан облысының тау-кен металлургия саласының тұрақты дамуын қамтамасыз ету үшін бәсекеге қабілетті ғылыми-негізделген технологияларды әзірлеу және іске асыру» бағдарламалық-нысаналы қаржыландыру жобасы бойынша орындалды.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Hamid A., Bhat S.U., Jehangir A. (2020) Local determinants influencing stream water quality. *Applied Water Science*, Vol. 10, pp. 24. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1043-4>
2. Sarkar S., Gill S.S., Das Gupta G., Verma S.K. (2022) Water toxicants: a comprehension on their health concerns, detection, and remediation. *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 29, pp. 53934–53953. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20384-x>
3. van Vliet MTH, Thorslund J., Strokal M., Hofstra N., Flörke M., Ehalt Macedo H., Nkwasa A., Tang T., Kaushal S.S., Kumar R., Griensven A.v., Bouwman L., Mosley L.M. (2023) Global river water quality under climate change and hydroclimatic extremes. *Nature Reviews Earth Environment*, Vol. 4, pp. 687–702. <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00472-3>
4. Mohamad S., Liew H.J., Zainuddin R.A., Rahmah S., Waiho K., Ghaffar M.A., Nhan H.T., Loh J.-Y., Lim L.-S., Chang Y., Liang L., De Boeck G. (2021) High environmental temperature and low pH stress alter the gill phenotypic plasticity of Hoven's carp *Leptobarbus hoevenii*. *Journal of Fish Biology*, Vol. 99, pp. 206–218. <https://doi.org/10.1111/jfb.14712>
5. Liew H.J., Rahmah S., Tang P.W., Waiho K., Fazhan H., Rasdi N.W., Hamin S.I.A., Mazelan S., Muda S., Lim L.S., Chen Y.-M., Chang Y.M., Liang L.Q., Ghaffaret M.A. (2022) Low water pH depressed growth and early development of giant freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii* larvae. *Heliyon*, Vol. 8, p. e09989. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09989>
6. Swain S., Sawant P.B., Chadha N.K., Chhandaprajnadarsini E.M., Katore M.B. (2020) Significance of water pH and hardness on fish biological processes: A review. *International Journal of Chemical Studies*, Vol. 8, pp. 330–337. <https://doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i4e.9710>
7. Trach Y., Trach R., Kuznietsov P., Pryshchepa A., Biedunkova O., Kiersnowska A., Statnyk I. (2024) Predicting the Influence of Ammonium Toxicity Levels in Water Using Fuzzy Logic and ANN Models. *Sustainability*, Vol. 16, p. 5835. <https://doi.org/10.3390/su16145835>
8. Zhang T., Zhang C., Du S., Zhang Z., Lu W., Su P., Jiao Y., Zhaj Y. (2023) A review: The formation, prevention, and remediation of acid mine drainage. *Environ Sci Pollut Research*, Vol. 30, p.111871–111890. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-30220-5>
9. Sarmiento A.M., Grande J.A., Luís A.T., Dávila J.M., Fortes J.C., Santisteban M., Curiel J., de la Torre M.L., da Silva E.F. (2018). Negative pH values in an open-air radical environment affected by acid mine drainage. Characterization and proposal of a hydrogeochemical model, *Science of The Total Environment*, Vol. 644, pp. 1244-1253. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.381>
10. Luo C., Routh J., Dario M., Sarkar S., Wei L., Luo D., Liu Y. (2020) Distribution and mobilization of heavy metals at an acid mine drainage affected region in South China, a post-remediation study. *Science of The Total Environment*, Vol. 724, p. 138122. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138122>
11. Roy G., Valsala R. (2024) Impact of capping on pyrite oxidation ion transport in unsaturated mine waste pile: A hydrogeochemical modeling study. *Model. Earth Syst. Environ.*, Vol. 10, pp. 3777–3788. <https://doi.org/10.1007/s40808-024-01991-8>
12. Zhang W., Long J., Zhang X., Shen W., Wei Z. (2020) Pollution and Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals in the Soil and Sediment around the HTH Tailings Pond, Northeastern China. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, Vol. 17, p. 7072. <https://doi.org/10.3390/ijerph17197072>
13. Wolkersdorfer C., Mugov E., Dagad V.S., Charvet P., Vituleless J. (2022) Effects of Mining on Surface Water-Case Studies. *Encycl. Inland Waters*, Vol. 4, pp. 170–188
14. Macklin M.G., Thomas C.J., Mudbhatai A., Brewer P.A., Hudson-Edwards K.A., Lewin J., Scussolini P., Eilander D., Lechner A., Owen J., Bird G., Kemp D., Mangalaa K.R. (2023) Impacts of metal mining on river systems: a global assessment. *Science*, Vol. 381, pp. 1345-1350. <https://doi.org/10.1126/science.adg6704>
15. Piwowarska D., Kiedrzyńska E., Jaszczyszyn, K. (2024) A global perspective on the nature and fate of heavy metals polluting water ecosystems, and their impact and remediation. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol. 54(19), pp. 1436–1458. <https://doi.org/10.1080/10643389.2024.2317112>
16. WHO. Guidelines for Drinking-Water Quality, 4th ed.; Incorporating first addendum; World Health Organization: Geneva, Switzerland, 2017, Available online: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>
17. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). National Primary Drinking Water Regulations, 2022, <https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/national-primary-drinking-water-regulations>
18. Directive 2008/32/EC of the European Parliament and of the Council of 11 March 2008 Amending Directive 2000/60/EC Establishing a Framework for Community action in the field of water policy, as regards the implementing powers conferred on the Commission. 2008, pp. 60–61. Available online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=celex:32008L0032>
19. Razzak S.A., Faruque M.O., Alsheikh Z., Alsheikhmohamad L., Alkuroud D., Alfayez A., Hossain S.Z., Hossain M.M. A comprehensive review on conventional and biological-driven heavy metals removal from industrial wastewater, *Environmental Advances*, 2022, vol. 7, p. 100168. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100168>
20. <https://www.kazhydromet.kz/ecology/ezhemesvachnyy-informacionnyy-byulleten-o-sostoyanii-okruzhavushchey-sredy>
21. Zhalmagambetova U., Assanov D., Neftissov A., Biloshchyskyi A., Radelyuk I. Implications of Water Quality Index and Multivariate Statistics for Improved Environmental Regulation in the Irtysh River Basin (Kazakhstan). *Water*, 2024, Vol. 16, p. 2203. <https://doi.org/10.3390/w16152203>

22. Seraya N., Daumova G., Petrova O., Garcia-Mira R., Polyakova A. Ecological Status of the Small Rivers of the East Kazakhstan Region. *Sustainability*, 2025, Vol. 17, p. 6525. <https://doi.org/10.3390/su17146525>

REFERENCES

1. Hamid A., Bhat S.U., Jehangir A. (2020) Local determinants influencing stream water quality. *Applied Water Science*, Vol. 10, pp. 24. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1043-4>
2. Sarkar S., Gill S.S., Das Gupta G., Verma S.K. (2022) Water toxicants: a comprehension on their health concerns, detection, and remediation. *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 29, pp. 53934–53953. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20384-x>
3. van Vliet MTH, Thorslund J., Stokol M., Hofstra N., Flörke M., Ehalt Macedo H., Nkwasa A., Tang T., Kaushal S.S., Kumar R., Griensven A.v., Bouwman L., Mosley L.M. (2023) Global river water quality under climate change and hydroclimatic extremes. *Nature Reviews Earth Environment*, Vol. 4, pp. 687–702. <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00472-3>
4. Mohamad S., Liew H.J., Zainuddin R.A., Rahmah S., Waiho K., Ghaffar M.A., Nhan H.T., Loh J.-Y., Lim L.-S., Chang Y., Liang L., De Boeck G. (2021) High environmental temperature and low pH stress alter the gill phenotypic plasticity of Hoven's carp *Leptobarbus hoevenii*. *Journal of Fish Biology*, Vol. 99, pp. 206–218. <https://doi.org/10.1111/jfb.14712>
5. Liew H.J., Rahmah S., Tang P.W., Waiho K., Fazhan H., Rasdi N.W., Hamin S.I.A., Mazelan S., Muda S., Lim L.S., Chen Y.-M., Chang Y.M., Liang L.Q., Ghaffaret M.A. (2022) Low water pH depressed growth and early development of giant freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii* larvae. *Heliyon*, Vol. 8, p. e09989. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09989>
6. Swain S., Sawant P.B., Chadha N.K., Chhandaprajnadarsini E.M., Katare M.B. (2020) Significance of water pH and hardness on fish biological processes: A review. *International Journal of Chemical Studies*, Vol. 8, pp. 330–337. <https://doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i4e.9710>
7. Trach Y., Trach R., Kuznietsov P., Pryshchepa A., Biedunkova O., Kiersnowska A., Statnyk I. (2024) Predicting the Influence of Ammonium Toxicity Levels in Water Using Fuzzy Logic and ANN Models. *Sustainability*, Vol. 16, p. 5835. <https://doi.org/10.3390/su16145835>
8. Zhang T., Zhang C., Du S., Zhang Z., Lu W., Su P., Jiao Y., Zhaj Y. (2023) A review: The formation, prevention, and remediation of acid mine drainage. *Environ Sci Pollut Research*, Vol. 30, p. 111871–111890. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-30220-5>
9. Sarmiento A.M., Grande J.A., Luís A.T., Dávila J.M., Fortes J.C., Santisteban M., Curiel J., de la Torre M.L., da Silva E.F. (2018) Negative pH values in an open-air radical environment affected by acid mine drainage. Characterization and proposal of a hydrogeochemical model, *Science of The Total Environment*, Vol. 644, pp. 1244–1253. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.381>
10. Luo C., Routh J., Dario M., Sarkar S., Wei L., Luo D., Liu Y. (2020) Distribution and mobilization of heavy metals at an acid mine drainage affected region in South China, a post-remediation study. *Science of The Total Environment*, Vol. 724, p. 138122. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138122>
11. Roy G., Valsala R., (2024) Impact of capping on pyrite oxidation ion transport in unsaturated mine waste pile: A hydrogeochemical modeling study. *Model. Earth Syst. Environ.* Vol. 10, pp. 3777–3788. <https://doi.org/10.1007/s40808-024-01991-8>
12. Zhang W., Long J., Zhang X., Shen W., Wei Z. (2020) Pollution and Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals in the Soil and Sediment around the HTM Tailings Pond, Northeastern China. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, Vol. 17, p. 7072. <https://doi.org/10.3390/ijerph17197072>
13. Wolkersdorfer C., Mugov E., Dagad V.S., Charvet P., Vituleless J. (2022) Effects of Mining on Surface Water-Case Studies. *Encycl. Inland Waters*, Vol. 4, pp. 170–188
14. Macklin M.G., Thomas C.J., Mudbhatai A., Brewer P.A., Hudson-Edwards K.A., Lewin J., Scussolini P., Eilander D., Lechner A., Owen J., Bird G., Kemp D., Mangalaa K.R. (2023) Impacts of metal mining on river systems: a global assessment. *Science*, Vol. 381, pp. 1345–1350. <https://doi.org/10.1126/science.adg6704>
15. Piwowarska D., Kiedrzyńska E., Jaszczyszyn, K. (2024) A global perspective on the nature and fate of heavy metals polluting water ecosystems, and their impact and remediation. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol. 54(19), pp. 1436–1458. <https://doi.org/10.1080/10643389.2024.2317112>
16. WHO. Guidelines for Drinking-Water Quality, 4th ed.; Incorporating first addendum; World Health Organization: Geneva, Switzerland, 2017, Available online: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>
17. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). National Primary Drinking Water Regulations, 2022, <https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/national-primary-drinking-water-regulations>
18. Directive 2008/32/EC of the European Parliament and of the Council of 11 March 2008 Amending Directive 2000/60/EC Establishing a Framework for Community action in the field of water policy, as regards the implementing powers conferred on the Commission. 2008, pp. 60–61. Available online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=celex:32008L0032>
19. Razzak S.A., Faruque M.O., Alsheikh Z., Alsheikhmohamad L., Alkuroud D., Alfayez A., Hossain S.Z., Hossain M.M. (2022) A comprehensive review on conventional and biological-driven heavy metals removal from industrial wastewater, *Environmental Advances*, vol. 7, p. 100168. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100168>
20. <https://www.kazhydromet.kz/ecology/ezhemesyachnyy-informacionnyy-byulleten-o-sostoyanii-okruzhayushey-sredy> [in Kazakh]
21. Zhalmagambetova U., Assanov D., Neftissov A., Biloshchytskyi A., Radelyuk I. Implications of Water Quality Index and Multivariate Statistics for Improved Environmental Regulation in the Irtysh River Basin (Kazakhstan). *Water*, 2024, Vol. 16, p. 2203. <https://doi.org/10.3390/w16152203>
22. Seraya N., Daumova G., Petrova O., Garcia-Mira R., Polyakova A. Ecological Status of the Small Rivers of the East Kazakhstan Region. *Sustainability*, 2025, Vol. 17, p. 6525. <https://doi.org/10.3390/su17146525>

ДИНАМИКА КИСЛОТНО-ЩЕЛОЧНОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД РЕКИ ТИХАЯ

Наталья В. Серая к.х.н., профессор, Гульжан К. Даумова* к.т.н., профессор, Ольга А. Петрова к.т.н.,
ассоциированный профессор

Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан; NSeraya@edu.ektu.kz,
GDaumova@edu.ektu.kz, OPetrova@edu.ektu.kz

Автор корреспонденции: Гульжан К. Даумова, GDaumova@edu.ektu.kz

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

pH,
поверхностные воды,
река Тихая,
Восточно-Казахстанская
область,
сезонная динамика,
многолетние изменения,
мониторинг качества воды,
тепловая карта,
кластеризация.

По статье:

Получено: 29.04.2025

Пересмотрено: 08.08.2025

Принято: 23.09.2025

Опубликовано: 01.10.2025

АБСТРАКТ

В настоящей работе представлен расширенный анализ многолетней динамики показателя pH в поверхностных водах реки Тихая (Восточно-Казахстанская область) за период 2017...2025 гг. Исследование охватывает как среднемесячные и среднегодовые значения, так и внутрисезонные и межгодовые колебания pH. Применены статистические и графические методы визуализации, включая тепловое картирование, диаграммы размаха и линейную регрессионную аппроксимацию. Также проведён трендовый анализ с использованием линейных моделей регрессии и построена тепловая карта кластеризации по месяцам. Установлено, что pH вод реки колеблется в пределах слабощелочной реакции, без устойчивых признаков закисления. Вместе с тем выявлены отдельные аномалии, особенно в летний период, обусловленные природными и антропогенными факторами. Представленные данные свидетельствуют о высокой буферной способности водоёма и его способности к экологической саморегуляции.

DYNAMICS OF ACID-BASE STATE OF SURFACE WATERS OF THE TIKHAYA RIVER

Natalya Seraya Candidate of Chemical Sciences, Professor, Gulzhan Daumova* Candidate of Technical Sciences,
Professor, Olga Petrova Candidate of Technical Sciences, Associate professor

D. Serikbaev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; NSeraya@edu.ektu.kz, GDaumova@edu.ektu.kz,
OPetrova@edu.ektu.kz

Corresponding author: Gulzhan Daumova, GDaumova@edu.ektu.kz

KEY WORDS

hydrogen index (pH),
surface waters,
Tikhaya River,
East Kazakhstan region,
seasonal dynamics,
long-term changes,
water quality monitoring,
heat map,
clusterization.

About article:

Received: 29.04.2025

Revised: 08.08.2025

Accepted: 23.09.2025

Published: 01.10.2025

ABSTRACT

This paper presents an extended analysis of the long-term dynamics of the pH index in the surface waters of the Tikhaya River (East Kazakhstan Region) for the period 2017...2025. The study covers both monthly and annual averages, as well as intra-seasonal and interannual pH fluctuations. Statistical and graphical visualization methods have been applied, including thermal mapping, span diagrams, and linear regression approximation. Trend analysis was also performed using linear regression models, and a heat map of clustering by month was constructed. It was found that the pH of the river waters fluctuates within the limits of a slightly alkaline reaction, without stable signs of acidification. At the same time, some anomalies have been identified, especially in summer, due to natural and anthropogenic factors. The presented data indicate a high buffering capacity of the reservoir and its ability for ecological self-regulation.

Баспагердің ескертпесі: барлық жарияланымдардағы мәлімдемелер, пікірлер мен деректер «Гидрометеорология и экология» журналына және/немесе редакторға(ларға) емес, тек авторға(ларға) тиесілі.