

Еуразиялық агротехникалық журнал = Евразийский агротехнический журнал. – Астана: С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, 2026. -№ 1 (129). - P.213-229. - ISSN 3135-243X, 3135-2448

doi.org/ 10.51452/eaj.2026.1(129).2156

ЭОЖ 631.4:546.296:504.5:556.3

Шолу мақаласы

Торийдің агроэкожүйелердегі рөлі: түсу көздері, «топырақ-су» жүйесіндегі миграциясы және тәуекелдерді төмендетудің сорбциялық тәсілдері

Ғұбайдуллин Н.Н.¹, Алсар Ж.Т.², Гаджимурадова А.М.¹, Исмуканова Г.Ж.¹
Инсепов З.А.^{1,3}, Мансуров З.А.⁴

¹С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана, Қазақстан

²ЧУ Nazarbayev University Research Administration, Nazarbayev University, Астана, Қазақстан

³Ядролық инженерия мектебі, Purdue University, West Lafayette, АҚШ

⁴Жану мәселелері институты, Алматы, Қазақстан

Корреспондент-автор: Исмуканова Г.: zh.ismukanova@gmail.com

Бірлескен авторлар: (1: HF) nur-tai.kz@mail.ru; (2: ЖА) zhanna.alsar@nu.edu.kz

(3: АГ) aisarat.gajimuradova@nu.edu.kz; (4: ЗИ) z.insepov@nu.edu.kz

(5: ЗМ) zmansurov@kaznu.kz

Қабылданған күні: 24.02.2026 **Қабылданды:** 18.03.2026 **Жарияланды:** 30.03.2026

Түйін

Алғышарттар мен мақсат. Торий (Th) Th-232 негізіндегі отын циклдерімен байланысты стратегиялық элемент ретінде қарастырылғанымен, техногендік көздер арқылы су мен топыраққа түскен жағдайда агроэкожүйелер үшін ұзақ мерзімді экологиялық және санитарлық тәуекелдер тудыруы мүмкін. Осы шолудың мақсаты — агроландшафттардағы торийдің түсу жолдары мен «топырақ-су» жүйесіндегі миграциясын айқындайтын факторларды жүйелеу, сондай-ақ тәуекелдерді төмендетуге бағытталған сорбциялық және кешенді ремедиациялық шешімдерді жинақтау.

Материалдар мен әдістер. Зерттеу құрылымдалған аналитикалық шолу ретінде жүргізілді. Әдебиеттер Scopus, Web of Science, ScienceDirect және Google Scholar дерекқорларынан іріктеліп, 1990-2025 жж. жарияланымдар қамтылды. Іздеу Th(IV), торий геохимиясы, «топырақ-су» жүйесіндегі миграция, кешен түзілу және сорбция/ремедиацияға қатысты терминдер бойынша жүргізілді. Экологиялық мазмұны бар рецензияланған дереккөздер ғана енгізіліп, тек энергетикалық-инженерлік бағыттағы жұмыстар алып тасталды.

Нәтижелер. Торий су ортасында көбіне бөлшектік және коллоидтық фракциялармен байланысады, ал оның қозғалғыштығы рН, еріген органикалық заттар (DOC) және карбонаттылыққа тәуелді. DOC пен карбонаттылық еритін кешендердің түзілуін арттырып, коллоидтарды тұрақтандырып, торийдің дренаждық және жер асты суларына тасымалдануын күшейте алады. Агроландшафттарда торийдің мобилизациясы қышқыл органика, қалқыма бөлшектердің болуы және маусымдық гидрохимиялық ауытқулармен байланысты. Тәуекелді төмендету үшін коагуляция, мембраналық үдерістер, ионалмасу және адсорбция қарастырылады, ал қолданбалы тұрғыдан диатомит, бентонит, биосорбенттер және композиттер перспективалы. Сорбенттер шартты түрде минералдық және табиғи, биокөмірлі, сондай-ақ жоғары селективті функционалдық материалдар болып жіктеледі.

Қорытынды. Агроэкожүйелерде торийге байланысты тәуекелдерді азайту рН, DOC, тұздану және қалқыма бөлшектер бойынша мониторингті сорбция және иммобилизация шараларымен ұштастыруға негізделеді. Су үшін тиімді тәсіл – алдын ала коагуляциялау мен тұндырудан кейін сорбциялық қосымша тазарту (ал қажет болған жағдайда ионалмасу немесе мембраналық

үдерістерді қолдану). Топырақта басым бағыт – торийді үстіңгі қабатта бекітетін барьерлік қоспаларды (табиғи сорбенттер, биокөмір, Fe-оксидтер, фосфаттарды) пайдалану. Сонымен қатар, екінші реттік қалдықтарды қауіпсіз басқару міндетті.

Кілт сөздер: торий (Th^{4+}); радионуклидтер; торийдің геохимиясы; сорбция; су мен топырақты тазарту; экологиялық қауіпсіздік.

Кіріспе

Соңғы онжылдықта торий тек перспективалы отын циклдерінің ықтимал құрамдас бөлігі ретінде ғана емес, сонымен қатар табиғи зат айналымдарына тартылған жағдайда ұзақ мерзімді экологиялық тәуекелдер қалыптастыра алатын элемент ретінде де назар аудартуда [1]. Торийге қатысты ғылыми-технологиялық қызығушылықтың артуы зерттеулердің, жобалардың және инфрақұрылымның кеңеюімен қатар жүреді, бұл табиғи және шаруашылық мақсатта пайдаланылатын аумақтар, соның ішінде ауылшаруашылығы ландшафттары үшін ықтимал салдарларды бағалаудың өзектілігін күшейтеді [2-6].

Агроэкожүйелерде торий, ең алдымен, топырақсу жүйесіне табиғи және антропогендік көздерден түсетін ілеспе радионуклид ретінде қарастырылады. Табиғи жағдайда Th(IV) қосылыстары, әдетте, төмен қозғалғыштықпен сипатталады, алайда ортадағы гидрохимиялық параметрлердің, әсіресе рН, минералдану деңгейі және кешен түзуші заттардың құрамы өзгерген кезде торий еритін және коллоидтық тұрғыдан анағұрлым қозғалмалы формаларға ауысып, оның беткейлік ағынмен және инфильтрация арқылы тасымалдану ықтималдығын арттыруы мүмкін [7]. Далалық бақылаулар мен өңірлік зерттеулер қоршаған ортаның әртүрлі компоненттерінде торийдің бар екенін көрсеткенімен, су жиналу алабы және агроландшафт деңгейіндегі жүйелі бағалаулар әлі де шектеулі [8, 10]. Ауыл шаруашылығы үшін торийдің антропогендік түсу арналары ерекше мәнге ие; олардың ішінде сирекжер элементтері кендерін өндіру және өңдеу, металлургиялық үдерістер, сондай-ақ ұзақ мерзімді қолдану барысында топырақ жамылғысына қоспа радионуклидтерді енгізуі мүмкін фосфатты тыңайтқыштарды пайдалану атап көрсетіледі [11]. Жергілікті техногендік жүктемелердің қалыптасуына уранды ториймен алмастыруға және тиісті технологияларды дамытуға байланысты бағдарламалар мен тәжірибелер де қосымша үлес қосуы мүмкін [12].

Агроэкожүйелер үшін тәуекелдерді төмендету топырақсу жүйесінде торийдің миграция механизмдерін және оның бекітілуін немесе қайта мобилизациялануын айқындайтын факторларды түсінуді, сондай-ақ оның қозғалмалы формаларын басқарудың қолжетімді әдістерін әзірлеуді талап етеді. Осы тұрғыда табиғи материалдарды және олардың модификацияларын қолданатын сорбциялық тәсілдер ағынды және дренаж суының тазалануы, сондай-ақ топырақта торийді иммобилизациялау үшін практикалық қызығушылық тудырады. Осы шолу агроландшафттарға торийдің түсу көздерін, оның топырақсу жүйесіндегі мінез-құлқының негізгі заңдылықтарын және экологиялық әрі санитарлық тәуекелдерді азайтуға бағытталған сорбциялық шешімдерді жүйелейді [13].

Материалдар мен әдістер

Зерттеу торийдің экологиялық мінез-құлқын және су мен топырақ жүйелерінде радиациялық тәуекелдерді төмендету тәсілдерін қарастыратын құрылымдалған аналитикалық шолу форматында орындалды. Әдебиеттерді іздеу Scopus, Web of Science, ScienceDirect және Google Scholar дерекқорларында жүргізілді; талдау 1990-2025 жылдар аралығында жарияланған еңбектерді қамтыды. Іздеу сұраулары Th(IV) , торийдің геохимиясы мен изотоптары, радиоэкология, «топырақсу» жүйесіндегі миграция, гидролиз және кешен түзу үдерістері, сондай-ақ сорбция және ремедиация (диатомит, бентонит, биосорбенттер, наноматериалдар) бойынша терминдердің әртүрлі комбинацияларынан тұрды [14].

Шолуға торийдің түсу көздері, оның суда және топырақта болатын түрлері, сондай-ақ Th(IV) -ті иммобилизациялау немесе жою әдістері туралы деректер келтірілген рецензияланған мақалалар, шолулар, монографиялар және халықаралық ұйымдардың есептері енгізілді.

Экологиялық контексті жоқ, тек торий энергетикасының инженерлік аспектілеріне арналған жұмыстар талдаудан шығарылды [15].

Тандалған дереккөздерден су жүйелеріндегі Th(IV) түрлері, топырақтағы қозғалғыштық факторлары және сорбция механизмдері туралы мәліметтер алынды. Ақпарат тақырыптық блоктар бойынша жүйеленіп, қажет болған жағдайда жинақтаушы кестелер түрінде ұсынылды. Нәтижелер нарративті синтез әдісімен қорытындыланды; зерттеулердің әдістемелері мен жағдайларының айтарлықтай әркелкі болуына байланысты мета-талдау жүргізілген жоқ.

Нәтижелер және талқылау

Торийдің жаһандық таралуы және геохимиясы

Торий (Th) табиғи актиноидтарға ($Z = 90$) жатады және табиғи радиоактивтілігі салыстырмалы түрде әлсіз элемент болып сипатталады. Элемент 1828 жылы *Й.Я. Берцелиус* тарапынан анықталған. Литосферада торий кең таралған және литофильді элементтер қатарына кіреді, сондықтан ол негізінен жердің силикатты қабығында жинақталады. Құрлықтық қыртыс үшін оның орташа мөлшері шамамен 610 ppm (мг/кг) деңгейінде бағаланады, яғни торий орта есеппен уранға қарағанда жиірек кездеседі. Топырақта да типтік фондық мәндер әдетте бірліктерден ондаған ppm аралығында болады және аналық жыныстардың құрамына, сондай-ақ гранулометриялық (механикалық) құрамына байланысты айтарлықтай өзгереді. Осындай кең таралуына қарамастан, торийдің геохимиясы, миграциясы және биологиялық әсерлері бойынша жарияланымдар массиві уранға қарағанда едәуір аз; бұл тарихи тұрғыдан уранның қолданбалы рөлінің ертерек әрі ауқымды қалыптасуымен байланысты [16].

Уранмен салыстыру радиоэкология және қолданбалы міндеттер үшін маңызды, өйткені екі элемент те табиғи ортада кездеседі және техногендік миграция үдерістеріне тартылуы мүмкін. Алайда уран ядролық отын циклының негізгі элементі болып қала береді, ал атом энергетикасы жаһандық электр энергиясын өндірудің шамамен 910% қамтамасыз етеді; әлемдік реакторлық парк жыл сайын табиғи уранның шамамен 67 мың тн (U-ға шаққанда) қажет етеді. Бұл су мен топырақтағы миграцияны бағалау, мониторинг және тазарту технологияларын қоса алғанда, уран тақырыбы бойынша зерттеулер көлемінің жоғары болуын қолдайды [17].

Соңғы жылдары торийге қызығушылық тек энергетикалық контекстпен шектелмей, оның биогеохимиялық үдерістерге қатысуы және (шектеулі дәрежеде болса да) «топырақөсімдік» тізбегі бойынша тасымалдану мүмкіндігі тұрғысынан да кеңейуде. Агроэкожүйелер үшін торийдің табиғи су мен топырақта, әдетте, төмен қозғалғыш екені принципті: тотығу жағдайларында Th(IV) басым болады, оған күшті гидролиз, оксидті-гидроксидті формалардың төмен ерігіштігі және саз минералдарына, FeMn оксидтеріне және органикалық затқа жоғары сорбциялық бейімділік тән. Сондықтан торийдің елеулі бөлігі «шын мәніндегі» еріген күйде емес, керісінше қалқыма бөлшектер мен коллоидтар құрамында миграциялап, дондық шөгінділерде және топырақ горизонттарында жинақталады; оның қозғалғыштығы рН өзгергенде және кешен түзілуі күшейгенде (кейбір бейорганикалық лигандтармен және еріген органикалық заттармен қоса) артуы мүмкін [18].

Жоғары зарядталған литофильді элемент ретінде торий геохимиялық мінез-құлқы бойынша жоғары өрістік элементтерге және сирекжер элементтерінің бірқатарына жақын, бұл оның тұрақты минерал-тасымалдаушылармен және техногендік концентраттармен «байланыстылығын» көрсетеді. Қазіргі шолулар торий минералдануының сирекжер жүйелерімен байланысын және фосфатты минералдардың тұрақты кристал торларында Th-тың сақталуын атап өтеді; бұл сирекжер элементтері (СЖЭ) шикізатын өндіру және өңдеу кезінде торийдің қоршаған ортаға түсу көздерін түсіндіру үшін маңызды [19].

Халықаралық және салалық жинақталған деректерге сәйкес, торийдің әлемдік анықталған және бағаланған жиынтық ресурстары шамамен 66,3 млн т деңгейінде. Жарияланған бағалауларда ең ірі көлемдер Үндістанға тиесілі, сондай-ақ Бразилия, Австралия, АҚШ және бірқатар басқа елдер үшін де елеулі ресурстар көрсетіледі (1-сурет). Қолданбалы экология және

ауылшаруашылығы ғылымдары тұрғысынан бұл мәліметтер «шикізат базасы» ретінде ғана емес, торийқұрамды концентраттарды өндіру және өңдеумен байланысты ықтимал техногендік жүктеме аймақтарының индикаторы ретінде маңызды.

Торийдің негізгі минерал-тасымалдаушылары, ең алдымен, монацитпен және (сирекжер элементтері кендерінің бірқатарында) бастнезитпен ұсынылады; торийдің меншікті минералдары қатарында торит те жиі аталады. Практикада торийдің техногендік миграциясына ең типтік «тасымалдаушы» ретінде монацит қарастырылады, өйткені ол ауыр минералды құмдарда (плейсерлерде) кең таралған және сирекжер элементтерін өндіруге арналған шикізат ретінде өңделеді. Механикалық байыту және одан кейінгі гидрометаллургиялық операциялар кезінде (сілтілік ыдырату немесе қышқылдық шаймалау, фракцияларды бөлу) торий қалдықтарға, шламдарға және ағынды суларға өтіп, жергілікті ластану ошақтарын қалыптастыруы мүмкін [20-22].

Монацит жалпы формуласы (Ce, La, Nd, Th)PO₄-ке жақын сирекжер элементтерінің фосфаты; ол жоғары тығыздықпен (шамамен 4,65,7 г/см³) және Моос шкаласы бойынша 55,5 қаттылықпен сипатталады. Монациттегі торий мөлшері генезисі мен кен орнына байланысты кең ауқымда өзгереді; қолданбалы зерттеулерде ThO₂-тің типтік аралығы жиі 510% ретінде келтіріледі, алайда бұл көрсеткіш бірнеше пайыздан ондаған пайызға дейін ауытқуы мүмкін. Монациттің әлемдік ресурстары жөніндегі бағалаулар шамамен 16 млн т деңгейіне дейін жетеді, ал ауыр минералды құмның едәуір бөлігі Үндістанның оңтүстігі мен шығысында шоғырланған. Бұл деректер шолудың экологиялық бөлімі үшін маңызды, өйткені монацитті өндіру және өңдеу торийдің су және топырақ жүйелеріне, соның ішінде техногендік ықпал аймақтарындағы агроландшафттарға түсуіне алғышарттар қалыптастырады [23].

Торийдің изотоптық құрамы және экологиясы

Табиғи торий ұзақ уақыт бойы «мононуклидті» элемент ретінде қарастырылып, іс жүзінде ²³²Th изотопымен теңестірілді. Алайда IUPAC/Изотоптық құрамдар мен атомдық салмақтар жөніндегі комиссияның (CIAAW) ұсынымдарында көрініс тапқан изотоптық деректерді қайта қарау нәтижесінде торий үшін табиғи ортада екіизотопты құрамды ажыратуға болатыны көрсетілді: ²³²Th-пен (≈0,9998) қатар табиғи жүйелерде ²³⁰Th-тың да аз үлесі (≈0,0002) тіркеледі. Бұл жағдай торийдің стандартты атомдық салмағын нақтылауға және оның абсолютті «моноизотоптылығы» туралы қатаң түсініктен бас тартуға негіз болды [24-28].

Ядролық физика және радиохимия тұрғысынан торий үшін ондаған радиоизотоп сипатталған (олардың параметрлері халықаралық ядролық деректер базаларында келтірілген). Дегенмен табиғи және агроэкологиялық жүйелерде практикалық маңызы бары санаулы ғана: олар не бастапқы (ұзақ өмір сүретін) нуклидтер, не уран/торийдің ыдырауынан үздіксіз «қоректеніп», сондықтан өлшенетін мөлшерде болатын радионуклидтер [29].

Табиғи түрде кездесетін (немесе тұрақты түрде түзілетін) торий радионуклидтері үш классикалық ыдырау қатарына бөлінеді, бұл топырақ, су және дондық шөгінділердің фондық радиоактивтілігін түсіндіру үшін маңызды [30]:

²³⁸U қатары: ²³⁴Th (T_{1/2} = 24,10 тәулік) және ²³⁰Th (T_{1/2} = 7,538×10⁴ жыл) түзілуі;

²³²Th қатары: бастапқы ²³²Th (T_{1/2} = 1,405×10¹⁰ жыл) және тізбек бойынша түзілетін ²²⁸Th (T_{1/2} = 1,9116 жыл);

²³⁵U қатары: іздік өнімдер ²³¹Th (T_{1/2} = 25,52 сағ) және ²²⁷Th (T_{1/2} = 18,72 тәулік).

Ұзақ мерзімді геоэкология үшін шешуші нуклид – ²³²Th: оның өте ұзақ жартылай ыдырау кезеңі (шамамен 14 млрд жыл) геологиялық тұрақтылықты және литосферада, топырақта әрі олармен байланысты гидросферада тұрақты түрде болуын қамтамасыз етеді. Сонымен қатар дәл осы «ұзақ өмір сүретін» ²³²Th еншілес нуклидтердің түзілуін қолдап, олардың кейбір жағдайларда (әсіресе ұсақдисперсті фракциялар мен шөгінділерде жиналғанда) жергілікті деңгейде жоғары белсенділік қалыптастыруына ықпал етеді [31].

Энергетикалық контексте ²³²Th-тың құнарлы (fertile) нуклид екені маңызды: нейтронды жұтқанда ол бірізді түрде ²³³Th → ²³³Pa → ²³³U түрленеді, ал ²³³U бөлінгіш (fissile) материалдарға жатады. Бұл жола аграрлық тақырыппен тікелей байланысты болмаса да, торийге қызығушылықтың

артуын және соған сәйкес экологиялық тәуекелдерді бағалаудың өзектілігін түсіндіреді [32-35].

Торийдің экологиялық маңыздылығы ^{232}Th -тың болуымен ғана шектелмейді; өлшенетін белсенділік пен дозалық жүктемені нақты қандай қыз нуклидтер қалыптастыратыны да шешуші рөлятқарады. Ұзақ өмір сүретін изотоптар (ең алдымен ^{232}Th және ^{230}Th) салыстырмалы түрде төмен меншікті белсенділікке ие болғанымен, ұзақ мерзімді «фонды» анықтайды және геологиялық әрі шөгінділік резервуарларда жинақталады. Мысалы, ^{230}Th уранторийлік геохронологияда кең қолданылады (карбонаттарда және шөгінділерде жинақталуы), сонымен бірге ол биогеохимиялық айналымдарға тартылып, ұсақ бөлшектермен бірге тасымалдануы мүмкін [36].

Қысқа өмір сүретін изотоптар (^{234}Th , ^{228}Th , сондай-ақ іздік ^{231}Th және ^{227}Th) масса бірлігіне шаққанда жоғары белсенділікпен ерекшеленеді және ыдырау мен тасымалдың ағымдағы үдерістерінің индикаторлары ретінде маңызды. Топырақ ең табиғи судың радиоэкологиялық мониторингінде көбіне Th-тың өзін тікелей өлшеуге емес, ^{232}Th тізбегіндегі секулярлық тепе-теңдік бар деген болжаммен оның қыз өнімдерінің γ -сызықтарына (мысалы, ^{228}Ac , ^{212}Pb , ^{208}Tl) сүйенеді. Бұл ретте ^{220}Rn (торон) бөлінуі тепе-теңдікті бұзып, әсіресе топырақтың беткі горизонттары мен әлсіз тығыздалған материалдар үшін нәтижелерді түсіндіруге әсер етуі мүмкін екенін ескеру қажет [37-39].

Осылайша, ^{232}Th торийдің биосферада тұрақты түрде болуын қамтамасыз етеді, ал еншілес және радиогендік изотоптар (және олардың ыдырау өнімдері) «топырақ-су-түбіндегі шөгінділер» жүйесінде жергілікті жоғары белсенділік «дақтарын» қалыптастыруы мүмкін. Агроэкожүйелер үшін бұл Th-тың жалпы мөлшерін ғана емес, белсенділіктің қатты фаза, коллоидтық фракция және ерітінді арасында қайта бөлінуін айқындайтын жағдайларды да ескеруді, сондай-ақ аналитикалық тәсілді дұрыс таңдауды (еншілес нуклидтер бойынша γ -спектрометрия vs торийдің өзін радиохимиялық әдістермен/ICP-MS арқылы анықтау) талап етеді [40].

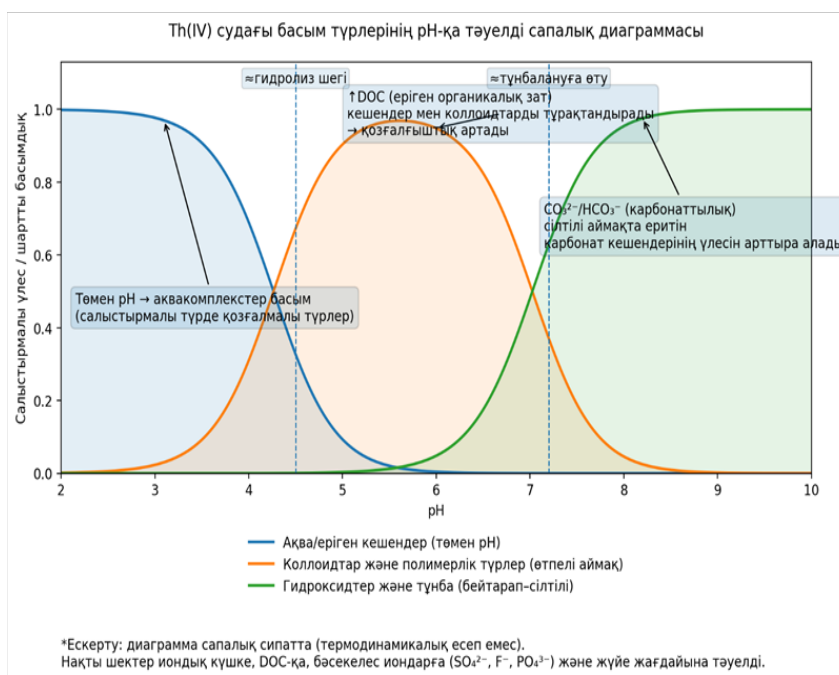
Судағы торийдің экологиясы

Табиғи суда торий дерлік толықтай +4 тотығу дәрежесінде болады және гидролизге айқын бейімділігі бар жоғары зарядталған катион ретінде әрекет етеді. Әлсіз қышқыл рН мәндерінің өзінде гидроксоформалар мен көпядролы бөлшектер түзіледі, ал рН шамамен 5-тен жоғары болғанда еріген Th(IV) тез арада нашар еритін гидроксидтік және гидратталған оксидтік фазаларға ауысып, қалқыма бөлшектерге сорбцияланады; бұл оның «нағыз еріген» үлесін күрт шектейді [41-45].

Термодинамикалық тұрғыдан ThO₂ ең тұрақты қатты форма болып саналады, алайда су ортасында торийдің қозғалғыштығы мен биожетімділігі «минералдың» өзімен емес, мономерлі гидроксокешендердің, көпядролы түрлердің және ішкісфералық коллоидтардың арақатынасымен көбірек анықталады. Тәжірибелік деректер Th(IV)-тің коллоидтық формалары шамамен 3,5 < рН < 5 аралығында және бейтарапсілтілі жағдайларда да, әсіресе иондық күш пен ерітінді құрамының өзгеруі кезінде, тасымалға елеулі үлес қоса алатынын көрсетеді [46].

Тұщы және теңіз суы үшін торийдің жоғары «бөлшекке-реактивтілігі» тән. Мұхитта еріген Th әдетте бөлшектерге бекітіліп, қалқыма затпен бірге су бағанынан шығарылып, шөгінді жиналу арқылы жойылады; сондықтан еріген торийдің концентрациясы өте төмен және көбіне іздік деңгейде талқыланады. Бұл қасиет торий изотоптарын бөлшектердің тасымалы мен тұну үдерістерінің трассерлері ретінде кеңінен қолданудың негізін құрайды [47].

Тұщы су жүйелерінде де көрініс ұқсас, бірақ лайлылықтың, минералданудың және органикалық зат мөлшерінің әртүрлілігіне байланысты вариабельділік жоғары болады.



1-сурет – Су ортасында Th(IV) формаларының рН бойынша шартты доминанттылық диаграммасы

Агроэкожүйелер үшін торийдің қозғалғыштығы арта алатын жағдайларды нақты түсіну аса маңызды. Судағы еріген органикалық заттар (DOC) және карбонаттылық торийдің еріген кешендерінің үлесін көбейтіп қана қоймай, коллоидтарды тұрақтандыруы мүмкін; соның нәтижесінде торийдің дренаждық желі бойымен, сондай-ақ жер асты суына көшуі (миграциясы) күшейеді. Ұқсас әсер қышқылды ағындылар түскен кезде және су араласу аймақтарында рН өзгергенде байқалуы ықтимал [48].

Осыған байланысты ауылшаруашылығы ландшафттарында торийдің мобилизациясын күшейтетін негізгі триггерлер ретінде «қышқылдық–органика–қалқыма бөлшектер» (лайлық/суспензия) факторларының үйлесуі, гидрохимиялық жағдайлардың маусымдық ауытқуы, сондай-ақ техногендік судың нүктелік түсуі қарастырылады.

Биологиялық әсерлер тұрғысынан торий төмен ерігіштігіне байланысты көбіне биожетімділігі төмен элемент деп есептеледі. Алайда жергілікті деңгейде концентрацияның артуы және ортада бөлшектер мен коллоидтардың болуы бұл жағдайды түбегейлі өзгерте алады. Тәжірибелік зерттеулер торийдің ThO_2 бөлшектері түрінде гидробионттарға уытты әсер етуі және су экожүйелеріндегі қауымдастықтардың қызметін өзгертуі мүмкін екенін көрсетеді. Мысалы, *Daphnia magna* үшін торий негізінен бөлшек тәрізді ThO_2 күйінде болған экспозиция жағдайында жедел және созылмалы әсерлер сипатталған [49-51].

Микроббалдыр қауымдастықтарында құрылымдық ығысулар және әртүрліліктің төмендеуі төмен наномолярлық деңгейлерде-ақ байқалған; ал торийдің қоршаған ортаға түсу көздері қатарында сирекжер шикізатын өндіру және фосфатты тыңайтқыштарды қолдану да аталады. Жасыл балдырларда ThO_2 нанобөлшектері әсерінен (әсіресе жоғары концентрацияларда) өсу қарқынының бұзылуы, фотосинтетикалық көрсеткіштердің төмендеуі және тотығу стрессінің күшеюі тіркелген [52].

Практикалық тұрғыдан алғанда, су ортасындағы экологиялық тәуекелдер «торийдің жалпы мөлшерімен» емес, оның қозғалмалы және биожетімді формаларының үлесімен анықталады; бұл үлес рН, еріген органикалық заттар, карбонаттылық және қалқыма бөлшектердің мөлшеріне тәуелді. Тәуекелдерді азайту үшін дәл осы қозғалмалы фракцияларды жоюға бағытталған технологиялар қолданылады: минералдық және функционалдандырылған материалдарда сорбция және қоса-тұндыру, мембраналық үдерістер (наносүзгілеу/нанофльтрация, электродиализ және гибридік сұлбалар), сондай-ақ ластанған қалқыманы және су түбіндегі шөгінділерді (түпкі шөгінділерді) ұстап қалу мен тұрақтандыру шаралары [53].

Топырақтағы торий

Табиғи текті иондаушы сәулелену биосфераның радиациялық фонының елеулі бөлігін қалыптастырады, ал топырақ оның негізгі «қоймасы» болып саналады, өйткені онда жер қыртысындағы бастапқы радионуклидтер және олардың су мен атмосфералық шаң арқылы қайта таралуынан пайда болған өнімдер жинақталады. Топырақтың табиғи радиоактивтілік деңгейіне литологиялық құрам мен топырақ түзілу үдерістері, климат және гидрологиялық режим, сондай-ақ техногендік факторлар әсер етеді. Соңғыларының ішінде, ең алдымен, кен өндіру және өңдеу, NORM-салаларының қалдықтарымен жұмыс істеу, сондай-ақ топырақтың қышқылдығын және органикалық күйін өзгертетін ауылшаруашылығы тәжірибелері маңызды орын алады [54].

Торийдің топырақтағы геохимиялық мінез-құлқы, негізінен, оның іс жүзінде әрдайым Th(IV) түрінде болуы және гидролизге, беткі кешендер түзуге, сондай-ақ минералдарға изоморфты түрде кірігуге жоғары бейімділігімен анықталады. Сондықтан көпшілік топырақта торий қатты фазада шоғырланып, ұсақдисперсті бөлшектермен байланысады және темірдің оксидтері мен гидроксидтері, саз минералдары және органикалық зат арқылы берік ұсталып тұрады. Соның нәтижесінде оның миграциясы әдетте баяу жүреді, ал жер асты суына өтуі шектеулі болады; дегенмен сорбциялық сыйымдылығы төмен ортада және тұрақты еритін кешендер түзілген жағдайда мұндай өту мүмкін. Бұл ATSDR профилінде де тікелей көрсетілген: онда торий үшін «топырақөсімдік» өтудің коэффициенті фондық жағдайларда әдетте өте төмен (көбіне <0,01) екені атап өтіледі [55].

Сонымен бірге «төмен қозғалғыштық» торийдің мүлде қозғалмайтынын білдірмейді. Топырақтағы Th-тың фракциялық бөлінуі қышқылдыққа және органикалық затқа, сондай-ақ карбонаттардың және FeMn оксидтерінің мөлшеріне сезімтал. Қышқыл топырақта неғұрлым лабильді формалардың үлесі артып, әлеуетті фитожегімділік жоғарылайды. Ал органикалық зат мөлшерінің көбеюі көбіне фитожегімді үлесті төмендеткенімен, кешен түзілу және фракциялар арасындағы қайта бөліну есебінен «әлеуетті қолжетімді» пулды ұлғайтуы мүмкін. Бұл заңдылықтар сирекжер өнеркәсібінің ықпалына ұшыраған топырақмысалында айқын көрсетілген [56].

Органикалық заттың әсері екіжақты болуы ықтимал. Бір жағынан, гумус Th(IV)-ті тұрақты торийорганикалық кешендер түрінде бекітіп, минералдық беттерде ұсталуын күшейтеді. Екінші жағынан, еріген органикалық зат, әсіресе фульвоқышқылдар, коллоидтарды тұрақтандырып, торийді қозғалмалы коллоидтық фракция құрамында тасымалдауы мүмкін; бұл әсіресе рН пен иондық күш өзгерген жағдайда айқынырақ байқалады. Осы әсерлерді механизмдік тұрғыдан сипаттау үшін жиі «Fe оксидтері + гуминдік заттар» үлгілік жүйелері қолданылады, онда гумустың болуы Th(IV)-тің минералдарда ұсталу сипатын өзгерте алатыны көрсетілген [57].

Агроэкожүйелер үшін торийдің топыраққа антропогендік түсуі тек кен өндірумен ғана емес, агрохимиялық факторлармен де байланысты екені маңызды. Фосфатты және кешенді тыңайтқыштардың құрамында табиғи радионуклидтер, соның ішінде ^{232}Th және ^{226}Ra болуы мүмкін; ал оларды ұзақ мерзім қолдану егістік қабаттың табиғи радиациялық фонын арттырып, жекелеген сценарийлерде «топырақөсімдік» жүйесінде жинақталуға алғышарт қалыптастыруы ықтимал. Бұл тыңайтқыштардың құрамын талдаған зертханалық жұмыстармен де, тыңайтылған топырақта белсенділіктің өсуі және әлеуетті дозалық көрсеткіштердің бағалануы тіркелген далалық зерттеулермен де расталады [58].

Фосфат өнеркәсібінің NORM-қалдықтары, ең алдымен фосфогипс, бөлек атап өтуге тұрарлық. Ол топырақтың қасиеттерін жақсартатын кондиционер ретінде қарастырылғанымен, бірқатар зерттеулер фосфогипспен бірге табиғи радионуклидтердің белсенділігі жоғарырақ мөлшерде енгізілуі мүмкін екенін көрсетеді. Сондықтан оны ауыл шаруашылықта қолданар алдында реттеушілік талаптарға сай және радиациялық-гигиеналық тұрғыдан бағалау қажет. NORM тәуекелдері мен оларды басқару тәсілдері IAEA материалдарында, сондай-ақ фосфогипстің әсерін бағалауға арналған жаңа еңбектерде кеңінен талқыланады [59].

Топырақта табиғи радионуклидтердің мөлшерін арттыратын тағы бір көз көмір энергетикасы және күл-қож материалдары. Көмір жанған кезде уран және торий қатарларының элементтері күлде шоғырланады; шолуларда ұшпа және түпкі күлдегі уран мен торий мөлшері бастапқы отынмен салыстырғанда бірнеше есе жоғары болуы мүмкін екені атап өтіледі. Күл-қож үйінділерінде

техногендік топырақтың (техноземдердің) қалыптасуы және шаңның тасымалдануы ^{232}Th және оған ілеспе нуклидтердің жергілікті деңгейін көтеруі мүмкін; мұны техноземдерді зерттеу және күлдің радиоактивтілігін бағалау жұмыстары дәлелдейді [60].

Жалпы алғанда, топырақтағы торий көбіне күшті сорбция және қатты фазалық формалардың басымдығы есебінен иммобилизацияланған күйде қалады, сондықтан қалыпты жағдайларда оның өсімдіктер мен адам үшін тәуекелге қосатын үлесі шектеулі. Алайда қышқылдану, органикалық режимнің өзгеруі, сульфатты техногендік орта болуы және коллоидтар арқылы тасымалдану жағдайларында торий неғұрлым қозғалмалы формаларға ауысып, экологиялық тұрғыдан мәнді факторға айналуы мүмкін. Бұл әсіресе NORM-өндірістеріне жақын аймақтарда, қалдық қоймаларында, «даулы» техногендік материалдар енгізілетін учаскелерде және шаңның алысқа таралатын зоналарында өзекті [61].

Су мен топырақты торийлік ластанудан тазарту әдістері

Агроэкожүйелердегі торийлік жүктемені төмендету, әдетте, екі түрлі логика бойынша шешіледі. Су нысандары мен дренаждық-ағынды су үшін басым міндет ерітіндідегі Th(IV) -тің қозғалмалы формаларын мүмкіндігінше тез және тиімді түрде алып тастау. Ал топырақ үшін көбіне «барлығын жуып шығару» емес, керісінше торийді жоғарғы қабатта сенімді түрде иммобилизациялау және оның өсімдіктерге әрі жер асты суына түсуін азайту маңыздырақ. Бұл топырақ-өсімдік жүйесінде торийдің көп жағдайда бөлшектермен берік байланысып ұсталып қалуына және өсімдік ұлпаларында негізінен тамырда жиналуына байланысты; дөңге өту үлесі, әдетте, төмен болғанымен, ол орта жағдайына және ерітінді құрамына тәуелді [62].

Th(IV) -ті судан жою үшін химиялық тұндыру және коагуляция, ион алмасу, мембраналық үдерістер және сорбциялық әдістерді қоса алғанда, технологиялардың кең спектрі сипатталған. Қазіргі шолуларда сорбцияның ең практикалық стратегияларың бірі болып қала беретіні атап өтіледі, өйткені оны өндірістік ауқымда енгізу жеңілдірек, алдын ала тазартумен үйлестіру оңай және су матрицасының әртүрлі типтеріне бейімдеуге болады.

Табиғи және ағынды су үшін практикалық тұрғыдан тиімді жалпы сұлба көбіне мынадай тізбек түрінде қарастырылады: «қалқыма бөлшектер мен коллоидтарды жою → еріген формаларды байланыстыру → қосымша тазарту (доочистка)». Алдын ала коагуляция немесе тұндыру сорбентке түсетін жүктемені төмендетеді, өйткені торийдің елеулі бөлігі қалқыма бөлшектермен байланысқан күйде болуы мүмкін. Одан кейін сорбенттер немесе ионалмастырғыш материалдар қосымша тазарту және селективті бөліп алу сатысы ретінде қолданылады, әсіресе торийдің концентрациясы төмен болғанда және бәсекелес иондар болған жағдайда (2-сурет) [63-65].



2-сурет – Әртүрлі сорбенттерде Th(IV) байланысуының негізгі механизмдері

Сорбциялық материалдарды шартты түрде далалық жағдайда қолдану мүмкіндігі және құны бойынша үш топқа бөлуге болады [66].

1. Минералдық сорбенттер және табиғи материалдар. Бұл топқа бентонитті саздар, Fe және Mn оксидтері, кремнеземге бай жыныстар, көміртекті материалдар жатады. Бентонит үшін

Th(IV)-тің байланысуы рН-қа айқын тәуелді екені көрсетілген, сондықтан мұндай материалдар арзан тазарту үшін және топырақтағы тосқауылдық шешімдер үшін қолайлы.

2. Биокөміртектер және биокөмір. Өсімдік тектес шикізаттан алынған биокөмірлер үшін Th(IV)-ті жоюдың жоғары тиімділігі және кинетикасының жиі псевдо-екінші реттік модельге сәйкес келетіні сипатталған, бұл инженерлік есептеулерге ыңғайлы. Мұндай материалдар агро-сценарийлер үшін қолжетімділігі және топырақ технологияларымен үйлесімділігі тұрғысынан перспективалы.

3. Жоғары селективті функционалдық материалдар. Мысалы, ковалентті органикалық қаңқалар сияқты материалдар ерітінділерде торийді өте жоғары селективтілікпен және тиімділікпен ұстай алады. Алайда олар әзірге көбіне зертханалық және пилоттық деңгейде қалып отыр, құны мен регенерация мүмкіндігін қосымша бағалау қажет.

Биосорбция және биологиялық тәсілдер аталған бағыттарды толықтыра алады. Саңырауқұлақ биомассасы үшін Th(IV) бойынша өте жоғары сорбциялық сыйымдылық және тепе-теңдікке жылдам жету көрсетілген, бұл биоматериалдардың су тазартудағы әлеуетін дәлелдейді. Дегенмен енгізу барысында биосорбенттің тұрақтылығын және пайдаланылған радиоактивті биомассамен жұмыс істеу мәселелерін міндетті түрде ескеру қажет [67].

Топырақ және су түбіндегі шөгінділер үшін көбіне иммобилизация стратегиясы тиімді, өйткені торийді топырақ массасынан толық шығару қымбат және топырақ құрылымын бұзуы мүмкін. Нәтиже беретін тәсілдер торийді нашар еритін формаларға көшіруге немесе оның қатты фазада бекітілуін күшейтуге бағытталған қоспаларға негізделеді. Атап айтқанда, фосфатты қоспалар нашар еритін торий-фосфатты қосылыстар түзу арқылы торийдің биожетімділігін төмендете алатыны көрсетілген. Бұл агроэкожүйелер үшін маңызды, өйткені түпкі мақсат өсімдікке өтуін және сүзінді сумен миграциясын азайту болып табылады [68].

Сондай-ақ ауыл шаруашылық тәжірибелері бір мезгілде тәуекел факторы да, басқару құралы да бола алатынын бөлек ескерген жөн. Бір жағынан, фосфатты тыңайтқыштар мен фосфатқұрамды материалдар табиғи радионуклидтерді бірге енгізіп, ұзақ қолданылғанда топырақтың жоғарғы қабатында олардың жиналуына әкелуі мүмкін. Екінші жағынан, дұрыс таңдалған фосфатты және органоминералдық қоспалар торийді бекітетін құрал ретінде жұмыс істеп, оның қолжетімділігін азайта алады. Сондықтан тәсілді таңдағанда материалдың ластану көзі ретіндегі рөлін және ремедиациялық функциясын ажыратып көрсету, сондай-ақ табиғи радионуклидтер бойынша фондық деңгейді міндетті түрде бақылау қажет [69].

Агроэкожүйелерге арналған мақала үшін ең жұмыс істейтін логика мынадай болады су және ағындылар үшін алдын ала тазартуды коагуляция немесе тұндыру арқылы жүргізу және оны сорбциялық қосымша тазартумен үйлестіру, қажет болғанда ион алмасу немесе мембраналық үдерістерді қосу топырақ үшін иммобилизацияға және тосқауылдық шешімдерге басымдық беру, саздар, биокөмір, темір оксидтері және фосфатты қоспалар, бұл ретте биожетімділіктің төмендеуін және миграцияның бақылауда болуын бағалау екіншілік қалдықтармен жұмыс істеуді жеке сипаттау, пайдаланылған сорбенттер, тұнбалар, ластанған биомасса, себебі технологияның нақты экологиялық тиімділігін көбіне осы бөлік айқындайды [70].

Қорытындысында торийлік ластануды тазартудың қазіргі тәжірибесі табиғи материалдарды, биосорбенттерді және нанотехнологиялық шешімдерді үйлестіруге негізделеді, әрі әдістерді нақты жағдайларға бейімдеуге болады, рН, иондардың концентрациясы, температура және бәсекелес заттардың болуы. Осындай кешенді тәсіл су және топырақ экожүйелерін радиациялық ластанудан қорғауға арналған экологиялық қауіпсіз әрі жоғары тиімді жүйелерді қалыптастыруға мүмкіндік береді.

Қорытынды

Агроэкожүйелерде торийді қос мақсаттағы ілеспе радионуклид ретінде қарастыру орынды. Бір жағынан, ол торийге негізделген технологиялардың дамуына байланысты, ал екінші жағынан, торийдің техногендік жолмен топырақ пен суға түсуі белгілі бір аумақтарда жергілікті экологиялық және санитариялық тәуекелдерді күшейтуі мүмкін. Топырақ-су жүйесіне Th⁴⁺ түсуінің негізгі арналары сирекжер шикізатын өндіру және өңдеу, металлургиялық үдерістер, сондай-ақ фосфатты тыңайтқыштарды ұзақ мерзім қолдану [71].

Торий табиғи ортада кең таралғанымен, агроландшафттарда оның миграциясы көп жағдайда шектеулі болады. Бұл тотығу жағдайларында Th(IV) түрі басым болуымен түсіндіріледі: оған күшті гидролиз, оксидті-гидроксидті қосылыстардың төмен ерігіштігі, әрі саз минералдарына, FeMn оксидтеріне және органикалық затқа жоғары сорбциялық бейімділік тән. Осы себептен торий көбіне қатты фазаға байланып, кең ауқымды тасымалдануға бейім емес.

Дегенмен орта параметрлері өзгерген жағдайда жағдай күрделене түседі. рН, минералдану деңгейі және кешен түзуші заттардың (лигандтардың) құрамы ауысқанда торий ерітіндіде еритін немесе коллоидтық қозғалмалы формаларға көшуі мүмкін. Мұндай кезде торийдің беткейлік ағынмен және инфильтрация арқылы төменге өту ықтималдығы артады. Сондықтан агроэкожүйелер үшін торийдің қайта мобилизациялануын (бекіген күйден қозғалмалы күйге ауысуын) іске қосатын жағдайларды мониторингтеу және басқару аса маңызды.

Топырақ пен судың ластану тәуекелін төмендету аграрлық жағдайларға бейімделетін практикалық технологияларды талап етеді. Су матрицалары үшін ең ұтымды тәсіл көпсатылы сұлба: «қалқыма бөлшектер мен коллоидтарды жою → еріген формаларды байланыстыру → соңғы қосымша тазарту». Алдын ала коагуляция/түндыру кейінгі сатылардағы сорбцияға немесе ион алмасуға түсетін жүктемені азайтады, әсіресе торий концентрациясы төмен және бәсекелес иондар көп болған жағдайда.

Сорбенттер арасында ауылшаруашылығы аумақтары үшін қолданбалы әлеуеті ең жоғарысы қолжетімді минералдық материалдар мен биокөміртектер (мысалы, бентонит және биокөмір). Олар топырақ технологияларымен үйлеседі, тосқауылдық қоспа ретінде енгізіле алады және өндірістік ауқымда қолдануға ыңғайлы. Ал жоғары селективті функционалдық материалдар торийді ерітіндіден өте тиімді ұстаса да, әзірге көбіне зертханалық-пилоттық деңгейде қалып, құны мен регенерациясы (қайта пайдаланылуы) қосымша бағалауды қажет етеді.

Топырақ және су түбіндегі шөгінділер үшін көп жағдайда иммобилизация стратегиясы тиімдірек, өйткені торийді топырақ массасынан толық шығару технологиялық жағынан да, экологиялық тұрғыдан да қымбат әрі топырақ құрылымын бұзуы мүмкін. Сондықтан торийді нашар еритін тұрақты формаларға көшіру және оның биожетімділігін төмендету мақсатындағы қоспалар перспективалы; соның ішінде фосфатты қоспалар торий-фосфатты нашар еритін қосылыстар түзу арқылы қауіпсіздік мақсаттарына тікелей сай келеді.

Жалпы алғанда, геохимиялық негізделген мониторинг, торийдің қозғалғыштығын арттыратын жағдайларды басқару және тұрақты сорбциялық/иммобилизациялық шешімдерді енгізу торийді агроландшафттарда басқарылатын тәуекел факторы ретінде қарастыруға мүмкіндік береді және сонымен қатар қауіпсіз әрі «таза» технологиялар бағытын ғылыми тұрғыдан қолдайды.

Авторлардың қосқан үлесі

НҒ: тұжырымдамасын жасап, мақаланың негізгі бөлігін жазды. ЖА: әдебиет деректерін жинап, талдап, торий миграциясы бойынша бөлімдер дайындады. АҒ: сорбция әдістері мен ремедиация технологияларын талдады. ГИ: нәтижелерді түсіндіріп, ғылыми қорытынды жасады. ЗИ: әдістемелік қолдау көрсетіп, ғылыми редакциялау жұмыстарын жүргізді. ЖМ: жұмысты қадағалап, бекітті.

Барлық авторлар мақаланың соңғы нұсқасын оқып, қарады және бекітті.

Қаржыландыру туралы ақпарат

Зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитетінің 2024-2026 жылдарға арналған бағдарламалық-нысаналы қаржыландыру жөніндегі BR24993225 Қазақстан энергетикасы үшін жаңа типті модульдік атомдық реакторларда әлеуетті ядролық отын ретінде торийді кешенді зерттеу ғылыми бағдарламасын іске асыру шеңберінде орындалды.

Әдебиеттер тізімі

- 1 Schaffer, M. (2013). *Thorium fuel cycle: Prospects and challenges*. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- 2 Chen, L. (2025). Operational analysis of TMSR-LF1 thorium reactor in China. *Nuclear Science and Engineering*, 189(2), 45-60.
- 3 Калыбай, А., Курбанова, Б., Мансуров, З., Хасанейн, А., Алсар, Ж., Инсепов З. (2024). Математические модели активной зоны ториевого реактора. *Горение и плазмохимия*, 22(4), 279-295. DOI: 10.18321/срс22(4)279-295.
- 4 Инсепов, З., Калыбай, А., Мансуров, З., Лесбаев, Б., Хасанейн, А., Алсар, Ж. (2024). Ядерно-химические характеристики подкритических ториевых реакторов с внешним нейтронным источником: обзор. *Горение и плазмохимия*, 22(4), 297-308.
- 5 Инсепов, З., Калыбай, А., Алсар, Ж., Хасанейн, А., Сизюк, Ю., Мансуров, З. (2025). Краткий обзор ядерно-физических решений ториевого реактора в странах-производителях. *Горение и плазмохимия*, 23(1), 3-8. DOI:10.18321/срс23(1)3-8.
- 6 Инсепов, З., Калыбай, А., Алсар, Ж., Хасанейн, А., Сизюк, Ю., Мансуров, З., Гаджимурадова, А. (2025). Критический анализ конструкций ториевого реактора в странах-производителях. *Горение и плазмохимия*, 23(1), 9-23. DOI:10.18321/срс23(1)9-23.
- 7 Chacon, E., Cabrera, J. (2024). Thorium mobility and environmental risks. *Environmental Radioactivity*, 12(3), 7891.
- 8 Bangotra, P., et al. (2018). Global thorium distribution and human exposure. *Journal of Environmental Radioactivity*, 192, 5062.
- 9 Négre, P., et al. (2018). Thorium in natural water systems. *Applied Geochemistry*, 92, 105-118.
- 10 Ribeiro, M., et al. (2017). Distribution of thorium in Brazilian soils and sediments. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189, 402.
- 11 Servitzoglou, D., et al. (2018). Anthropogenic sources of thorium. *Journal of Hazardous Materials*, 353, 6578.
- 12 Xiao, H., et al. (2016). Uranium-thorium substitution in nuclear fuels. *Progress in Nuclear Energy*, 91, 23-35.
- 13 Gad, S.C. (2005). *Encyclopedia of Toxicology*. 2.
- 14 Shtangeeva, I., Ayrault, S. (2004). Thorium biogeochemistry in soils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(14), 2969-2980.
- 15 Hore-Lacy, I. (2011). Uranium resources and global energy. World Nuclear Association Report.
- 16 Sar, P., D'Souza, S.F. (2002). Thorium uptake by organisms. *Chemosphere*, 46(3), 403-409.
- 17 Patel, K., et al. (2022). Thorium behavior in lithophilic environments. *Minerals*, 12(5), 345.
- 18 Chroneos, A., et al. (2023). Global thorium reserves mapping. *Mineral Economics*, 36, 205-218.
- 19 Chroneos, A., et al. (2023). Thorium resources overview. World Nuclear Association.
- 20 Balachandran, G. (2014). Monazite processing and thorium extraction. *Journal of Rare Earths*, 32(9), 901-912.
- 21 Gramaccioli, C., Segalstad, T.V. (1978). Mineralogy of thorium-bearing monazite. *Economic Geology*, 73, 883-891.
- 22 Long, K., et al. (2010). Monazite as a thorium resource. *Hydrometallurgy*, 104, 210-218.
- 23 Meija, J., et al. (2016). Isotopic composition of thorium. IUPAC Technical Report. *Pure and Applied Chemistry*, 88(3), 293-306.
- 24 Escareño-Juarez, F., et al. (2020). Thorium isotopes and environmental impact. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 324, 1201-1215.
- 25 Asylbaev, M., et al. (2017). Thorium chemistry in aquatic systems. *Journal of Environmental Radioactivity*, 169, 110.
- 26 Hazen, R.M., et al. (2009). Complexation of Th (IV) in water. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73, 5816-5828.
- 27 Mohapatra, D., et al. (2020). Hydrolysis and Th (IV) species. *Environmental Chemistry*, 17, 456-467.
- 28 Rao, C.N., et al. (2015). Thorium mobilization in freshwater systems. *Environmental Pollution*, 199, 192-200.

- 29 Yusof, N., et al. (2020). Thorium in aquatic ecosystems. *Science of the Total Environment*, 703, 134592.
- 30 Estevenon, J., et al. (2020). Ecotoxicology of thorium. *Ecotoxicology*, 29, 10301045.
- 31 Zaimee, FI, et al. (2021). Thorium remediation techniques. *Journal of Hazardous Materials*, 403, 123716.
- 32 Mohammad, M., et al. (2025). Advanced water treatment for radioactive contaminants. *Environmental Technology*, 46, 560576.
- 33 Ribeiro, M., et al. (2018). Thorium levels in soils. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190, 130.
- 34 Charles, N. (2001). Natural radionuclides in soils. *Applied Radiation and Isotopes*, 54, 317322.
- 35 Altmaier, M., et al. (2006). Thorium complexation in soils. *Radiochimica Acta*, 94, 353361.
- 36 Porcelli, D. (2015). Geochemical behavior of thorium. *Chemical Geology*, 395, 3248.
- 37 Sharma, P., et al. (2019). Thorium migration in soils. *Journal of Environmental Radioactivity*, 208, 106115.
- 38 Ross, S. (1994). Thorium sorption on soils. *Journal of Contaminant Hydrology*, 16, 6375.
- 39 Rieuwerts, J.S., et al. (1998). Thorium mobility in soils. *Environmental Pollution*, 101, 275-285.
- 40 Martínez-Aguirre, A., Perianez, R. (1999). Thorium in soil systems. *Applied Geochemistry*, 14, 795807.
- 41 Ge, Z., et al. (2000). Thorium transport in soils. *Radiochimica Acta*, 88, 101108.
- 42 Wasserman, S., et al. (2008). Interaction of Th with soil organic matter. *Environmental Science & Technology*, 42, 351356.
- 43 Chopin, T. (1992). Thorium in soils. *Environmental Monitoring and Assessment*, 22, 3544.
- 44 Impellitteri, C., et al. (2002). Thorium sorption processes. *Journal of Hazardous Materials*, 92, 115124.
- 45 Xu, J., et al. (2006). Humic acid interaction with thorium. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70, 54025411.
- 46 Guo, H., et al. (2008). Thorium speciation in contaminated soils. *Environmental Pollution*, 156, 12611270.
- 47 Титаева, Л.Н. (1992). Поведение тория в природных водах. *Вестник Московского университета*, 2, 33(4), 4550.
- 48 Иванов, С.П. (1997). Радиоэкология тория. *Радиоэкология*, 5, 1220.
- 49 Kabata-Pendias, A., Szteke, B. (2015). *Trace elements in soils and plants*. Boca Raton: CRC Press, 580.
- 50 Malikova, T., et al. (2020). Thorium contamination in industrial soils. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192, 434.
- 51 Yan, C., Luo, Y. (2015). Thorium behavior in mining-impacted soils. *Journal of Environmental Radioactivity*, 148, 5563.
- 52 Fallatah, A., et al. (2024). Thorium uptake by plants. *Chemosphere*, 315, 138993.
- 53 Li, X., et al. (2018). Nanomaterials for thorium removal. *Journal of Hazardous Materials*, 357, 3547.
- 54 Mousa, H., et al. (2019). Graphene oxide sorbents for thorium. *Environmental Science & Technology*, 53, 14291439.
- 55 Tsai, W.T., et al. (2021). Enhanced diatomite sorption for thorium. *Journal of Environmental Management*, 290, 112634.
- 56 Das, S., et al. (2018). Cu nanoparticles for thorium adsorption. *Colloids and Surfaces A*, 538, 7282.
- 57 Noli, F., et al. (2022). Nanoparticle-based thorium remediation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10, 107200.
- 58 Liu, Y., et al. (2023). COF materials for thorium capture. *Chemical Engineering Journal*, 455, 140520.
- 59 Мишеляя, Г.И., и др. (2007). Фосфорилмочевина для связывания тория. *Радиохимия*, 49(6), 677682.

- 60 Bhainsa, K.C., D'Souza, S.F. (2009). Thorium biosorption by fungi. *Bioresource Technology*, 100, 28252830.
- 61 El-Kamash, A.M., et al. (2006). Bentonite sorbents for thorium removal. *Journal of Hazardous Materials*, 138, 75-83.
- 62 Salem, N.M., et al. (2011). Diatomite for Th (IV) adsorption. *Journal of Environmental Management*, 92, 11001107.
- 63 Zhou, X., et al. (2017). Biochar as thorium sorbent. *Bioresource Technology*, 244, 12801287.
- 64 Davis, T.A., et al. (2003). Algal biosorption of thorium. *Water Research*, 37, 221230.
- 65 Hussein, H., et al. (2004). Fungal biosorption of Th(IV). *Process Biochemistry*, 39, 12511256.
- 66 El-Kamash, A.M. (2008). Ion exchange resins for thorium removal. *Journal of Hazardous Materials*, 150, 373380.
- 67 Gupta, V.K., et al. (2012). Activated carbon modifications for thorium adsorption. *Chemical Engineering Journal*, 191, 124131.
- 68 Sadiq, R., et al. (2004). EDTA-based chelating sorbents. *Separation and Purification Technology*, 38, 18.
- 69 IAEA. (2017). *Thorium fuel cycle: Status and trends*. International Atomic Energy Agency Report.
- 70 World Nuclear Association. (2021). *Thorium fuel*. WNA Report.
- 71 Sergeant, C., et al. (2012). Thorium fuel cycle development and proliferation concerns. *Energy Policy*, 42, 457468.

References

- 1 Schaffer, M. (2013). *Thorium fuel cycle: Prospects and challenges*. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- 2 Chen, L. (2025). Operational analysis of TMSR-LF1 thorium reactor in China. *Nuclear Science and Engineering*, 189 (2), 4560.
- 3 Kalybai, A., Kurbanova, B., Mansurov, Z., Hasanejn, A., Alsar, Z.H., Insepov, Z. (2024). Matematicheskie modeli aktivnoi zony torievogo reaktora. *Gorenie i plazmohimiya*, 22(4), 279-295. DOI: 10.18321/cpc22(4)279-295. [in Russ].
- 4 Insepov, Z., Kalybai, A., Mansurov, Z., Lesbaev, B., Hasanejn, A., Alsar, Z.H. (2024). Yadernohimicheskie karakteristiki podkriticheskikh torievyyh reaktorov s vneshnim neitronnym istochnikom: obzor. *Gorenie i plazmohimiya*, 22(4), 297-308. DOI: 10.18321/cpc22(4)297-308. [in Russ].
- 5 Insepov, Z., Kalybai, A., Alsar, Z.H., Hasanejn, A., Sizyuk, Y.U., Mansurov, Z. (2025). Kratkij obzor yaderno-fizicheskikh reshenij torievogo reaktora v stranah-proizvoditelyah. *Gorenie i plazmohimiya*, 23(1), 3-8. DOI: 10.18321/cpc23(1)3-8. [in Russ].
- 6 Insepov, Z., Kalybai, A., Alsar, ZH, Hasanejn, A., Sizyuk, YU, Mansurov, Z., Gadzhimuradova, A. (2025). Kriticheskii analiz konstrukcii torievogo reaktora v stranah-proizvoditelyah. *Gorenie i plazmohimiya*, 23(1), 9-23.
- 7 Chacon, E., Cabrera, J. (2024). Thorium mobility and environmental risks. *Environmental Radioactivity*, 12(3), 7891.
- 8 Bangotra, P., et al. (2018). Global thorium distribution and human exposure. *Journal of Environmental Radioactivity*, 192, 5062.
- 9 Négre, P., et al. (2018). Thorium in natural water systems. *Applied Geochemistry*, 92, 105-118.
- 10 Ribeiro, M., et al. (2017). Distribution of thorium in Brazilian soils and sediments. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189, 402.
- 11 Servizoglou, D., et al. (2018). Anthropogenic sources of thorium. *Journal of Hazardous Materials*, 353, 6578.
- 12 Xiao, H., et al. (2016). Uranium-thorium substitution in nuclear fuels. *Progress in Nuclear Energy*, 91, 23-35.
- 13 Gad, SC. (2005). *Encyclopedia of Toxicology*. 2.
- 14 Shtangeeva, I., Ayrault, S. (2004). Thorium biogeochemistry in soils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(14), 29692980.

- 15 Hore-Lacy, I. (2011). Uranium resources and global energy. World Nuclear Association Report.
- 16 Sar, P., D'Souza, S.F. (2002). Thorium uptake by organisms. *Chemosphere*, 46(3), 403409.
- 17 Patel, K., et al. (2022). Thorium behavior in lithophilic environments. *Minerals*, 12(5), 345.
- 18 Chroneos, A., et al. (2023). Global thorium reserves mapping. *Mineral Economics*, 36, 205218.
- 19 Chroneos, A., et al. (2023). Thorium resources overview. *World Nuclear Association*.
- 20 Balachandran, G. (2014). Monazite processing and thorium extraction. *Journal of Rare Earths*, 32(9), 901912.
- 21 Gramaccioli, C., Segalstad, T.V. (1978). Mineralogy of thorium-bearing monazite. *Economic Geology*, 73, 883891.
- 22 Long, K., et al. (2010). Monazite as a thorium resource. *Hydrometallurgy*, 104, 210218.
- 23 Meija, J., et al. (2016). Isotopic composition of thorium. IUPAC Technical Report. *Pure and Applied Chemistry*, 88(3), 293306.
- 24 Escareño-Juarez, F., et al. (2020). Thorium isotopes and environmental impact. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 324, 12011215.
- 25 Asylbaev, M., et al. (2017). Thorium chemistry in aquatic systems. *Journal of Environmental Radioactivity*, 169, 110.
- 26 Hazen, R.M., et al. (2009). Complexation of Th (IV) in water. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73, 58165828.
- 27 Mohapatra, D., et al. (2020). Hydrolysis and Th (IV) species. *Environmental Chemistry*, 17, 456-467.
- 28 Rao, C.N., et al. (2015). Thorium mobilization in freshwater systems. *Environmental Pollution*, 199, 192200.
- 29 Yusof, N., et al. (2020). Thorium in aquatic ecosystems. *Science of the Total Environment*, 703, 134592.
- 30 Estevenon, J., et al. (2020). Ecotoxicology of thorium. *Ecotoxicology*, 29, 10301045.
- 31 Zaimiee, FI, et al. (2021). Thorium remediation techniques. *Journal of Hazardous Materials*, 403, 123716.
- 32 Mohammad, M., et al. (2025). Advanced water treatment for radioactive contaminants. *Environmental Technology*, 46, 560576.
- 33 Ribeiro, M., et al. (2018). Thorium levels in soils. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190, 130.
- 34 Charles, N. (2001). Natural radionuclides in soils. *Applied Radiation and Isotopes*, 54, 317322.
- 35 Altmaier, M., et al. (2006). Thorium complexation in soils. *Radiochimica Acta*, 94, 353361.
- 36 Porcelli, D. (2015). Geochemical behavior of thorium. *Chemical Geology*, 395, 3248.
- 37 Sharma, P., et al. (2019). Thorium migration in soils. *Journal of Environmental Radioactivity*, 208, 106115.
- 38 Ross, S. (1994). Thorium sorption on soils. *Journal of Contaminant Hydrology*, 16, 6375.
- 39 Rieuwerts, J.S., et al. (1998). Thorium mobility in soils. *Environmental Pollution*, 101, 275-285.
- 40 Martínez-Aguirre, A., Perianez, R. (1999). Thorium in soil systems. *Applied Geochemistry*, 14, 795807.
- 41 Ge, Z., et al. (2000). Thorium transport in soils. *Radiochimica Acta*, 88, 101108
- 42 Wasserman, S., et al. (2008). Interaction of Th with soil organic matter. *Environmental Science & Technology*, 42, 351356.
- 43 Chopin, T. (1992). Thorium in soils. *Environmental Monitoring and Assessment*, 22, 3544.
- 44 Impellitteri, C., et al. (2002). Thorium sorption processes. *Journal of Hazardous Materials*, 92, 115124.
- 45 Xu, J., et al. (2006). Humic acid interaction with thorium. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70, 54025411.
- 46 Guo, H., et al. (2008). Thorium speciation in contaminated soils. *Environmental Pollution*, 156, 12611270.
- 47 Titaeva, L.N. (1992). Povedenie toriya v prirodnyh vodah. *Vestnik Moskovskogo universiteta*, 2, 33(4), 4550. [in Russ].
- 48 Ivanov, S.P. (1997). Radioekologiya toriya. *Radioekologiya*, 5, 12-20. [in Russ].

- 49 Kabata-Pendias, A., Szeke, B. (2015). *Trace elements in soils and plants*. Boca Raton: CRC Press.
- 50 Malikova, T., et al. (2020). Thorium contamination in industrial soils. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192, 434.
- 51 Yan, C., Luo, Y. (2015). Thorium behavior in mining-impacted soils. *Journal of Environmental Radioactivity*, 148, 5563.
- 52 Fallatah, A., et al. (2024). Thorium uptake by plants. *Chemosphere*, 315, 138993.
- 53 Li, X., et al. (2018). Nanomaterials for thorium removal. *Journal of Hazardous Materials*, 357, 3547.
- 54 Mousa, H., et al. (2019). Graphene oxide sorbents for thorium. *Environmental Science & Technology*, 53, 14291439.
- 55 Tsai, W.T., et al. (2021). Enhanced diatomite sorption for thorium. *Journal of Environmental Management*, 290, 112634.
- 56 Das, S., et al. (2018). Cu nanoparticles for thorium adsorption. *Colloids and Surfaces A*, 538, 7282.
- 57 Noli, F., et al. (2022). Nanoparticle-based thorium remediation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10, 107200.
- 58 Liu, Y., et al. (2023). COF materials for thorium capture. *Chemical Engineering Journal*, 455, 140520.
- 59 Misheliya, G.I., i dr. (2007). Fosforilmochevina dlya svyazyvaniya toriya. *Radiokhimiya*, 49(6), 677682. [in Russ].
- 60 Bhainsa, K.C., D'Souza, SF. (2009). Thorium biosorption by fungi. *Bioresource Technology*, 100, 28252830.
- 61 El-Kamash, A.M., et al. (2006). Bentonite sorbents for thorium removal. *Journal of Hazardous Materials*, 138, 7583.
- 62 Salem, N.M., et al. (2011). Diatomite for Th (IV) adsorption. *Journal of Environmental Management*, 92, 11001107.
- 63 Zhou, X., et al. (2017). Biochar as thorium sorbent. *Bioresource Technology*, 244, 12801287.
- 64 Davis, T.A., et al. (2003). Algal biosorption of thorium. *Water Research*, 37, 221230.
- 65 Hussein, H., et al. (2004). Fungal biosorption of Th (IV). *Process Biochemistry*, 39, 12511256.
- 66 El-Kamash, A.M. (2008). Ion exchange resins for thorium removal. *Journal of Hazardous Materials*, 150, 373380.
- 67 Gupta, V.K., et al. (2012). Activated carbon modifications for thorium adsorption. *Chemical Engineering Journal*, 191, 124131.
- 68 Sadiq, R., et al. (2004). EDTA-based chelating sorbents. *Separation and Purification Technology*, 38, 18.
- 69 IAEA. (2017). *Thorium fuel cycle: Status and trends*. International Atomic Energy Agency Report.
- 70 World Nuclear Association. (2021). *Thorium fuel*. WNA Report.
- 71 Sergeant, C., et al. (2012). Thorium fuel cycle development and proliferation concerns. *Energy Policy*, 42, 457468.

Роль тория в агроэкосистемах: источники поступления, миграция в системе «почва-вода» и сорбционные подходы к снижению рисков

Ғұбайдуллин Н.Н., Алсар Ж.Т., Гаджимурадова А.М., Исмуканова Г.Ж.,
Инсепов З.А., Мансуров З.А.

Аннотация

Предпосылки и цель. Торий (Th), несмотря на его стратегическое значение как элемента топливных циклов на основе Th-232, при поступлении в воду и почву из техногенных источников может представлять долгосрочные экологические и санитарные риски для агроэкосистем. Целью данного обзора является систематизация путей поступления тория в агроландшафты и факторов, определяющих его миграцию в системе «почва–вода», а также обобщение сорбционных и комплексных ремедиационных решений, направленных на снижение рисков.

Материалы и методы. Исследование выполнено в формате структурированного аналитического обзора. Литературные источники отобраны из баз данных Scopus, Web of Science, ScienceDirect и Google Scholar и охватывают публикации за период 1990–2025 гг. Поиск осуществлялся по ключевым терминам: Th(IV), геохимия тория, миграция в системе «почва–вода», комплексообразование и сорбция/ремедиация. В обзор включались только рецензируемые источники экологической направленности, тогда как работы сугубо энергетико-инженерного профиля были исключены.

Результаты. В водной среде торий преимущественно связан с частицами и коллоидной фракцией, а его подвижность определяется pH, содержанием растворённого органического вещества (DOC) и карбонатностью. DOC и карбонаты способствуют образованию растворимых комплексов и стабилизации коллоидов, что может усиливать транспорт тория в дренажные и подземные воды; в агроландшафтах мобилизация связана с сочетанием факторов кислотности, органического вещества и взвешенных частиц, а также с сезонными гидрохимическими колебаниями. Для снижения риска рассматриваются коагуляция, мембранные процессы, ионный обмен и адсорбция; с прикладной точки зрения перспективными являются диатомит, бентонит, биосорбенты и композитные материалы. Сорбенты условно подразделяются на минеральные/природные, биоуглеродные и высокоселективные функциональные материалы.

Заключение. Снижение рисков, связанных с торием в агроэкосистемах, основывается на сочетании мониторинга параметров среды (pH, DOC, минерализация, взвешенные частицы) с мерами сорбции и иммобилизации. Для водных сред эффективной является схема предварительной коагуляции/осаждения с последующей сорбционной доочисткой (при необходимости с применением ионного обмена или мембранных процессов). В почвах приоритетным направлением является иммобилизация тория в верхнем горизонте с использованием барьерных добавок (природные сорбенты, биоуглерод, оксиды железа, фосфаты); также обязательным является безопасное обращение с вторичными отходами.

Ключевые слова: торий (Th⁴⁺); радионуклиды; геохимия тория; сорбция; очистка воды и почвы; экологическая безопасность.

The Role of Thorium in Agroecosystems: Sources of Input, Migration in the Soil–Water System, and Sorption-Based Approaches to Risk Reduction

Nurtai N. Gubaidullin, Zhanna T. Alsar, Aissarat M. Gajimuradova, Gulzhamal Zh. Ismukanova
Zinetula A. Insepov, Zulkhair A. Mansurov

Abstract

Background and Aim. Thorium (Th), although considered a strategic element associated with Th-232-based fuel cycles, can pose long-term environmental and sanitary risks to agroecosystems when introduced into soil and water through technogenic sources. The aim of this review is to systematize the pathways of thorium input into agrolandscapes and the factors controlling its migration in the “soil–

water” system, as well as to summarize sorption-based and integrated remediation approaches for risk reduction.

Materials and Methods. The study was conducted as a structured analytical review. Literature sources were selected from Scopus, Web of Science, ScienceDirect, and Google Scholar databases, covering publications from 1990 to 2025. The search was performed using keywords related to Th (IV), thorium geochemistry, migration in the “soil–water” system, complexation, and sorption/remediation. Only peer-reviewed sources with an environmental focus were included, while purely energy-engineering studies were excluded.

Results. In aquatic environments, thorium is predominantly associated with particulate and colloidal fractions, and its mobility depends on pH, dissolved organic matter (DOC), and carbonate content. DOC and carbonates enhance the formation of soluble complexes and stabilize colloids, thereby facilitating thorium transport into drainage and groundwater systems. In agrolandscapes, mobilization is associated with the combined effects of acidity, organic matter, suspended particles, and seasonal hydrochemical fluctuations. Risk mitigation approaches include coagulation, membrane processes, ion exchange, and adsorption. From an applied perspective, diatomite, bentonite, biosorbents, and composite materials are considered promising. Sorbents are conventionally classified into mineral/natural materials, biochar-based sorbents, and highly selective functional materials.

Conclusion. Risk reduction of thorium in agroecosystems is based on the integrating environmental monitoring (pH, DOC, salinity, suspended particles) with sorption and immobilization strategies. For water treatment, an effective approach involves preliminary coagulation/sedimentation followed by sorption-based polishing (with optional ion exchange or membrane processes). In soils, the priority is the immobilization of thorium in the top layer using barrier amendments (natural sorbents, biochar, iron oxides, phosphates). The safe management of secondary wastes is also essential.

Keywords: thorium (Th⁴⁺); radionuclides; thorium geochemistry; sorption; water and soil treatment; environmental safety.