

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРҒЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ

«Қ.И.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті» коммерциялық емес
акционерлік қоғамы

Ө.А. Байқоңыров атындағы Тау-кен металлургия институты

«Маркшейдерлік іс және геодезия» кафедрасы

Зейнеш Сымбат Асқарқызы

Ядролық нысандардың қоршаған ортаның топырақ – экологиялық
функцияларына әсерін зерттеу

ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС

6B07304 – Геокеңістік цифрлық инженерия

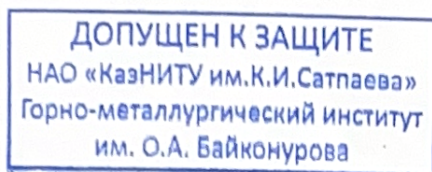
Алматы 2025

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРҒЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ

«Қ.И.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті»
коммерциялық емес акционерлік қоғамы

Ө.А. Байқоңыров атындағы Тау-кен металлургия институты

«Маркшейдерлік іс және геодезия» кафедрасы



ҚОРҒАУҒА ЖІБЕРІЛДІ

«Маркшейдерлік іс және геодезия»
кафедрасының меңгерушісі
т.ғ.к, қауым. профессор

_____ Г.Мейрамбек.
«16» 06 2025 ж.

ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС

Тақырыбы: «Ядролық нысандардың қоршаған ортаның топырақ-экологиялық
функцияларына әсерін зерттеу»

6B07304 – Геокеңістік цифрлық инженерия

Орындаған

Зейнеш С. А.



Ғылыми жетекші
PhD докторы, қауым. профессор
_____ Токтар М.
«05» 06 2025 ж.

Алматы 2025

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРҒЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ

«Қ.И.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті» коммерциялық емес
акционерлік қоғамы

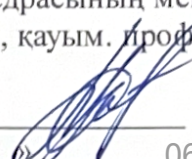
Ө.А. Байқоңыров атындағы Тау-кен металлургия институты

«Маркшейдерлік іс және геодезия» кафедрасы

6B07304 – Геокеңістік цифрлық инженерия

БЕКІТЕМІН

«Маркшейдерлік іс және геодезия»
кафедрасының меңгерушісі
т.ғ.к, қауым. профессор

 Г.Мейрамбек
« 16 » 06 2025 ж.

**Дипломдық жұмысты орындауға арналған
ТАПСЫРМА**

Білім алушы: Зейнеш Сымбат Асқарқызы

Тақырыбы: «Ядролық нысандардың қоршаған ортаның топырақ-экологиялық функцияларына әсерін зерттеу»

Университеттің 2025 жылғы «29» 01 №26 П/Ө бұйрығымен бекітілген

Аяқталған жұмысты тапсыру мерзімі: «18» маусым 2025 ж.

Дипломдық жұмыстың бастапқы деректері: 2017, 2025 жылдардағы Sentinel-2 спутнигінен алынған ғарыштық суреттер, QGIS, EO Browser бағдарламасы арқылы Дегелең массивінің NDWI, SAVI индекстерін салыстыруі;

Дипломдық жұмыста әзірлеуге жататын мәселелер тізімі:

- Sentinel -2 ғарыштық суреттерін зерттеу арқылы NDWI индекстерін салыстыру;*
- QGIS бағдарламасы және ғарыштық сурет арқылы Семей полигоны Дегелең массивінің радиоактивті ластанған топырағына сараптама жасау;*
- 2017, 2025 жылдардың Семей полигоны Дегелең массивінің радиоактивті ластанған топырағына SAVI индекстерін салыстыру;*
- радиоактивті заттардың топыраққа әсерін анықтау бойынша лабораториялық жұмыс.*

Графикалық материалдар тізімі (міндетті сызбаларды дәл көрсете отырып):

- Семей ядролық полигоны Дегелең массивінің картасы;
- Семей ядролық полигоны Дегелең массивінің нормалданған өсімдік индексінің картасы, топыраққа бейімделген индексі картасы.

Жұмыс презентациясы слайдтарда 13 көрсетілген

Ұсынылатын негізгі әдебиеттер 20 атаулардан

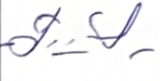
1 Насипова О.А., Правила и основные этапы рекультивации земель, июнь 2022г, <https://cyberleninka.ru/article/n/pravila-i-osnovnye-etapy-rekultivatsii-zemel/viewer>.

2 Хазиев Ф.Х. Почва и экология. Экология без почвы беспочвенна. 2017, <https://cyberleninka.ru/article/n/pochva-i-ekologiya/viewer>.

Дипломдық жұмысты дайындау
КЕСТЕСІ

Бөлімдер атауы, зерттеп дайындалатын мәселелер тізімі	Ғылыми жетекшіге көрсету Мерзімдері	Ескерту
Зерттеу объектісі жайында жалпы мәліметтер	26.01.2025	ноқ -
Объектіні зерттеу әдістері	19.02.2025	ноқ -
Негізгі бөлім	29.03.2025	ноқ -

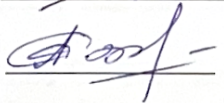
көрсетумен, кеңесшілері мен норма бақылаушының аяқталған жұмысқа қойған
қолдары

Бөлімдер атауы	Кеңесшілер, аты, әкесінің аты, тегі (ғылыми дәрежесі, атағы)	Қол қойылған Күні	Қолы
Зерттеу объектісі жайында жалпы мәліметтер	Тоқтар М. PhD докторы, қауымдастырылған профессор	26.01.2025	
Объектіні зерттеу әдістері	Тоқтар М. PhD докторы, қауымдастырылған профессор	19.02.2025	
Негізгі бөлім	Тоқтар М. PhD докторы, қауымдастырылған профессор	29.03.2025	
Норма бақылау	Ормамбекова А.Е. PhD докторы, аға оқытушы	16.06.25	

Ғылыми жетекші

 Тоқтар М.

Білім алушы тапсырманы орындауға алды

 Зейнеш С.А

Күні

« 10 » 02 2025 ж.

АНДАТПА

Бұл дипломдық жұмыста ядролық нысандардың топырақ экожүйесіне тигізетін ықтимал әсері ғылыми және қолданбалы тұрғыда жан-жақты зерттелді. Негізгі назар Семей ядролық сынақ полигонының тарихи-экологиялық ерекшеліктеріне, сондай-ақ радиоактивті элементтердің топырақ құрамына әсеріне аударылды.

Зерттеу барысында QGIS, EO Browser (Sentinel-2 суреттері) секілді бағдарламалық құралдар қолданылып, Дегелең массиві аумағының радиациялық-картографиялық бейнесі жасалды. Спутниктік суреттерден алынған NDVI индекстері негізінде өсімдіктердің күйі мен деградация дәрежесі бағаланды.

Нәтижесінде, *in situ* рекультивация мен фиторемедиация әдістерін біріктіре отырып, оларды «GRIBS» атты интеллектуалды бақылау жүйесі арқылы үйлестіру ұсынылды.

АННОТАЦИЯ

В данной дипломной работе всесторонне исследовано потенциальное влияние ядерных объектов на почвенную экосистему с научной и прикладной точек зрения. Основное внимание уделено историко-экологическим особенностям Семипалатинского ядерного испытательного полигона, а также влиянию радиоактивных элементов на состав почвы.

В процессе исследования использовались такие программные инструменты, как QGIS и EO Browser (снимки Sentinel-2), на основе которых была создана радиационно-картографическая визуализация территории массива Дегеле́нь. На основе NDVI-индексов, полученных со спутниковых изображений, была оценена степень деградации и состояние растительности.

В результате предложена координация методов *in situ* рекультивации и фиторемедиации с помощью интеллектуальной системы наблюдения под названием «GRIBS».

ANNOTATION

This thesis comprehensively examines the potential impact of nuclear sites on the soil ecosystem from both scientific and applied perspectives. The main focus is placed on the historical and ecological characteristics of the Semipalatinsk Nuclear Test Site and the effects of radioactive elements on soil composition.

During the study, software tools such as QGIS and EO Browser (Sentinel-2 imagery) were used to create a radiation-cartographic visualization of the Degelen massif area. Based on NDVI indices obtained from satellite images, the condition of vegetation and the degree of degradation were assessed.

As a result, it was proposed to combine *in situ* reclamation and phytoremediation methods, coordinated through an intelligent monitoring system called “GRIBS.”

МАЗМҰНЫ

Кіріспе	7
1 Ядролық нысандар және топырақтың экологиялық функциялары	8
1.1 Ядролық нысандардың түрлері мен сипаттамалық ерекшеліктері	8
1.2 Радиоактивті ластану көздері мен таралу жолдары	9
1.3 Топырақтың негізгі функциялары және экожүйеге төнетін қауіптер	11
2 Семей ядролық сынақ аумағы: тарихы және радиациялық әсердің топыраққа ықпалы	16
2.1 Ядролық сынақтардың кезеңдері және радиоактивті ластанудың географиялық көрінісі	16
2.2 Sentinel-2 мәліметтері негізінде NDVI суреттері арқылы радиациялық зақымдану аймақтарын	20
2.3 QGIS бағдарламасы арқылы құрастырылған Дегелең массивінің экологиялық картасын интерпретациялау	24
2.4 Лабораториялық зерттеулер арқылы топырақ құрамындағы физика-химиялық өзгерістерді бағалау	26
3 Радиоактивті ластанған топырақты қалпына келтіру әдістері мен стратегиялары	33
3.1 Топырақты қалпына келтіру әдістері	33
3.2 Шетелдік тәжірбие және Қазақстан үшін бейімделген тиімді әдістер	37
3.3 Семей жағдайына арналған қалпына келтіру стратегиясы мен ұсыныстар	40
Қорытынды	44
Пайдаланылған әдебиеттер тізімі	45
А қосымшасы	47

КІРІСПЕ

XX ғасырда адамзат тарихындағы ең ірі экологиялық және радиациялық апаттардың бірі – Семей ядролық сынақ полигонында жүргізілген ядролық жарылыстар салдары бүгінгі күнге дейін еліміздің қоршаған ортасына, топырақ экожүйесіне және халық денсаулығына елеулі қауіп төндіріп отыр. 1949–1989 жылдар аралығында 456 ядролық сынақ жасалып, оның салдарынан топырақ құрамында цезий-137, стронций-90, плутоний-239 және басқа да ұзақ өмір сүретін радионуклидтер жинақталды. Бұл қосылыстардың биосферада ұзақ сақталуы және олардың миграцияға бейімділігі аймақтық экожүйенің қалпына келуін қиындатады.

Семей полигоны аумағының ерекшелігі – шөлейт табиғат жағдайлары, сирек орналасқан халық және кең ауқымды радиациялық ластану – қалпына келтіру стратегиясын күрделі әрі көпдеңгейлі етіп жобалауды талап етеді. Осы дипломдық жұмыста Семей аймағын радиоэкологиялық тұрғыдан бағалап, заманауи әрі бейімделген қалпына келтіру әдістерін ұсыну көзделді.

Жұмыстың басты мақсаты – экологиялық, экономикалық және технологиялық тұрғыдан тиімді әрі тұрақты интеграцияланған рекультивация жүйесін ұсыну. Атап айтқанда, *in situ* рекультивация мен фиторемедиацияны біріктіріп, оларды GRIBS (Geo-Radiation Integrated Biocontrol System) деп аталатын георадиациялық басқару жүйесі арқылы үйлестіріп қолдану ұсынылады. Бұл жүйе тек мониторинг емес, нақты шешім қабылдау құралын ұсына отырып, әр аймаққа сай қалпына келтіру әдісін таңдауға мүмкіндік береді.

Жұмыстың құрылымы үш негізгі бағыттан тұрады. Бірінші бөлімде – ядролық ластанудың теориялық негіздері мен топырақтың экожүйедегі рөлі қарастырылады. Екінші бөлім – Семей ядролық сынақ полигоны мысалында жүргізілген зерттеулерге сүйене отырып, аймақтағы нақты экологиялық өзгерістерді сипаттайды. Үшінші бөлімде – шетелдік тәжірибелерге шолу жасалып, оларды Қазақстан жағдайына бейімдеу арқылы тиімді қалпына келтіру жолдары ұсынылады.

1 Ядролық нысандар және топырақтың экологиялық функциялары

1.1 Ядролық нысандардың түрлері мен сипаттамалық ерекшеліктері

Ядролық нысандар деп ядролық энергияны өңдеу, өндіру, қорда сақтау, сонымен қатар ядролық материалдармен жұмыс жасау үшін жасалынатын құрылғылар мен ғимараттарды айтамыз. Олардың басты мақсатына энергияны алу, радиоактивті заттарды, яғни қалдықтарды заласыздандыру, ұлттық қауіпсіздік үшін пайдаланылады. Олардың қызметтері түрлі әрі түрлерге де бөлінеді, сондықтан барлық объектілерге қатысты экологиялық және радиациялық қауіпсіздік стандарттары бекітілген [1].

Ядролық нысандардың түрлері :

- 1) Атом электр станциялары (АЭС);
- 2) зерттеу реакторлары;
- 3) ядролық отын өңдеу және байыту зауыттары;
- 4) радиоактивті қалдықтарды сақтау орындары;
- 5) ядролық қару нысандары және сынақ полигондары;
- 6) радиоизотоп шығаратын зауыттар [2].

Бұл тізбекте көрсетілген барлық ядролық нысандар "ядролық қауіпті объект"-ке жатады. Яғни өз аумағында жоғарыда көрсетілген ядролық материалдарды қолданатын немесе оларды сақтауға арналған инфрақұрылымы бар өндіріс орындарының барлығы қауіпті деп есептеледі.

Жалпы бұл нысандардың анықтамасы түсініктірек болуы үшін оларды екі топқа: бейбіт мақсаттағы және әскери мақсаттағы ядролық нысандар деп қарастыратын боламыз.

Зерттеу реакторлары, ядролық отынды байыту және өңдеу зауыттары, радиоактивті қалдықтарды сақтау орындары энергетика, медицина, ғылым секілді салаларға пайдалы мақсатта қолданылуына байланысты салыстырмалы түрде *"бейбіт мақсаттағы ядролық нысандар"* деп атай аламыз. Дегенмен бұл олардың жалпы қауіпті екенін жоққа шығара алмайды. Мәселен, АЭС-те радиациялық қалдықтардың үлкен көлемде пайдаланылуына байланысты, ол экологиялық қауіпі ең жоғары нысанға жатады. Сол секілді байыту, өңдеу зауыттарында да радиоактивті газдар мен сұйықтардың бөліну қауіпі бар, осыған сәйкес олардың топырақ пен жерасты суларына әсер ету қауіпінің де бар екенін сенімді түрде айта аламыз [2].

Екінші топқа қару жасау және сынақ үшін арналған *"әскери мақсаттағы ядролық нысандарды"* жатқызамыз. Ядролық зарядтар негізінен плутоний немесе уран негізінде дайындалады. Олар қатаң құпияда ұсталады сонымен қатар өте қауіпті болып келеді, себебі қандай да бір қателік немесе таралу салдары аса ауыр жағдайға әкелуі мүмкін. Сонымен қатар, ядролық жарылыстар өтетін сынақ полигондары бар. Олардың топыраққа, ауа мен суға тигізетін залалы өте ұзақ мерзімді. Жарылыстан бөлінетін радиацияның жер бетінде таралуы мутацияға, ауруларға, сонымен қатар тек адамзатқа емес табиғатқа да кері әсерін тигізіп, экожүйенің бұзылуына да себеп болады [2].

Ядролық энергетикалық реакторлар тұрақты тізбекті реакцияны бастау және басқару арқылы энергия өндіреді. Қазіргі уақытта әлемнің 32 еліндегі 400-ден астам осындай реакторлар әлемдегі электр энергиясының 10 пайызын қамтамасыз етеді [2].

1.2 Радиоактивті ластану көздері мен таралу жолдары

Радионуклидтер деп радиоактивті заттардың массалық саны бойынша әртүрлі, сонымен қатар атомдары тұрақсыз изотоптары аталады. Жалпы радионуклидтердің саны 1800-ден асады. Ядролық реакциялар барысында олар жаңа радионуклидтер синтездейді. Радиоактивті ластану - аумақтың не сол жердегі орналасқан нысандардың радиоактивті заттармен ластануы. Кей изотоптардың атомдары таралып, сәуле шығара алуының арқасында альфа, бета, гамма атты бөлшектерге бөлінеді. Олар адамзат пен қоршаған ортаға үлкен қауіп төндіреді [3].

Радиоактивті ластану көздерін екі топқа бөлуге болады : табиғи және антропогендік. Біріншісі табиғи жолмен болса, екіншісі адамның араласуынан пайда болған, яғни көбінесе өндірістік және ғылыми жұмыстардың нәтижесінде [4].

Табиғи радионуклидтерді бірнеше санатқа бөліп қарастыруға болады:

1. Ұзақ жартылай ыдырау кезеңімен сипатталатын, яғни ұзақ уақыт бойы радиоактивті қасиетін сақтайтын радионуклидтер;
2. Қысқа мерзімді өмір сүретін, жартылай ыдырау уақыты аз радионуклидтер;
3. Радиоактивті ыдырау тізбегіне жатпайтын, оқшау күйде болатын табиғи радионуклидтер;
4. Ғарыштан келетін бөлшектердің Жердегі атом ядроларымен әрекеттесуі нәтижесінде пайда болатын радионуклидтер [5].

Табиғи радиоактивті ластанудың басты себептері - радиоизотоптардың түзілуі, сонымен қатар ғарыштық сәулелену. Жер қойнауында немесе атмосферада табиғи түрде пайда болатын радиоактивті элементтер - табиғи нуклеидтер деп аталады. Табиғи ортада кездесетін радионуклидтер өздерінің пайда болу жолдары мен физикалық қасиеттеріне байланысты бірнеше топқа жіктеледі. Олардың ішінде ұзақ өмір сүретін түрлері (мысалы, уран мен торий изотоптары) жер қыртысында ежелден бері сақталып, геохимиялық процестерге әсер етеді. Қысқа мерзімді радионуклидтер керісінше, тез ыдырайтындықтан, табиғи ортада сирек әрі шектеулі мөлшерде кездеседі. Кейбір радионуклидтер ыдырау тізбегін қалыптастырмай, өз бетінше тұрақсыз күйінде қалады және бір ғана ыдырау арқылы бейтарап күйге өтеді [6]. Сонымен қатар, ғарыштан келетін жоғары энергиялы бөлшектердің атмосфера атомдарымен әрекеттесуі нәтижесінде түзілетін радионуклидтер де табиғи ластану көзіне жатады. Мұндай изотоптар, мысалы көміртегі-14, биосферада белгілі бір тұрақты радиациялық фон қалыптастырады. Бұл табиғи радионуклидтер ұзақ уақыт

бойы тірі ағзалар мен экожүйелерге әсер етіп, олардың құрамында да табылуы мүмкін [7].

Антропогендік радиоактивті ластану көздері:

1. Ядролық полигондар;
2. атом және жылу энергетикасы;
3. техногендік апаттар;
4. ғылым және медицина [7].

Ластанудың бұл түрі туралы толығырақ 1.1- кестеде көрсетілген:

Кесте 1.1 – Антропогендік ластану көздері мен олардың жалпы сипаттамалары [8]

Ластану көзі	Сипаттама	Радиоактивті заттар	Салдары
Ядролық полигондар	Ядролық қару сынақтары жүргізілген аймақтар. Радиоактивті заттар ашық ауада таралып, топырақ, су, тірі ағзаларға енеді.	Плутоний- 239, цезий – 137, стронций – 90.	Мутация, онкологиялық аурулар, экожүйенің бұзылуы.
Атом және жылу энергетикасы	АЭС- те өндірілетін энергия ядролық реакция арқылы алынады. Апаттық қауіп.	Уран – 235, технеций- 99, йод- 131.	Радиоактивті фонның артуы, судың және ауаның, топырақтың ластануы.
Техногендік апаттар	Өндірістік мекемелердегі авария, уран шахталары және сақтау қоймаларындағы қауіпсіздіктің бұзылуынан радиацияның таралуы.	Радон, уран, қалдықтардан таралған радиоизотоптар.	Топырақ пен су жүйесіне аса зиян, тыныс аурулары, жергілікті ластану.
Ғылым және медицина	Көбінесе диагностика мен терапияда пайдаланылатын радиоизотоптар дұрыс сақталмағаннан пайда болады.	Кобальт-60, йод- 131, цезий – 137.	Радиациялық қалдықтар, биологиялық ластану, генетикалық өзгерістер.

Атмосферадан бастап су, топырақ жүйелеріне дейін радиацияның таралу жолдары қатты әсер етеді. Осы процестердің нәтижесінде: экологиялық жүйелердің бұзылуы, жануарлар мен өсімдіктерге сонымен қатар адамзатқа да әкелетін зияндары секілді мәселелер туындай бастайды. Ластану көздерімен қатар, радиоактивті ластанудың таралу жолдарын да білу, олардың алдын алуға немесе заласыздандыруға көмектеседі [8]:

1. Атмосфералық таралу. Радиацияның ауада таралуының негізгі жолы. Ядролық қаруларды сынау, атом электр станцияларындағы апаттар немесе басқа да радиация түрлері ауаға радионуклидтерді шығарып, бұл заттар шаң немесе аэрозольдармен араласып, желдің әсерінен үлкен қашықтықтарға таралады. Жауын-шашын кезінде жер бетіне шөгіп, топырақ пен су көздерін ластайды [8].

2. Су арқылы таралу. Бұл таралу жолы ядролық апаттар мен өнеркәсіптік ластанулар барысында кең таралған құбылыс. Радиоактивті заттар су көзіне түсіп, олар өзендер, көлдер мен теңіздер арқылы таралып, экожүйелерге айтарлықтай қатер төндіреді, тіпті азық- түлік жүйесіне әсер етуі мүмкін. Сонымен қатар, су көздеріндегі радиация мөлшері экосистеманың компоненттерінің тұрақтылығына теріс әсер етеді, сәйкесінше бұл биоәртүрлілік пен экожүйенің функционалдық мүмкіндіктеріне қауіпті [8].

3. Топырақ арқылы таралу. Ядролық апаттар мен сынақтар нәтижесінде радиоактивті бөлшектер топыраққа түсіп, ұзақ уақыт бойы жиналып қалады. Бұл жағдай өсімдіктердің тамыры арқылы радионуклидтердің сіңуіне әкеліп, олардың қорғаныш қабілетін әлсіретеді. Радиациямен ластанған топырақ экожүйе қызметіне кері әсер етіп, жалпы өнімділікті төмендетеді [8].

4. Биологиялық тізбек арқылы таралу. Радиация биологиялық тізбек арқылы таралып, қоршаған ортаға айтарлықтай әсер етеді. Радиоактивті заттар алдымен топырақ пен өсімдіктерге сіңіп, кейін жануарлар мен адамдар ағзасына қоректену арқылы өтеді. Бұл процесте радионуклидтер бір ағзадан келесі ағзаға беріліп, олардың мөлшері арта түседі – бұл құбылыс биомагнификация деп аталады. Уақыт өте келе радиацияның жинақталуы экожүйенің тепе-теңдігін бұзып, тіршілік үшін елеулі қауіп тудырады [8].

1.3 Топырақтың негізгі функциялар және экожүйеге төнетін қауіптер

Ғалым В.И. Вернадскийдің пайымдауынша, топырақ – Жердің геосфералық құрылымындағы барлық қабаттарды: литосфераны, атмосфераны, гидросфераны және биосфераны өзара байланыстыратын ерекше буын болып саналады [9]. Ол тірі ағзалармен – өсімдіктермен, жануарлармен және микроорганизмдермен бірге күрделі экологиялық жүйелердің (экожүйелердің) құрылуына қатысады және табиғи үдерістердің реттелуіне елеулі әсер етеді. Топырақтың биосферадағы экологиялық қызметтері екі деңгейде қарастырылады: ғаламдық және биогеоценоздық. Ғаламдық деңгейде топырақ жер үсті және жерасты суларының қалыптасуына, атмосфералық ауаның

құрамына, литосфераның үгілу процестеріне және биосферадағы жалпы табиғи айналымдарға әсер етеді [9].

Топырақтың гидросфералық рөлі жауын-шашын суларын сіңіру мен жер асты суларына айналдыру арқылы көрінеді. Сонымен қатар, топырақ су ағынын реттеп, өзендердің гидрологиялық режимін қалыптастыруға қатысады. Ол суды сүзу, сіңіру және ластаушы заттардан қорғау функцияларын атқарады. Су айдындарының эвтрофикациясы да топырақпен тығыз байланысты [9]. Атмосфералық қызметі – топырақ пен ауа арасындағы газ алмасу, күн радиациясын жұту немесе шағылыстыру, ылғал айналымына қатысу және парниктік газдардың – көмірқышқыл газы, метан, азот оксидтері сияқты – шығарылуын қамтамасыз ету. Бұл процестердің барлығы атмосфераның құрамын тұрақтандыруда топырақтың рөлін көрсетеді [9]. Литосфералық қызмет тұрғысынан, топырақ жер бетіндегі қорғаныс қабаты ретінде әрекет етеді. Ол ағын сулар мен эрозиядан қорғайды, литосфераның химиялық құрамын биологиялық үдерістер арқылы өзгертіп отырады. Топырақ биосферада тіршілік ету ортасы ретінде ерекше маңызға ие. Ол күн сәулесін сіңіріп, энергия мен зат алмасуды қамтамасыз етеді, тірі ағзалар мен микроорганизмдер үшін тіршілік көзі болып табылады. Осы қызметтерінің арқасында топырақ биологиялық эволюцияның бір факторы ретінде де қарастырылады [9].

Биогеоценоздық деңгейде топырақ – экожүйелердің негізі. Оның өнімділігі, құнарлылығы және тірі ағзалармен байланысы экожүйенің жалпы жағдайын айқындайды. Агроэкожүйелерде бұл функция топырақтың құнарлы қабаты арқылы көрінеді. Соңғы жылдары экологиялық мәселелердің артуы көбіне антропогендік әсермен, атап айтқанда технологиялық процестердің дұрыс ұйымдастырылмауымен тікелей байланысты. Бұл бұзушылықтар бірінші кезекте топырақтың табиғи қасиеттеріне, оның құнарлылығына және экологиялық тұрақтылығына кері әсерін тигізеді [9]. Сондықтан да топырақ жамылғысын сақтау – биосфераны қорғаудың негізгі бағыттарының бірі және қазіргі заманның маңызды экологиялық әрі экономикалық міндеті болып табылады. Цезий-137, стронций-90, уран изотоптары сияқты радионуклидтер топырақ бөлшектерімен ұзақ уақыт байланыста болып, өсімдіктердің арқасында азық-түлік тізбегіне енеді, бұл процесс “биоаккумуляция” деп аталады. Бұл процесс экожүйе элементтері, яғни өсімдіктер мен тірі ағзаларға радиацияның таралу қауіпін тудырады [9]. Радиация әдетте топырақтың құрымын бұзудан бастайды, әрі қарай ылғал ұстау қабілеті төмендеуі де мүмкін [10,11].

Топырақтың радиоактивтілігі оның құрамындағы радионуклидтердің болуымен анықталады. Радиоактивтілік табиғи және жасанды болып екіге бөлінеді. Табиғи радиоактивтілік – бұл топырақта және оны түзуші жыныстарда әрдайым белгілі мөлшерде кездесетін табиғи радиоактивті изотоптармен байланысты құбылыс. Табиғи радионуклидтер үш негізгі топқа бөлінеді [10]:

1. Бірінші топқа радиоактивті элементтер жатады, яғни олардың барлық изотоптары радиоактивті: уран (^{238}U , ^{235}U), торий (^{232}Th), радий (^{226}Ra)

және радон (^{222}Rn , ^{220}Rn).

2. Екінші топқа радиоактивті қасиетке ие “әдеттегі” элементтердің изотоптары кіреді: калий (^{40}K), рубидий (^{87}Rb), кальций (^{48}Ca), цирконий (^{96}Zr) және тағы басқалары.

3. Үшінші топты атмосферада ғарыштық сәулелердің әсерінен пайда болатын радиоактивті изотоптар құрайды: тритий (^3H), бериллий (^7Be , ^{10}Be) және көміртек (^{14}C) [10].

Радионуклидтерді пайда болу жолына және уақытына байланысты да жіктелінеді. Олар мыналарға бөлінеді:

1. Бастапқы (алғашқы) – Жер планетасының қалыптасуымен қатар пайда болғандар (мысалы: ^{40}K , ^{48}Ca , ^{238}U);

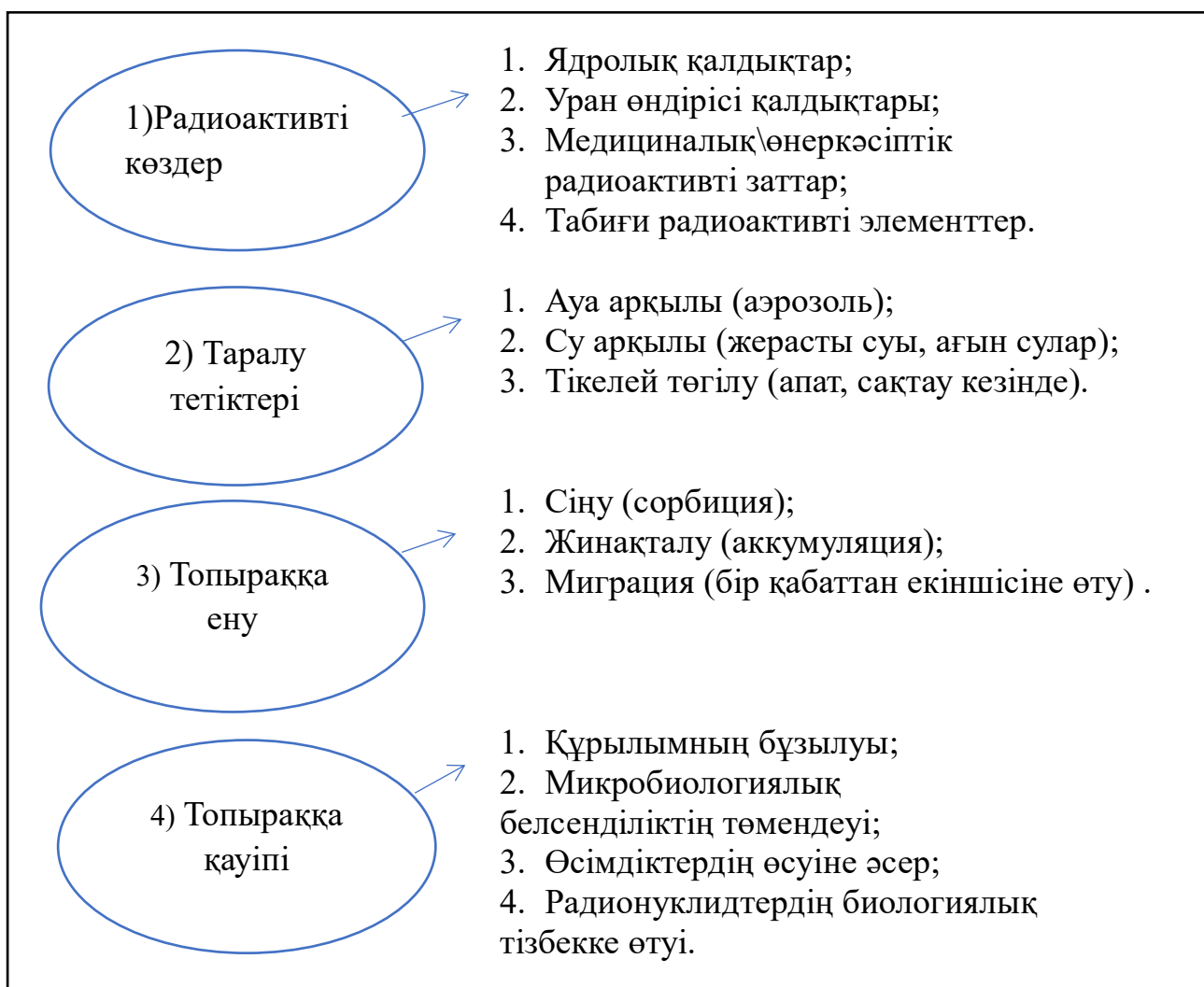
2. Екінші реттік – Бастапқы радионуклидтердің ыдырау өнімдері (мысалы: ^{232}Th , ^{235}U , ^{220}Rn , ^{222}Rn , ^{226}Ra және басқалары, жалпы саны – 45);

3. Индуцирленген – ғарыштық сәулелердің немесе екінші реттік нейтрондардың әсерінен пайда болған радионуклидтер (мысалы: ^{14}C , ^3H , ^{24}Na) [10].

Жалпы алғанда табиғи радионуклидтердің саны 300-ден асады. Табиғи радиоактивті изотоптардың топырақтағы мөлшері, ең алдымен, топырақ түзуші жыныстарға байланысты. Қышқыл жыныстардан түзілген топырақтарда радиоактивті изотоптар көбірек болады, ал негізгі және ультранегізгі жыныстарда түзілгендерде олардың мөлшері аз болады [10]. Сонымен қатар, ауыр құрылымды топырақтарда жеңіл құрылымды топырақтарға қарағанда радионуклидтер көбірек шоғырланады. Көп жағдайда, табиғи радиоактивті элементтер топырақтың бүкіл кескінінде біркелкі таралады, алайда кейде олар иллювиалды және глейлі горизонттарда жинақталуы мүмкін. Бұл элементтер топырақта көбінесе берік байланысқан формада кездеседі [10].

Ал топырақтың жасанды радиоактивтілігі – бұл ядролық және термоядролық жарылыстардың нәтижесінде немесе атом өнеркәсібінің қалдықтарымен, сондай-ақ ядролық апаттар салдарынан топыраққа радиоактивті изотоптардың түсуімен байланысты. Сондай-ақ, кей жағдайда радиациялық сәулелену нәтижесінде топырақта жаңа радионуклидтердің пайда болуы мүмкін (наведённая радиация). Жасанды радиоактивті ластануға жиі себеп болатын изотоптар: ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{129}I , ^{131}I , ^{140}Ba , ^{106}Ru , ^{90}Sr , ^{137}Cs және басқа да радионуклидтер [10].

Топырақтың радиациямен ластануы бірнеше онжылдықтарға жалғасып, сақталады. Топырақты қайта қалпына келу процессі болса өте баяу жүреді. Осы себеппен де топырақтың радиациялық ластануы- топырақ жүйесіне төнетін ең қауіпті және ұзақмерзімді экологиялық аса қатерлі мәселелердің бірі болып саналады. 1.1-суретте топырақтың ластануының қадамды схемасы көрсетілген [10,11]:



1.1-сурет – Топырақтың ластануының қадамды схемасы [10,11]

Сонымен қатар қазіргі кезде топыраққа өзекті қауіптердің бірі – атом электр станциясының апатты жағдайы. Қазақстанда атом электр станциясын (АЭС) салу мәселесі соңғы жылдары өте белсенді талқыланып келеді. Энергетикалық қауіпсіздікті қамтамасыз ету және электр тапшылығын шешу мақсатында Алматы облысы, Жамбыл ауданы, Үлкен ауылында АЭС салу жоспарланып жатыр [12]. ҚР Энергетика министрлігі мен «Қазақстандық атом электр станциялары» ЖШС-ның зерттеу қорытындылары бойынша, Үлкен ауылы экологиялық және техникалық тұрғыдан ең тиімді жер ретінде анықталған. Балқаш көлінің маңындағы оңтүстік аймақта орналасқан Үлкен ауылында энергия тапшылығы байқалған. Оған қоса ірі өнеркәсіптік кәсіпорындар шоғырланғандықтан осы мекен таңдалынды [12].

Атом электр станциялары (АЭС) қалыпты жағдайда жұмыс істегеннің өзінде топырақ экожүйесіне әсер етуі мүмкін. Ауаға таралатын газ тәрізді және аэрозольді радиоактивті заттар – криптон-85, йод-131, стронций-90 секілді элементтер – топырақ бетіне шөгіп, оның жоғарғы қабаттарында жинала отырып, химиялық құрамының өзгеруіне алып келеді. Мұндай өзгерістер

топырақтағы микроорганизмдердің тепе-теңдігін бұзып, оның құнарлылық деңгейінің төмендеуіне әкеп соғуы ықтимал [13]. Сондай-ақ, радиоактивті қалдықтарды арнайы оқшауланған қоймаларда ұзақ мерзімге қауіпсіз сақтау талап етіледі. Егер мұндай қоймалардың герметикалығы жеткіліксіз болса, радионуклидтердің топыраққа өтіп кету қаупі артады. Бұл жағдай ұзақ мерзімді ластануға себеп болып, ауыл шаруашылығына жарамды жерлерді пайдалануды шектейді [13].

Апаттық жағдайлар орын алған кезде, мысалы, Чернобыль АЭС-індегі оқиға барысында, радиоактивті заттар топырақтың жоғарғы қабаттарында ұзақ уақыт сақталып қалуы мүмкін. Бұл жағдай жұқтырылған аумақтарды ондаған жылдар бойы пайдалануға мүмкіндік бермей, ауқымды дезактивациялық шараларды талап етеді [13].

Қазақстандағы АЭС құрылысы – бұл тек энергетикалық қажеттілік емес, стратегияны қажет ететін үлкен мәселе. Экожүйені, әсіресе топырақ пен су ресурстарын қорғау мәселесімен тығыз байланысты. Сондықтан АЭС салынған жағдайда, ол қатаң экологиялық қауіпсіздік шараларымен бірге жүзеге асырылуы қажет.

2 Семей ядролық сынақ аумағы: тарихы және радиациялық әсердің топыраққа ықпалы

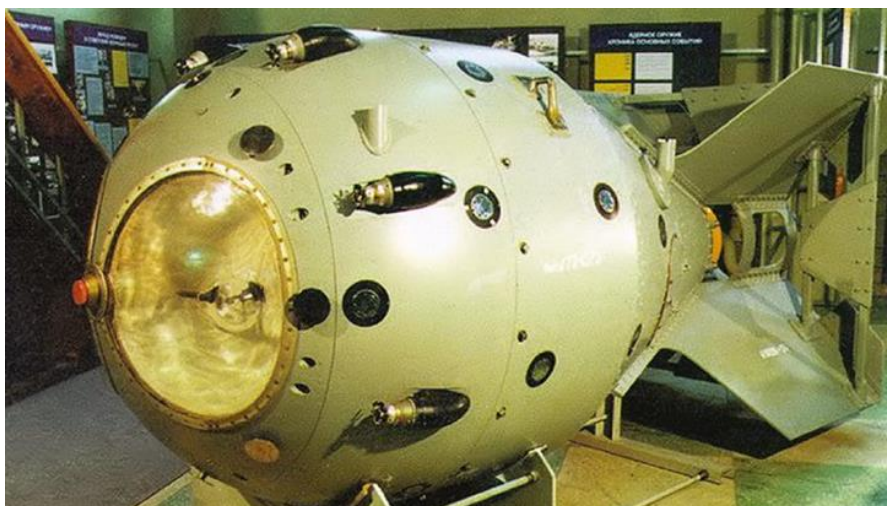
2.1 Ядролық сынақтардың кезеңдері мен радиоактивті ластанудың географиялық көрінісі

Жетекші державалар Екінші Дүниежүзілік соғыс кезінде ол кездегіден де мықты қару дайындау үшін көптеген зерттеулер өткізді. Шайқастың аяқталуына аз қалғанда қарудың жаңа түрін ойлап тапты, ол – ядролық бомба. Ең алғашқы сынақтар АҚШ тарапынан Жапония аумағында жүргізілді, 1945 жылы 6 және 9 тамыз күндері Хиросима мен Нагасаки қалаларына екі бомба тасталды [14].

Кеңес Одағы да мұндай қару түрін жасауға талпынды, дегенмен уақыт жағынан артта қалып қойды. 1946 жылы КСРО Министрлер Кеңесінің жанынан уран кен орындарын іздеу және өндірумен айналысатын Бас басқарма құрылды. Бұл басқармаға атом бомбасын жасау міндеттері де жүктелді. Жобаның барлық барысын Л.П.Берия қадағалап, ол операцияның егжей-тегжейін И.В.Сталинге тікелей баяндап отырды. Осы атом қаруын жасау үшін әскери-өнеркәсіп кешенінің барлық мүмкіндіктері, осы саладағы үздік ғалымдар мен инженерлер сонымен қатар қарапайым жұмысшылар да жұмылдырылды. Бұрын-соңды болмаған жаңа сала – атом өнеркәсібін қалыптастыру қажет болды [14]. 1946 жылдың 25 желтоқсанында Кеңес Одағында алғаш рет И.В.Курчатовтың жетекшілігімен басқарылатын тізбекті реакция іске сәтті қосылды. Ал 1947 жылдың тамыз айында «№2 Оқу полигонын» салу туралы шешім қабылданды. Полигон орны таңдалғанда бірнеше маңызды факторлар – аумақтың кеңдігі, халықтың сиректігі, теміржол мен әуежайдың болуы секілді жағдайлар ескерілді. Үкімет өкілдері мен ғалымдардың пікірінше, бұл талаптарға ең сәйкес келетін аймақ – Семей қаласы маңындағы қазақ даласы болды [14].

Алғашқы ядролық сынақ 1949 жылы 29 тамызында сағат 6.30-да Абай және Абыралы аудандарында халыққа алдын ала ескертілместен өтті. 22 килотонна қуаттылықтағы атом бомбасы сыналды (2.1-сурет, 2.2-сурет). Бұл сынақты «жоғары» мемлекеттік комиссиясы сәтті деп жариялады. Осы сәтті сынақтан соң Семей полигонында ядролық қару сынақтары ретті түрде жүргізілуі қажет деп шешім қабылданды [14].

Әр түрлі мақсаттағы құрылымдар: шахталар, ғимараттар, бақылау мұнаралары және тағы басқа қажетті нысандар қазақ даласында үлкен аумаққа салынды. Кейбір сынақ алаңдарының ауданы 300 шаршы шақырымға дейін жеткен. Атом жарылысының әсерін зерттеу үшін бомбалар алаңның дәл ортасына орналастырылып, айналасына әртүрлі нысандар, оның ішінде үй жануарлары да қойылды [14].



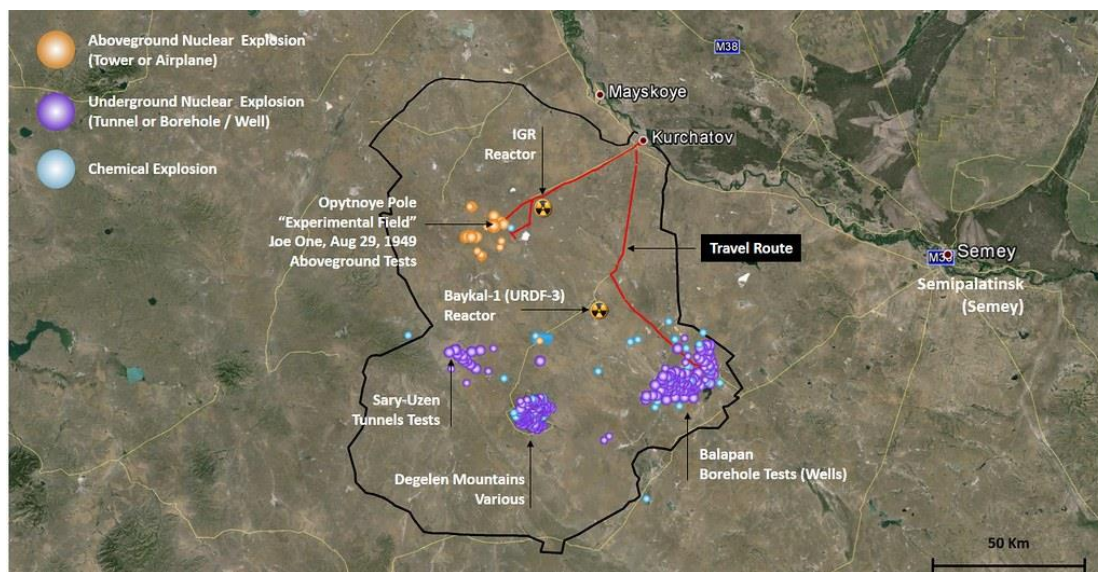
2.1-сурет – 1949 жылы 29 тамызда Абай және Абыралы аудандарында халыққа алдын ала ескертілместен сынақтан өткізілген РДС-1 сутегі бомбасы [14,15].



2.2-сурет – 1949 жылы 29 тамызда Абай және Абыралы аудандарында болған жарылыс көрінісі [14,15].

Негізгі сынақ аймағынан өзге де бірқатар нысандар орналастырылған: әскер штабы, ядролық зарядтарды жинайтын пункт, командалық орталық, әскери бөлімдер мен әкімшілік орталық. Әскери гарнизон құпия атаумен «Москва – 400» деп аталған. Ірі сынақ алаңдарының қатарында «Балапан» ерекше орын алса, «Г» алаңы таулы жерде орналасқан. Ал «10-алаң» ғылыми-

техникалық база ретінде қызмет атқарған (2.3-сурет). Барлық осы нысандардың құрылысына шамамен 183 миллион рубль жұмсалып, бұл соғыстан кейінгі қиын кезеңде ел бюджетіне елеулі ауыртпалық әкелді [14,15].

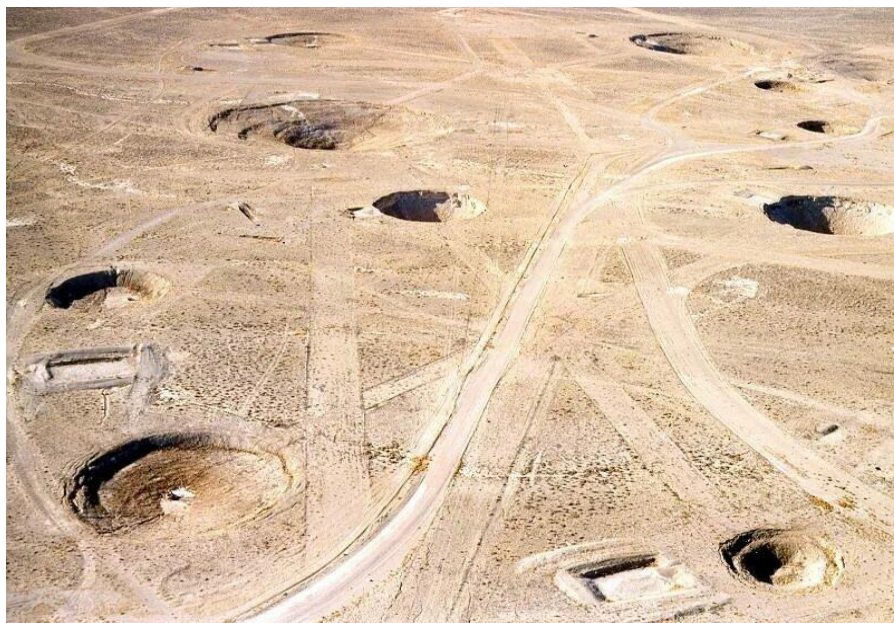


2.3-сурет – Семей сынақ полигонының жалпы картасы

1955 жылдың 22 қарашасында Семей полигонында алғашқы рет сутегі бомбасының сынағы өткізілді. Бұл жарылыс ашық атмосферада, шамамен 1500 метр биіктікте жүзеге асырылып, соққы толқыны 500 шақырымнан астам аумаққа таралды. Сол кезеңде КСРО мен АҚШ арасында әскери қуатты арттыру жарысы күшейіп, жылына 50-ге жуық ядролық сынақ өткізіліп отырды. Алғашқы сынақтар ашық түрде – жер үстінде және ауада жүргізілді. Тек 1963 жылы жер үсті мен атмосферада ядролық сынақтарды жүргізуге тыйым салатын халықаралық келісімге қол қойылған соң, сынақтар жер астында жасала бастады. Дегенмен, кейбір жер асты жарылыстары таяз қабаттарда жүзеге асырылып, радиациялық қалдықтар жер бетіне шықты. Бұл өз кезегінде табиғат пен адамдарға зиян келтірді [14,15]. Мысалы, 1987 жылы қуаттылығы 20-дан 150 килотоннаға дейін жеткен 18 ядролық жарылыс тіркелген болатын. Елде сол уақытта «Қайта құру» кезеңі жүріп жатса да, полигон жұмысы тоқтаған жоқ [14,15].

Жер асты сынақ өткізу орындары. Бұл арада жыл сайын 14-18 ядролық сынақ өткізіліп тұрған. Осынау жарылыстың салдарынан бір кездері жартастардан құралған Дегелең тауы қиыршық тас үйіндісіне айналды. Жер астындағы әрбір үшінші жарылыстан соң, жарылыс нәтижесінде пайда болған жарықтар мен саңылаулардан радиоактивті газ шығып кетіп жатқан. 1989 жылы 12 ақпанда кезекті жоспарлы ядролық сынақ өткізілген кезде, үңгірлердің бірінде қуаты 70 килотоннадан астам ядролық заряд жарылған. Соның салдарынан жер бетінде саңылаулар пайда болып, олардан екі тәулік бойы

радиоактивті газдар шығып жатқан [14,15]. Олардың бейнесі 2.4-сурет және 2-5-суретте көрсетілген.



2.4-сурет – Ядролық сынақтар нәтижесінде пайда болған ядролық шұңқырлар [14,15].



2.5- сурет – Ядролық сынақтар нәтижесінде пайда болған ядролық кратерлер [14,15].

1989 жылдың ақпан және сәуір айларындағы ядролық сынақтар қоғамда үлкен алаңдаушылық туғызып, халық тарапынан наразылықтар өрши түсті. Қоршаған орта мен тұрғындардың денсаулығына тиген зиян қоғамдық қозғалыстардың пайда болуына түрткі болды. Осы күресте ерекше белсенділік

танытқан тұлға – белгілі ақын және жазушы Олжас Сүлейменов болды [14,15]. Ол “Невада – Семей” атты антиядролық қозғалысты бастамалап, әлемдегі екі ірі сынақ алаңына – АҚШ-тағы Невада мен КСРО-дағы Семейге қарсы халықаралық қозғалысты өрістетті. Бұл бастама ядролық сынақтарға мораторий енгізуге мүмкіндік берді. Халықтың наразылығының басты себептеріне жарылыс нәтижесінде топырақтан бастап адамға дейін зиян келтірді. Яғни полигон маңындағы тұрғындар өз еркінен тыс тәжірибие нысанына айналды. Тіпті мемлекет оларды дұрыс қорғап, өтемақы төленбей, әлеуметтік жағдайы өте төмен күйде қалды [14,15]

Нәтижесінде, 1991 жылғы 29 тамызда Қазақстан Республикасының Президенті Нұрсұлтан Назарбаевтың Жарлығымен Семей ядролық полигоны ресми түрде жабылды. Заң жүзінде ондай шешім қабылдау құқығы болмағанымен, Президент өзіне жүктелген моральдық жауапкершілікті алдыңғы орынға қойды [14,15].

Қазақстан тәуелсіздік алғаннан кейін ядролық қарудан түбегейлі бас тарту саясатын ұстанып келеді. Ел бұл мәселеде өз ұстанымын айқын көрсетіп, ядролық қауіпсіздік пен бейбіт өмірді басты құндылық ретінде таңдады. 1992 жылы Қазақстан Лиссабон хаттамасына қол қойып, өзінің аумағын ядролық қарудан азат аймақ деп жариялады. Бұл қадам – еліміздің халықаралық аренада бейбітшілікті қолдайтынын және жаппай қырып-жою қаруынан бас тартуға дайын екенін дәлелдеді [14,15].

Кейін, 1994 жылы Будапештте өткен келіссөздер нәтижесінде, Қазақстан, Беларусь және Украина өз аумағындағы ядролық арсеналдан бас тартты. Осы шешімге жауап ретінде АҚШ, Ресей және Ұлыбритания, кейіннен Қытай мен Франция аталған елдердің қауіпсіздігі мен шекарасының тұтастығына кепілдік берді. Барлық ядролық оқтұмсықтар Ресей Федерациясына берілді. Бүгінде бұрынғы Семей ядролық сынақ алаңы ресми түрде Семей ядролық зерттеу полигоны деп аталады. Бұл аумақта қазір әскери емес мақсатта түрлі зерттеу жұмыстары жүргізілуде. Атап айтқанда, ауыл шаруашылығы, геологиялық барлау және кен өндіру салаларында ғылыми-зерттеу мен тәжірибелік жұмыстар жүзеге асып жатыр [14,15].

2.2 Sentinel-2 мәліметтері негізінде NDVI суреттері арқылы радиациялық зақымдану аймақтарын талдау

Дегелең массиві – Семей ядролық сынақ полигоны аумағында орналасқан жоталы-тау сілемі, ол ядролық жерасты сынақтарының негізгі бөлігі жүргізілген нысан ретінде ерекше маңызға ие. Географиялық орналасуы бойынша бұл аймақ Шығыс Қазақстан облысының Абай ауданында орналасқан, шамамен 49.76° солтүстік ендік пен 78.04° шығыс бойлық координаттарында.

Дегелең аумағы тау-белесті рельефпен сипатталады және полигонның ішкі құрылымында орталық бөлікті алып жатыр. Аймақтың орташа биіктігі 600–800 метр аралығында. Дегелең массивінің бетіндегі геоморфологиялық

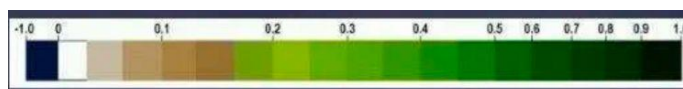
құрылымдар бірнеше ондаған жылдар бойы жүргізілген ядролық жарылыстардың әсерінен өзгеріске ұшыраған. Әсіресе жерасты жарылыстары нәтижесінде жер бедерінде жасанды кратерлер, жарықтар мен шөгу аймақтары қалыптасқан. Топырақ жамылғысы негізінен ашық қоңыр және қоңыр топырақ түріне жатады. Бұл топырақтар жартылай шөлейттік аймақтарға тән, органикалық заттар мөлшері аз, құрылымы борпылдақ, ал ылғалдылық режимі әлсіз. Аталған факторлар радиациялық ластану кезінде топырақтың өздігінен қалпына келу процесін баяулатады.

Дегелең массиві елді мекендерден едәуір алшақ орналасқан. Ең жақын елді мекен – Курчатов қаласы, ол шамамен 50–55 км қашықтықта орналасқан. Бұл арақашықтық ядролық сынақтардың радиациялық қауіпсіздік талаптарына сай таңдалғанымен, ауа мен су арқылы таралатын радионуклидтер Курчатов маңына дейін жеткен деген ғылыми деректер бар. Қазіргі уақытта Дегелең массивінің беткі қабатында ешқандай шаруашылық жүргізілмейді, бірақ экожүйелік мониторинг пен қалпына келтіру жұмыстарын бастау үшін бұл аумақ нақты ғылыми зерттеулерге жиі таңдалады. Жер бедері мен топырақ құрылымы бұл аймақты сынақтың ұзақмерзімді салдарын зерттеу үшін ерекше үлгілік нысанға айналдырды.

Семей ядролық жарылысы басымырақ болған Семей қаласы Дегелең массивінің NDVI суреттеріне 2017 және 2025 жылдарға салыстырмалы талдау жүргізілді. Зерттеу барысында Sentinel-2 спутнигінің деректеріне негізделген NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) көрсеткіштері вегетациялық өзгерістер бағаланды. EO Browser платформасы көмегімен алынған NDVI карталары зерттеу аймағындағы экожүйе жағдайының динамикасын көрсетуге мүмкіндік берді. Төменде NDVI индексінің бағалану шкаласы 2.1-кесте мен 2.6-суретте көрсетілген :

Кесте 2.1 – NDVI индексінің бағалану шкаласы

№	NDVI мәні	Экологиялық интерпретация
1	-1.0 – 0.0	Су, қар, тас немесе басқа өсімдіксіз беттер.
2	0.0 -0.2	Өсімдік мүлде жоқ немесе өте сирек .
3	0.2 – 0.3	Әлсіз вегетация, қалпына келу белгілері жаңа байқала бастаған.
4	0.3 – 0.5	Орташа вегетациялық белсенділік, шөпті-бұталы жабындар
5	0.5 – 0.7	Қалың өсімдіктер (егістік жерлер, ормандардың шеті)
6	0.7 – 1.0	Тығыз, дені сау өсімдік жамылғысы



2.6-сурет – NDVI индексінің бағалануының түсті шкаласы

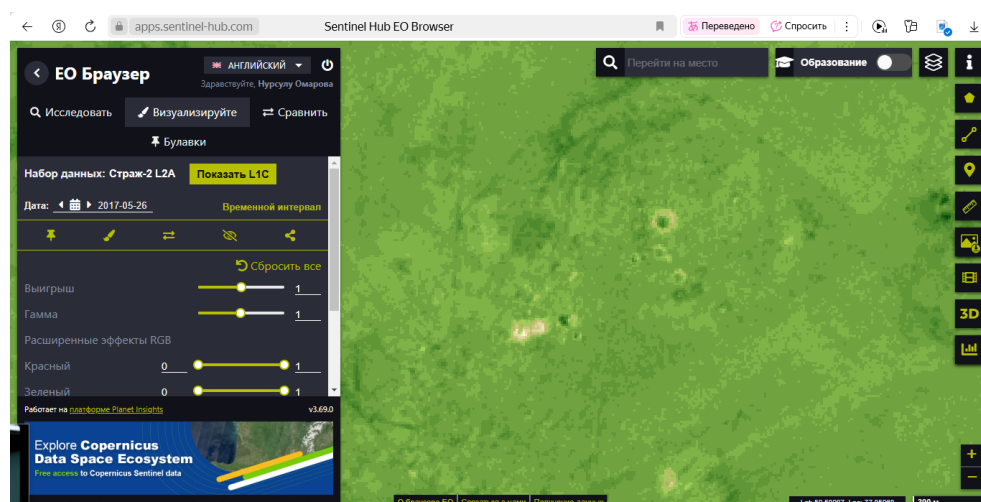
NDVI формуласы:

$$NDVI = (NIR - Red) \setminus (NIR + Red) \quad (1)$$

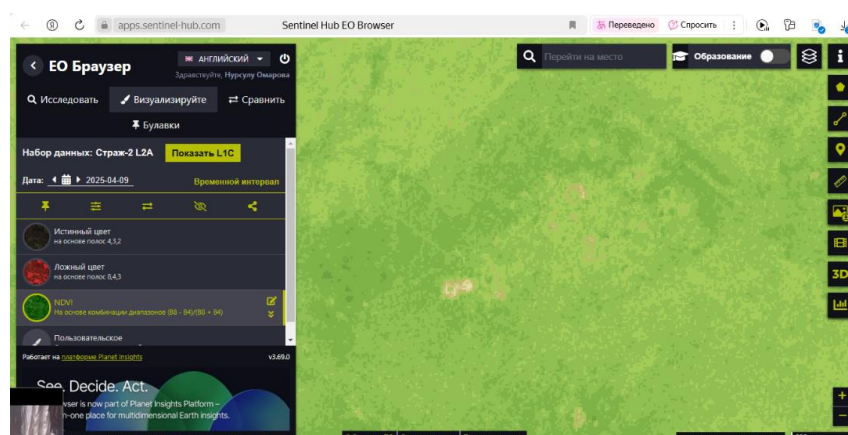
мұндағы NIR (Near-Infrared) – жақын инфрақызыл диапазон B08 (Band 8);

Red – көрінетін спектрдегі қызыл диапазон, B04 (Band 4).

2017 жылғы NDVI суретінде зерттеліп отырған Семей қаласы Дегелең массивінің көп бөлігінде өсімдік жамылғысының әлсіз екені байқалады. NDVI мәндері негізінен 0.18 деңгейінде, бұл аймақтың деградацияланған, биологиялық белсенділігі төмен топыраққа ие екенін білдіреді. Сонымен қатар, жер бетіндегі ядролық жарылыс кратерлері айқын көрінеді, олар көбіне өсімдік өсуіне қолайсыз экологиялық жағдаймен байланысты (2.7 сурет).



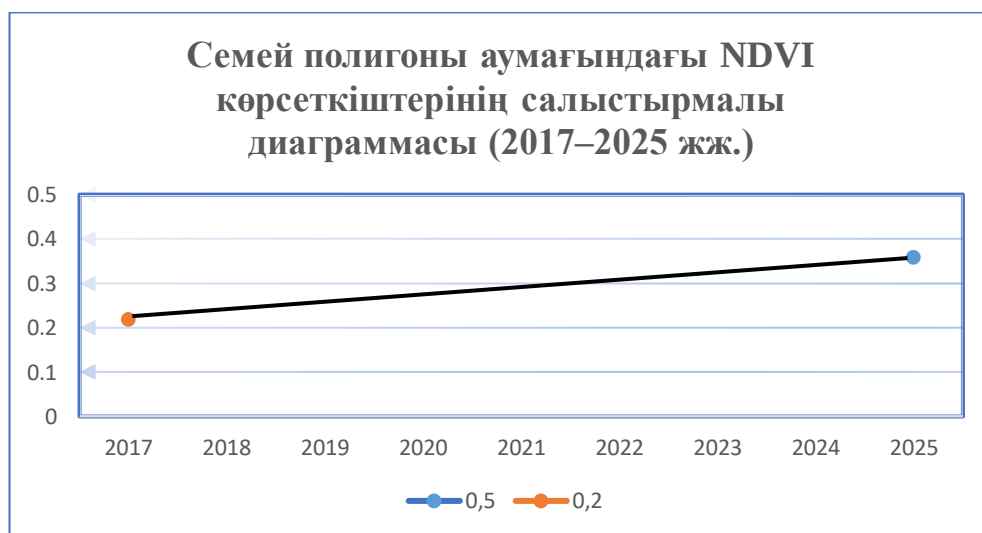
2.7-сурет – Sentinel-2 спутнигінің негізінде алынған NDVI карта (2017ж). NDVI төмен мәндер аймақтағы деградация деңгейін көрсетеді



2.8-сурет – NDVI карта (2025 ж.). Жартылай қалпына келу белгілері байқалады, жасыл реңктер вегетацияны білдіреді

2025 жылғы NDVI суретінде осыған дейінгі жарылыс орындарының айналасында NDVI мәндерінің салыстырмалы түрде жоғарылағаны байқалады. Кейбір учаскелерде көрсеткіш 0.35 деңгейіне жетіп, бұл экожүйенің қалпына келуінің ішінара жүріп жатқанын көрсетеді. Дегенмен, кратерлер саны визуалды түрде біршама азайғанымен, бұл вегетациямен жабылғанын немесе суреттің ажыратымдылығы мен жарық жағдайына байланысты көзге көрінбейтінін де білдіруі мүмкін. Жалпы, NDVI динамикасы зерттелген аумақтағы табиғи рекультивация үдерісінің басталғанын көрсетеді. Алайда бұл өзгерістер айтарлықтай күрделі емес, және экожүйенің толық қалпына келуіне әлі де ұзақ уақыт қажет екенін көрсетеді (2.8 сурет).

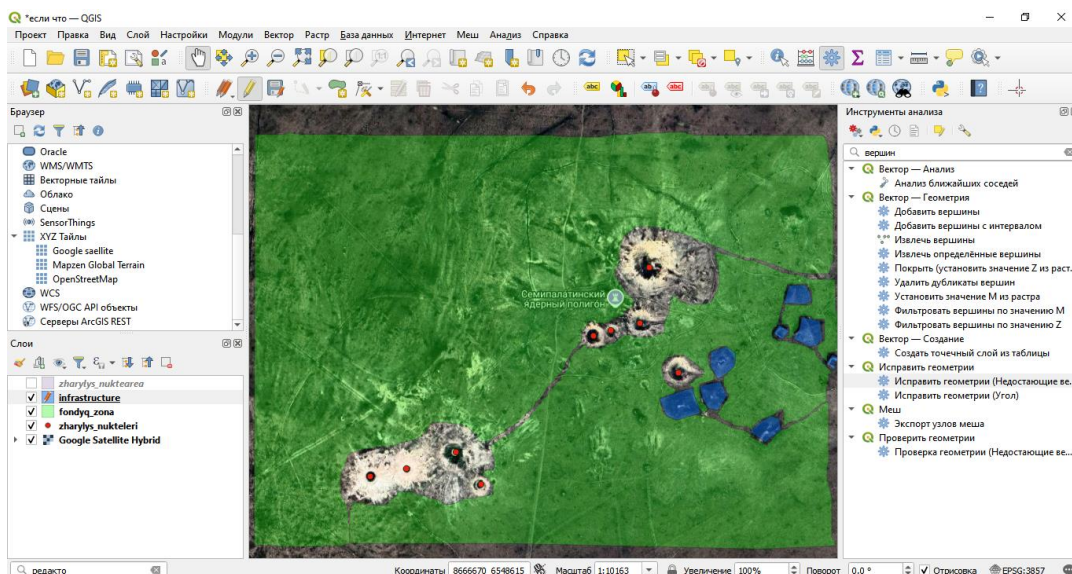
Сонымен қатар, табиғи түстегі ғарыштық сурет пен салыстырмалы NDVI карталары Қосымша А-да көрсетілген (А-1 сурет – Семей ядролық полигоны Дегелең массивінің табиғи (True Color) суретінің 26.05.2017 күні түсірілген суреті, А-2 сурет – Семей ядролық полигоны Дегелең массивінің табиғи (True Color) суретінің 09.04.2025 күні түсірілген суреті).



2.9-сурет – Семей полигоны аумағындағы NDVI көрсеткіштерінің салыстырмалы диаграммасы (2017-2025жж.)

Бұл диаграммада Семей ядролық сынақ полигоны аумағындағы NDVI көрсеткіштерінің 2017 және 2025 жылдар аралығындағы өзгерісі бейнеленген. NDVI мәндерінің 0.22-ден 0.36-ға дейін өсуі зерттелген аймақтағы өсімдік жамылғысының біртіндеп қалпына келе бастағанын көрсетеді (2.9-сурет). Бұл өзгеріс, ең алдымен, радиациялық ластанудың салыстырмалы түрде азаюымен және табиғи рекультивациялық процестердің белсенділігімен түсіндіріледі. Диаграмма ЕО Browser платформасынан алынған визуалды спутниктік деректер негізінде құрастырылған.

2.3 QGIS бағдарламасы арқылы құрастырылған Дегелең массивінің экологиялық картасын интерпретациялау



2.10-сурет – QGIS бағдарламасында Дегелең массивінің объекттерін белгілеу

Бұл зерттеу аясында Дегелең массиві аумағында орын алған ядролық сынақтардың кеңістіктік салдарын визуалды түрде көрсету мақсатында QGIS бағдарламалық қамтамасыз етуі қолданылды. QGIS – географиялық ақпараттық жүйелердің бірі ретінде кеңістіктік деректермен жұмыс істеуге мүмкіндік беретін ашық бағдарламалық платформа. Картографиялық негіз ретінде спутниктік суреттер және онлайн карталар қолданылды. Осы суреттерге сүйене отырып, келесі объектілер цифрлық түрде векторлық қабаттар ретінде белгіленді (2.10-сурет):

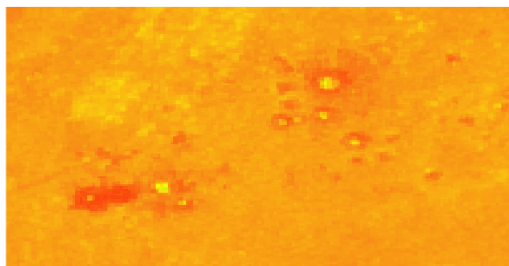
1. Ядролық жарылыс орындары (нүктелік қабат) – тарихи деректер мен визуалды бақылау негізінде анықталып, картада қызыл түсті белгілермен көрсетілді. Бұл нүктелер Дегелең тау сілемінің әр аймағында шашыраңқы орналасқан және экожүйеге ең үлкен радиациялық зақым келтірген ошақтар ретінде тіркелді.

2. Фондық зоналар (полигон қабаты) – радиациялық әсерден салыстырмалы түрде аз зардап шеккен аумақтар. Бұл аймақтар картада жасыл түспен белгіленіп, NDVI көрсеткіштері мен визуалды бақылау негізінде таңдалды. Олар зерттеу үшін салыстыруға жарамды экологиялық "таза" эталондық үлгі ретінде қарастырылды.

3. Инфрақұрылым қалдықтары (полигон қабаты) – ядролық сынақ жүргізу кезінде пайдаланылған немесе сол мақсатта құрылған нысандар (мысалы, бақылау бекеттері, платформа қалдықтары). Бұл құрылымдар картада көк түспен белгіленіп, тарихи инженерлік кешендердің орнын бейнелейді.

Карта QGIS бағдарламасының макет құрастыру модулі арқылы дайындалды.

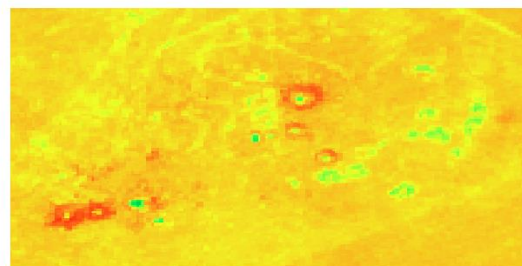
Семей ядролық полигонының Дегелең массивіндегі SAVI индексі,
2017ж



Шартты белгілер

SAVI_2017ж
Канал 1
1
0
Масштаб: 1:5000

Семей ядролық полигонының Дегелең массивіндегі SAVI индексі,
2025ж



Шартты белгілер

SAVI_2025
Канал 1 (Серий)
1
0
Масштаб: 1:5000

2.11-сурет – 2017 және 2025 жылдарға арналған SAVI индексінің кеңістіктік көрінісі (салыстырмалы карта).

SAVI (Soil-Adjusted Vegetation Index) — жер бетіндегі өсімдік жамылғысын спутниктік суреттер негізінде бағалауға мүмкіндік беретін вегетациялық индекс. Бұл көрсеткіш NDVI индексіне ұқсас, бірақ оның айырмашылығы — топырақтың шағылыстыру әсерін азайту үшін арнайы түзету коэффициенті (L) қолданылады. Сондықтан SAVI индексі өсімдіктер сирек орналасқан, топырақтың рөлі жоғары аймақтарда дәлірек нәтиже береді. Индекс өсімдіктердің жалпы жағдайын, олардың даму деңгейін және деградация дәрежесін бағалауға мүмкіндік береді. SAVI индексінің есебі келесі формуламен жүргізілді:

$$SAVI = \frac{(NIR - Red) \cdot (1 + L)}{(NIR + Red + L)} \quad (2)$$

мұндағы NIR — жақын инфрақызыл диапазон (B08),

Red — қызыл диапазон (B04),

L — түзету коэффициенті (0.5).

Есептелуі: $((B08 - B04) / (B08 + B04 + 0.5)) \times (1 + 0.5)$

SAVI көрсеткіштерінің мәні 0 мен 1 аралығында болады. 1-ге жақындаған сайын өсімдік тығыздығы артады. Индекс арқылы екі түрлі уақыттағы жер жамылғысының жай-күйін салыстырмалы түрде бағаланды (2.11-сурет).

Талдау нәтижесінде алынған 2017 және 2025 жылдарға арналған карталар SAVI индексі бойынша өсімдіктік жамылғыда елеулі өзгерістердің орын алғанын көрсетті:

- 2017 жылғы картада SAVI мәндері негізінен төмен (0.1–0.4 аралығында) болып, өсімдік жамылғысының сирек екенін көрсетті. Бұл кезеңде топырақ жамылғысының басым болғанын байқауға болады.

- 2025 жылғы картада SAVI мәндері біршама артқан (0.5–0.75 және одан да жоғары), бұл жасыл өсімдіктердің көбеюін, немесе егін шаруашылығының кеңеюін көрсетуі мүмкін.

Бұл салыстыру 2025 жылы Дегелең массивінде рекультивация, жасылдандыру шаралары жүргізілгені байқалады.

2.4 Лабораториялық зерттеулер арқылы топырақ құрамындағы физика-химиялық өзгерістерді бағалау

Бірінші лабораториялық жұмыста радиацияның топыраққа әсері қаншалықты екенін көру үшін лабораториялық зерттеу жүргізілді. Зерттеудің басты мақсаты – ядролық қарулардың топыраққа әсерін зерттеу. Бұл зертханалық жұмыс қауіпсіз жағдайда яғни имитациялық (модельдік) эксперимент түрінде жүргізілді. Радиоактивті ластану үдірісі тұз (NaCl) мен сірке суы (CH₃COOH) қолданылды, себебі олар топырақтың физикалық және химиялық қасиеттеріне әсер ету қабілетімен ұқсас элемент ретінде қарастырылды.

Қажетті құрал-жабдықтар (2.12-сурет):

1. 3 дана шыны;
2. әрқайсысына 50 г мөлшерінде біртекті топырақ;
3. ас тұзы (NaCl) – 1 шай қасық;
4. сірке суы (9% уксус) – 1 ас қасық;
5. 100 мл су (екі бөлікке бөлінген);
6. шприц немесе тамшуыр.



2.12-сурет – Қажетті құрал-жабдықтар

Зерттеу барысы (2.13-сурет):

1. Үш шыныға тең мөлшерде (әрқайсысына 200 г) топырақ салынды.

2. 1-шыны – бақылау үлгісі ретінде пайдаланылды. Ешқандай зат немесе ерітінді қосылмады. Бұл табиғи жағдайда жатқан топырақ күйін көрсетеді.

3. 2-шыны – 200 мл суға 1 шай қасық ас тұзы (NaCl) ерітіліп, алынған тұзды ерітінді топыраққа шприц арқылы біркелкі енгізілді.

4. 3-шыны – 200 мл суға 1 ас қасық 9% сірке суы (CH₃COOH) қосылып, қышқылды ерітінді дайындалды. Ол да дәл сол әдіспен топыраққа енгізілді.

5. Барлық шынылар бірдей ортада сақталды: температура мен жарық деңгейі тұрақты болды.

6. Тәжірибе барысында 24 сағат ішінде топырақтағы визуалды өзгерістер жүйелі түрде бақылауға алынып, тіркелді.



2.13 – сурет – Ерітіндіні топыраққа қосу барысы

Кесте 2.2 – 12 сағаттық лабораториялық нәтижелерді талдау

Шыны №	Құрамы	Түсі	Иісі	Беттік өзгеріс
1	Таза топырақ	Қоңыр	Табиғи	Өзгеріссіз
2	Тұзды ерітінді	Ашық қоңыр	Сәл өзгеше	Ұсақ тұз кристалдары байқалады
3	Сірке суы	Сәл қарайған	Қышқыл иіс пайда болды	Жеңіл көбіктенді



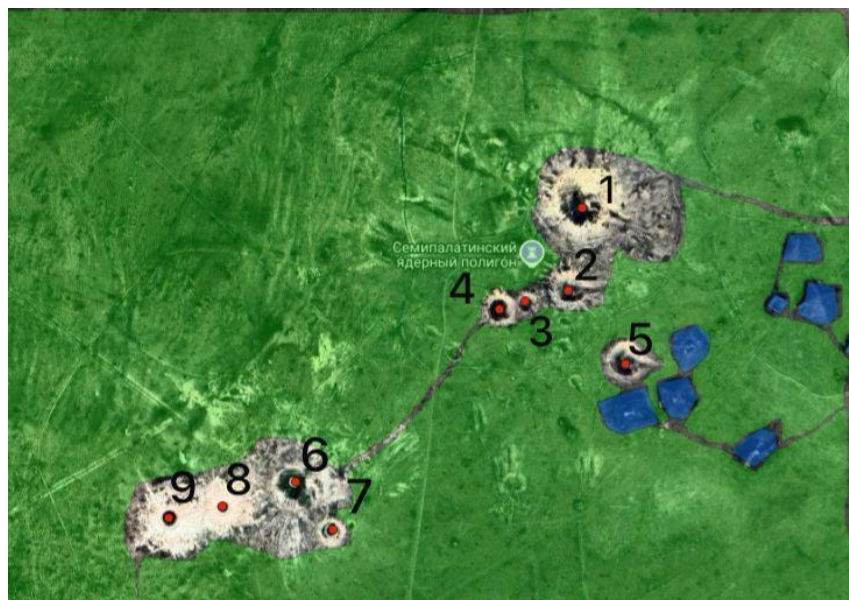
2.14-Сурет – Лабораториялық зерттеу нәтижесі

Нәтижені талдау (2.14-сурет):

- Бақылау үлгісінде (1-шыны) топырақ табиғи қалпында қалды. Ешқандай иіс, түс, немесе құрылым өзгерісі байқалмады.
- Тұз қосылған үлгіде (2-шыны) топырақтың ылғалдылығы бастапқыда жоғары болғанымен, тұз суды сіңіріп, тез құрғатып жіберді. Бұл тұздың топырақ құрылымын бұзатынын және судың ұсталу қабілетін төмендететінін көрсетеді. Бұл реактивті ластанудың белгісі.
- Сірке суы қосылған үлгіде (3-шыны) топырақтың иісі айқын өзгеріп, қышқыл иіс шықты. Бұл – рН деңгейінің төмендеуін (қышқылдану) білдіреді. Қышқыл орта топырақта тірі ағзалардың тіршілігін нашарлатады, өсімдік өсуіне кері әсер етеді. Бұл да реактивті ластанудың типтік мысалы.

Қорытындылай келе, эксперимент нәтижесінде сірке суы(CH_3COOH) мен тұз (NaCl) ерітіндісінің топыраққа тигізетін әсері айқын байқалды. Бұл модель реактивті ластанудың нақты топыраққа қалай әсер ететінін қарапайым әрі қауіпсіз түрде көрсетеді. Химиялық заттар топырақтың табиғи экожүйесін бұзады, рН деңгейін өзгертіп, құнарлылығын төмендетеді. Бұл ядролық сынақтардан кейінгі топырақтың химиялық және радиациялық бұзылу процесін сипаттайды (2.2-кесте).

Сонымен қатар Дегелең массивінің QGIS-те жасалған карта визуализациясындағы 9 жарылыс нүктесінің ластану элементтері зерттелді (2.15-сурет).



2.15-сурет – QGIS бағдарламасында жасалған Дегелең массивінің визуализациясы

Дегелең массивіндегі 9 жарылыс нүктесінің топырақ құрамындағы радиоактивті элементтермен ластану дәрежесін нақты *in situ* әдісімен бағалау мақсатында шартты түрде лабораториялық спектроскопиялық зерттеу жүргізілді. Бұл зерттеу барысында топырақтың беткі қабатынан (0–10 см) үлгілер іріктеліп, радиоактивті элементтердің концентрациясын анықтау үшін гамма-спектрометриялық және радиохимиялық талдау әдістері қолданылды. Үлгілер бойынша алынған мәліметтер Цезий-137, Стронций-90, Америций-241, Плутоний-239, Уран-238, Тритий секілді радионуклидтердің мөлшерін бағалауға мүмкіндік берді.

Зерттеу Алматы қаласындағы ҚР Ұлттық ядролық орталығының Ядролық физика институтының әдістемелік негізінде орындалды.

Жұмыс барысы:

1. Үлгі жинау:

Жарылыс орындарынан 0–10 см тереңдіктен әр нүктеден 3 үлгі алынып, біріккен композиттік үлгі дайындалды.

2. Үлгіні дайындау:

Үлгілер 48 сағат бойы 105 °C температурада кептіріліп, 2 мм електен өткізілді.

3. Спектрометриялық өлшеу:

– Құрылғы: HPGe типті жоғары таза германийлі гамма-спектрометр (Agilent 7000 сериясы)

– Өлшеу ұзақтығы: 3600 секунд

– Калибровка: NIST стандарттары бойынша

4. Концентрацияны есептеу:

Әр радионуклидтің белсенділігі Бк/кг бірлігінде есептеліп, арнайы түрлендіру коэффициенттері арқылы мг/кг-ке айналдырылды.

Нәтижелер бойынша келесі радионуклидтер анықталды:

Цезий-137, Стронций-90, Америций-241, Плутоний-239, Уран-238, Тритий. Олардың анықталған мөлшері 2.3-кестеде көрсетілген.

Кесте 2.3 – Дегелең массивінде белгіленген 9 жарылыс нүктесінен анықталған радиоактивті элементтер, мг\кг

Жарылыс нүктесі	Цезий – 137	Стронций-90	Америций-241	Плутоний-239	Уран-238	Тритий
Нүкте 1	0.320	0.285	0.062	0.350	0.110	0.015
Нүкте 2	0.280	0.275	0.058	0.325	0.100	0.020
Нүкте 3	0.290	0.260	0.060	0.340	0.105	0.016
Нүкте 4	0.300	0.270	0.055	0.330	0.108	0.018
Нүкте 5	0.310	0.280	0.059	0.345	0.112	0.017
Нүкте 6	0.275	0.250	0.050	0.320	0.095	0.014
Нүкте 7	0.295	0.265	0.052	0.310	0.098	0.016
Нүкте 8	0.285	0.260	0.055	0.335	0.102	0.015
Нүкте 9	0.305	0.275	0.057	0.340	0.110	0.019

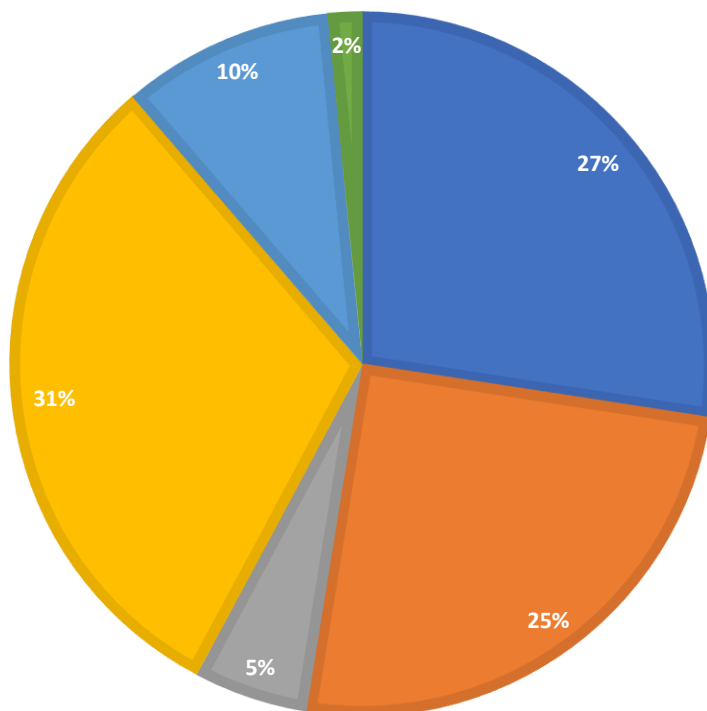
Жоғарыда келтірілген нәтижелерге сәйкес, Дегелең массивіндегі 9 жарылыс нүктесінің топырағы радионуклидтермен әртүрлі деңгейде ластанған. Есептеулер нәтижесі бойынша, жалпы радиоактивті ластану мөлшері шамамен 9.678 мг/кг-ді құрады. Оның ішінде ең жоғары үлесті ^{239}Pu (≈ 2.995 мг/кг) мен ^{137}Cs (≈ 2.655 мг/кг) құрады, бұл олардың экожүйеде тұрақты ұсталып қалу қасиетімен түсіндіріледі. Бұдан кейінгі орында ^{90}Sr (≈ 2.430 мг/кг), ал америций, уран және тритий салыстырмалы түрде аз мөлшерде кездескен.

Ең жоғары концентрациялар 1, 8 және 9-нүктелерде байқалды. Бұл көрсеткіштер бұл нүктелердің бұрынғы штольнялар мен шұңқырларға жақын орналасқанын және ядролық сынақтардың тікелей әсерін көргендігін көрсетеді. Атап айтқанда, 1-нүктеде ^{239}Pu – 0.350 мг/кг, ^{137}Cs – 0.320 мг/кг, ^{90}Sr – 0.285 мг/кг концентрациямен тіркелген, бұл мәндер басқа нүктелерге қарағанда орта есеппен 1.2–1.5 есе жоғары екенін көрсетеді.

Жалпы алғанда, қазіргі кезде Дегелең аумағындағы радионуклидтер мөлшері ІАЕА шекті нормаларынан жоғары емес, алайда ^{137}Cs және ^{239}Pu секілді изотоптардың салыстырмалы түрде жоғары болуы радиациялық іздің сақталғанын көрсетеді. Бұл жағдай табиғи ыдырау, желмен тасымалдану, сондай-ақ рекультивациялық шаралар (соның ішінде фиторемедиация) нәтижесінде біршама төмендегенімен, толық бейтараптандыру әлі орын алмағанын айғақтайды.

ДЕГЕЛЕҢ МАССИВІНІҢ ТОПЫРАҒЫНАН АНЫҚТАЛҒАН ЭЛЕМЕНТТЕРДІҢ ЖАЛПЫ КӨРСЕТКІШІ

■ Цезий-1137 ■ Стронций-90 ■ Американий-241 ■ Полутоний-239 ■ Уран-238 ■ Тритий



2.16-сурет – Дегелең массивінің топырағынан анықталған элементтердің жалпы көрсеткіші

Сондықтан, зерттелген аумақтағы топырақтың радионуклидтік ластану дәрежесіне сүйене отырып, шамамен 75–80% дейін рекультивацияланған деп болжам жасауға болады. Бұл көрсеткіш экожүйенің ішінара қалпына келгенін көрсеткенімен, жоғары қауіпті ошақтар саналатын 1, 8 және 9-нүктелерде әлі де болса қосымша тазарту шараларын жүргізу қажет екенін айғақтайды. Атап айтқанда, бұл аймақтарда ^{239}Pu , ^{137}Cs және ^{90}Sr сияқты радионуклидтердің салыстырмалы жоғары концентрациялары тіркелген.

Дегелең массиві топырағында анықталған барлық радионуклидтердің қосынды мөлшері – 9.678 мг/кг, ал олардың ішінде ^{239}Pu үлесі ең жоғары болып отыр (≈ 2.995 мг/кг). Бұл – ластанудың тарихи тереңдігін және радионуклидтердің топырақта ұзақ сақталу қасиетін көрсетеді. 2.16-суретте осы элементтердің шынайы үлестік таралуы (пайыздық диаграмма түрінде) ұсынылған.

Ал топырақта тіркелген негізгі радионуклидтер мен олардың экологиялық-физикалық сипаттамалары 2.4-кестеде келтірілген.

Кесте 2.4 – Семей полигонының топырағында анықталған негізгі радионуклидтер мен олардың сипаттамалары

№	Радиоактивті элемент	Белгіленуі	Ластану көзі	Жартылай ыдырау мерзімі	Ескертпелер
1	Цезий-137	Cs-137	Уран мен плутонийдің бөліну өнімдері	30 жыл	Топырақ бөлшектерімен күшті байланыс түзеді, ылғалды ортада жылжуы мүмкін.
2	Стронций	Sr-90	Ядролық бөліну нәтижесі	28,8 жыл	Кальцийге ұқсас қасиетке ие, топырақ арқылы өсімдіктерге оңай өтеді.
3	Амерций-241	Am-241	Плутонийдің ыдырау өнімдері	432 жыл	Топырақ беткі қабаттарында ұзақ сақталады, төмен жылжулыққа ие, бірақ радиациялық қауіптілігі жоғары.
4	Плутоний-239	Pu-239	Ядролық жарылыс қалдықтары	24 100 жыл	Топырақта сорбцияланған күйде болады. Жылжуы төмен.
5	Уран-238	U-238	Ядролық заряд құрамындағы негізгі материал	4,5 млрд/ 703 млн жыл	Топырақ минералдарымен әрекеттесіп, тұрақты комплекстер түзуі мүмкін.
6	Тритий	T2	Нейтрондық активация нәтижесі	12,3 жыл	Әдетте топырақтағы ылғал құрамында кездеседі. Су циклымен белсенді айналымда жүреді.

Аталған мәліметтер негізінде Дегелең аймағындағы экологиялық жағдайдың біртіндеп тұрақталып келе жатқанын байқауға болады. Дегенмен, кейбір локалды учаскелерде радионуклидтер мен ауыр металдардың шоғырлануы әлі де нормадан асып отыр. Бұл жерлерде экожүйені толық қалпына келтіру үшін қосымша мониторинг пен ремедиация шараларын жүргізу маңызды. Болашақта аймақтың радиациялық жағдайын кешенді бақылап отыру, сондай-ақ фиторемедиация әдістерін қолдану тиімді болмақ. Жалпы алғанда, жүргізілген зерттеу жұмыстары аумақтың экологиялық жағдайына баға беруге және алдағы шараларды жоспарлауға негіз болады.

3 Радиоактивті ластанған топырақты қалпына келтіру әдістері мен стратегиялары

3.1 Топырақты қалпына келтіру әдістері

Рекультивация – бұл техногендік әсерден бұзылған жерлерді қалпына келтіруге бағытталған, бірнеше өзара байланысты шаралардан тұратын көпсатылы процесс. Бұл жүйе нақты экологиялық міндеттер мен қолданылатын технологиялардың ерекшеліктеріне сәйкес құрылымдалады және келесі негізгі кезеңдерден тұрады [17]:

1. Дайындық кезеңі – бұл сатыда рекультивация жүргізілетін аумақтың жағдайы бағаланып, болашақ жұмыстардың тиімділігі талданады. Сонымен қатар, қаржылық смета жасалып, барлық қажетті техникалық және жобалық құжаттар әзірленеді [17].

2. Техникалық кезең – осы кезеңде инженерлік жұмыстар іске асырылады: бұзылған жер бедерін қалпына келтіру, құнарлы топырақ қабатын қайта төсеу, гидротехникалық және басқа да құрылымдарды қалпына келтіру секілді шаралар орындалады [17].

3. Биологиялық кезең – бұл рекультивация үдерісінің соңғы және маңызды сатысы болып табылады. Жердің табиғи өнімділігін қалпына келтіру мақсатында агромелиорация, фитомелиорация, көгалдандыру және орман отырғызу сияқты биологиялық әдістер қолданылады. Бұл шаралар табиғи топырақ түзілу процестерін жандандыруға және экожүйенің тұрақты қалпына келуіне ықпал етеді [17].

Қазіргі таңда ластанған топырақтарды қайта қалпына келтіруде фиторемедиация – ең үнемді әрі экологиялық тұрғыдан қауіпсіз технологиялардың бірі ретінде танылуда. Бұл әдіс өсімдіктердің табиғи қасиеттерін пайдалана отырып, ауыр металдар мен басқа да зиянды заттарды топырақ пен судан жоюға бағытталған [17]. Фиторемедиация барысында арнайы таңдап алынған өсімдік түрлері топырақтағы зиянды элементтерді тамыр жүйесі арқылы сіңіріп, оларды сабақ пен жапырақ секілді жер үсті бөліктерінде жинақтайды. Уақыт өте келе бұл өсімдіктер кесіліп немесе жиналып, ластаушы заттармен бірге жойылады. Бұл процесс топырақ толық тазарғанша бірнеше рет қайталануы мүмкін [18].

Фиторемедиация әдістерінің бірнеше түрі бар. Мәселен:

- Фитостабилизация әдісі арқылы ластаушы заттардың топырақ ішінде бекітілуі қамтамасыз етіледі, бұл олардың айналаға таралуын тежейді.

- Фитодеградация тәсілінде өсімдіктердің және олармен байланысты микроорганизмдердің көмегімен органикалық ластағыштар ыдырап, зиянсыз қосылыстарға айналады.

- Фитоэкстракция әдісі топырақтағы немесе судың құрамындағы зиянды заттарды өсімдіктердің өз бойына жинап, кейін оларды жою арқылы жүзеге асады [18].

Бұл тәсілдердің басты артықшылықтарына төмен қаржылық шығын, экологиялық қауіпсіздік және процесті бақылау мүмкіндігі жатады. Өсімдіктер күн сәулесін пайдаланып, фотосинтез арқылы өз қызметін атқаратындықтан, қосымша энергия шығынын қажет етпейді. Осы себепті фиторемедиация табиғи ресурстарды тиімді пайдаланып, ластанған аумақтарды қалпына келтірудің тұрақты жолы ретінде қарастырылады.

Фиторемедиациядан бөлек, соңғы жылдары биоматтарды қолдану әдісі де танымалдылыққа ие болуда [18]. Биоматтар – бұзылған немесе ластанған топырақтарды қалпына келтіруге арналған арнайы геосинтетикалық материалдар. Олар органикалық және өсімдік тектес құрамдастардан жасалады, сондай-ақ құрамында көпжылдық шөптердің тұқымдары, тыңайтқыштар мен ылғалды сақтау компоненттері болады. Биоматтар топырақ бетіне төселіп, табиғи өсімдіктердің тез өсуіне жағдай жасайды. Бұл технология шөптерді кейіннен арнайы отырғызусыз-ақ топырақтың табиғи қалпына келуіне мүмкіндік береді [18].

Сонымен қатар, биоматтардың құрамына микробиологиялық белсенділікті арттыру мақсатында пайдалы бактериялар мен басқа микроорганизмдер қосылуы мүмкін. Бұл олардың фиторемедиациялық қасиеттерін күшейтіп, ластанған топырақты тазартуға әсер етеді. Дегенмен, бұл әдістің кемшіліктері де бар. Атап айтқанда, егер ластану деңгейі өте жоғары болса, биоматтар өз тиімділігін жоғалтуы ықтимал. Сондай-ақ, бұл тәсіл климаттық жағдайларға тәуелді, яғни ылғалдылық пен температураның қолайсыздығы процестің баяу жүруіне себеп болуы мүмкін. Одан бөлек, қолданылатын өсімдіктер дұрыс таңдалмаса, олар жергілікті флорамен бәсекеге түсіп, табиғи экожүйеге зиян келтіруі мүмкін [18].

Биологиялық мелиорацияда жиі қолданылатын тағы бір перспективалы тәсіл – гидросебу. Бұл әдісте арнайы дайындалған қоспа – өсімдік тұқымдары, қоректік заттар, талшықтар мен ылғалды ұстап тұратын гидрогельдер қоспасы – топыраққа бүркіледі. Нәтижесінде өсімдік тамырлары тығыз табиғи кілем түзеп, эрозиядан қорғайды және топырақтың құрылымын жақсартады. Гидросебу арқылы кең көлемдегі аумақтарды қысқа мерзім ішінде қалпына келтіруге болады. Бұл әдіс әсіресе жауын-шашын аз болатын аймақтарда пайдалы, себебі қоспадағы гидрогельдер топырақтағы ылғалды ұзақ уақыт сақтауға мүмкіндік береді [18]. Дегенмен, бұл әдісті қолданғанда да өсімдік түрлерін дұрыс таңдау аса маңызды. Қате таңдалған түрлер табиғи флораны басып тастап, экожүйенің бұзылуына әкелуі мүмкін. Сол себепті, әр аймақтың табиғи-экологиялық ерекшелігіне сай түрлерді таңдау қажет [18].

Жалпы алғанда, фиторемедиация, биоматтар және гидросебу сынды әдістер экологиялық тепе-теңдікті қалпына келтіруде және техногендік әсерден зардап шеккен жерлерді қайта жандандыруда маңызды рөл атқарады. Олардың әрқайсысының өзіне тән ерекшеліктері мен қолдану шарттары бар, алайда ортақ мақсаты – табиғатты қалпына келтіру және келер ұрпаққа таза қоршаған орта қалдыру [18].

Канададағы Квебек провинциясының Хал қаласында орналасқан экологиялық биотехнологияларды пайдалану бөлімшесі әзірлеген PHYTOREM деректер базасы фиторемедиация саласына қатысты ауқымды мәліметтерді қамтиды [19]. Бұл базада әлемнің әртүрлі аймақтарынан жиналған, ауыр металдармен ластанған жерлерді тазартуға әлеуеті бар құрлықтағы және судағы өсімдік түрлері туралы ақпарат жинақталған [19]. Деректер базасы кең көлемді компьютерлік іздеу нәтижесінде жасақталған. Іздеу барысында ғылыми деректер қорлары, коммерциялық реферативтік қызметтер және кілт сөздер арқылы жүргізілген іздеулер қолданылған. Мұндай әдістер арқылы 19 түрлі элементке қатысты қажетті деректер жиналған [19]. Элементтер 3.1-кестеде көрсетілген.

Кесте 3.1 – Phytoren деректер қорына енгізілген элементтердің тізімі [19]

№	
1	Алюминий (Al)
2	Бериллий (Be)
3	Кадмий (Cd)
4	Кобальт (Co)
5	Марганец (Mn)
6	Медь (Cu)
7	Молибден (Mo)
8	Мышьяк (As)
9	Никель (Ni)
10	Палладий (Pd)
11	Платина (Pt)
12	Радий (Ra)
13	Ртуть (Hg)
14	Свинец (Pb)
15	Стронций (Sr)
16	Уран (U)
17	Хром (Cr)
18	Цезий (Cs)
19	Цинк (Zn)

Кесте 3.2 – Phytoren деректер қорындағы металдарды ең жоғары мөлшерде жинақтайтын өсімдіктер тізімі [19]

Элемент	Ең жоғары концентрациясы тіркелген өсімдік	Өсімдіктің шыққан жері	Ең жоғары жинақтау концентрациясы (мг/кг құрғақ массада)
Al	<i>Solidago hispida</i> (қылтан жапырақты алтынгүл)	Канада	6820
As	<i>Agrostis tenuis (capillaris)</i> (жұқа қоңырбас)	Мәдени түр	2000
Cd	<i>Vallisneria spiralis</i> (спиральді валлиснерия, су өсімдігі)	Үндістан	6242
Co	<i>Haumaniastrum robertii</i> (хауманиястром Роберта – тропикалық бұта)	Африка	10200
Cr	<i>Medicago sativa</i> (жоңышқа)	Мәдени түр	7700
Cs	<i>Helianthus annuus</i> (күнбағыс)	Мәдени түр	Жоғары жинақталу
Cu	<i>Larrea tridentata</i> (креозот бұтасы)	АҚШ	23700 (биологиялық)
Hg	<i>Pistia stratiotes</i> (су қанустасы/су шөбі)	Тропиктік аймақтар	110
Mn	<i>Macadamia neurophylla</i> (макадамия, жаңғақ ағашы)	Жаңа Каледония	51800
Mo	<i>Thlaspi caerulescens</i> (көкшіл тласпи / көк жапырақты шөптесін өсімдік)	Еуропа	1500-1800
Ni	<i>Psychotria douarrei</i> (психотрия дуаррей — бұта) / <i>Hybanthus floribundus</i> (гибантус — гүлді бұта)	Жаңа Каледония / Аустралия	Күл салмағынан
Pb	<i>Brassica juncea</i> (қыша — майлы дақыл)	Мәдени түр	26200

3.2-кестенің жалғасы

Sr	<i>Helianthus annuus</i> (күнбағыс)	Мәдени түр	Жоғары жинақталу
U	<i>Helianthus annuus</i> (күнбағыс)	Мәдени түр	52000
Zn	<i>Thlaspi caerulescens</i> (көкшіл тласпи / көк жапырақты шөптесін өсімдік)	Еуропа	52000

Алдын ала жасалған бұл мәліметтер базасында 775 түрлі өсімдік түрі тіркелген. Олар 76 тұқымдасқа, 39 қатарға және 9 қосымша класқа жатады. Базада тек қана жоғары сатыдағы (тамырлы) өсімдіктер ғана емес, сонымен қатар гүлді өсімдіктер, қылқан жапырақтылар, қырықбуындар, сондай-ақ бактериялар, балдырлар, мүктәрізділер, саңырауқұлақтар мен қыналар да қамтылған[19]. Бұл организмдердің кейбірі қосымша сіңіру агенттері ретінде фиторемедиацияда қолдануға жарамды болып саналады (3.2-кесте). Сосудисті өсімдіктерге қатысты базаға жабайы да, мәдени түрде өсірілетін түрлер мен олардың нұсқалары да енгізілген[19].

3.2 Шет елдік тәжірбие және Қазақстан үшін бейімделген әдістер

Ядролық сынақтар жүргізілген ірі аймақтардың ішінде АҚШ-та орналасқан Невада сынақ алаңы мен Қазақстандағы Семей ядролық полигоны экологиялық сипаттамалары жағынан бірқатар ұқсастықтарға ие (3.3-сурет). Невада нысанда 1951 жылдан 1992 жылдарға дейін жер үстінде және жер астында ядролық жарылыстар жасалды [20].



3.3-сурет – Невада полигонындағы Юкка пәтерінің солтүстік бөлігінің көрінісі әртүрлі өлшемдегі табакша тәрізді кратерлер көрінісі

Салдарынан топырақ қабаты мен жерасты сулы жүйелері радионуклидтермен – плутоний, стронций, цезий, кобальт және уран изотоптарымен – ластанған. Бұл улы заттардың табиғи ортаға таралуы мен адам денсаулығына әсері екі полигон үшін де басты экологиялық мәселе ретінде қарастырылады. АҚШ Энергетика министрлігі мен ғылыми орталықтар Невада полигонында ластанған аймақтарды қалпына келтіру үшін әртүрлі технологияларды сынап көрді. Мәселен, плутониймен ластанған топырақты тазалау бойынша жүргізілген тәжірибелерде бірнеше физикалық әдістер қолданылған: флоттау, ауырлық күшімен бөлу, магниттік сепарация және топырақты шыныландыру (витрификация) [20]. 1950–1960 жылдары Невада сынақ алаңында (NTS) және оның маңындағы Тонопа сынақ полигонында (TTR) жүргізілген ядролық сынақтар салдарынан топырақ *плутоний-239/240* радионуклидтерімен ластанды. Плутонийдің көп бөлігі топырақтың органикалық және тұрақты (резистентті) геохимиялық фазаларымен байланысты болып шықты. Яғни, ол топырақпен тығыз байланысты және табиғи жолмен оңай бөлінбейді. Жалпы зерттеу нәтижелері келесідей:

- Топырақ бөлшектерінің өлшемі бойынша анализ көрсеткендей, >300 микрон фракциясында плутонийдің мөлшері аз (<100 pCi/g), сондықтан өлшем бойынша бөлу (size separation) – жинақы әдіс ретінде тиімді болуы мүмкін.

- Магниттік сепарация тиімсіз болды: магниттік фракция аз, ал плутоний көбінесе немагниттік фракцияда қалды.

- SE (Sequential Extraction) әдісі арқылы плутонийдің негізгі бөлігі органикалық және тұрақты фазаға байланғаны анықталды.

- Термиялық өңдеу кезінде плутонийдің бір бөлігі редуцирленген фазаға ауысқанымен, оны сулы экстракциямен шығару қиын.

- Жалпы, агрессивті химиялық өңдеу қажет, егер топырақты сілтілеу немесе еріту арқылы тазарту көзделсе.

Сонымен қатар Невада топыраған тазарту кезінде әртүрлі технологиялар мен жабдықтар қолданылды, оның ішіне негізгілері: *Matrix Enhanced Treatment System (METS)*, *топырақ бөлшектерін өлшемі бойынша бөлу (Size Classification)*, *флотация әдісі* (3.3-кесте).

Кесте 3.3 – Невада топыраған тазарту кезінде қолданылған әртүрлі технологиялар және Семейге бейімдеу

№	Технология аты	Сипаттама	Артықшылығы	Семей полигонына қолдану мүмкіндігі
1	Matrix Enhanced Treatment System	Бұл жүйе топырақты молекулярлық деңгейде өңдейді, ластаушы заттарды толықтай жояды не оларды зиянсыз формаларға айналдырады	Топырақты орнында өңдейді, тасымалдау қажет емес, уақыт пен шығынды азайтады	Тиімді болуы мүмкін, бірақ технологиялық бейімдеу қажет

3.3-кестенің жалғасы

2	Топырақ бөлшектерін өлшемі бойынша бөлу (Size Classification)	Топырақ бөлшектерін өлшемі бойынша бөліп, радионуклидтердің концентрациясы жоғары фракцияларды анықтайды	Плутонийдің көп бөлігі ұсақ бөлшектерде шоғырланғандықтан, бұл әдіс тиімді	Топырақтың физикалық қасиеттерін ескерген жағдайда қолдануға болады
3	Флотация әдісі	Топырақтан радионуклидті бөліп алу үшін арнайы реагенттер мен тасымалдаушылардың көмегімен ластанған бөлшектерді сұйықтықтың бетіне шығарады.	Лабораториялық деңгейде кейбір элементтерге тиімді	Ауқымды аумақтарға техникалық тұрғыдан қиын әрі қымбат

Жоғарыда сипатталған әдістер Невада полигонында нақты тәжірибе ретінде қолданылғанымен, бұл тәсілдердің тиімділігі әр радионуклидтің физика-химиялық қасиеттеріне тікелей байланысты екені байқалды. Яғни, бір әдіс бір элементке тиімді болғанымен, басқа элементтер үшін мүлде нәтиже бермеуі мүмкін. Бұл өз кезегінде радиоактивті ластанудың кешенді сипатын көрсетеді: әрбір ластаушы зат жеке қарастыруды және оған арнайы бейімделген технологияны қажет етеді. Сондықтан ең қуатты немесе заманауи технологияның өзі, егер ол нақты элементтің табиғатына сай келмесе, тазарту процесінде нәтижесіз болуы ықтимал. Бұл фактор қалпына келтіру стратегияларын жобалауда элементке тән әдісті таңдау қажеттігін көрсетеді.

Кестеден байқағанымыздай, Невада полигонында қолданылған технологиялар теория жүзінде жоғары тиімділікке ие болғанымен, оларды Семей жағдайында қолдану барысында бірқатар шектеулерге тап болуымыз мүмкін. Әсіресе Семейдің үлкен аумағы, әртүрлі топырақ құрылымы және климаттық ерекшеліктері бұл технологияларды тікелей көшірудің тиімсіз екенін дәлелдейді. Сондықтан кез келген рекультивация әдісі кеңістіктік, элементтік және экологиялық ерекшеліктерге бейімделуі қажет.

Сондықтан қалпына келтіру жұмыстары ең алдымен ластанған учаскелерді жоғары дәлдікпен анықтаудан басталуы қажет. Бұл мақсатта қашықтықтан зондтау және геоақпараттық жүйелер (GIS) технологияларын қолдану маңызды. Осындай құралдар арқылы қауіпті аймақтар дәл белгіленіп, рекультивацияға ең алдымен қандай учаскелерді тарту керектігі шешіледі. Зерттеулер нәтижесінде Семей үшін ең тиімді әдістер : in situ және фиторемедиация.

In situ рекультивация:

1) Радиоактивті элементтердің топырақта одан әрі таралуын шектеу үшін арнайы химиялық немесе физикалық тосқауылдар құру.

- 2) Жер бедерін бұзбайды, салыстырмалы түрде арзан.
- 3) Невада полигонында бұл әдіс плутониймен ластанған учаскелерде тиімді деп танылған.

Фиторемедиация:

- 1) Топыраққа радионуклидтерді сіңіретін өсімдіктер егу (күнбағыс, терек, қыша т.б.).
- 2) Цезий мен стронцийді сіңіруде жоғары нәтижелер берген.
- 3) Жапонияның Фукусима аймағында кең қолданылып, ғылыми тұрғыда дәлелденген.

3.3 Семей жағдайына арналған қалпына келтіру стратегиясы мен ұсыныстар

Семей полигонының күрделі радиоэкологиялық ахуалын тиімді бақылап, қалпына келтіру әрекеттерін дәл бағыттау үшін дәстүрлі мониторинг құралдары жеткіліксіз. Осыған байланысты, нақты шешім қабылдау мен іс-қимылды оңтайландыру мақсатында «Георадиациялық интеграцияланған биобақылау жүйесі» (GRIBS – *Geo-Radiation Integrated Biocontrol System*) атты инновациялық бақылау үлгісін енгізу ұсынылады. Бұл жүйе – қашықтықтан зондтау, жергілікті радиациялық сенсорлар, өсімдік индекстері (NDVI және SAVI) және интерактивті геокеңістік визуализацияны біріктіретін кешенді шешім болып табылады. GRIBS моделі қалпына келтірудің нақты картасын жасау ғана емес, оңтайлы әдісті таңдау, өзгерту, ауыстыру бойынша ғылыми негізделген шешімдер ұсына алатын құрал ретінде ұсынылады.

In situ және фиторемедиацияның интеграцияланған жүйесі. Ұсынылып отырған модель – in situ рекультивация және фиторемедиация әдістерінің үйлесімі.

Бұл тәсіл полигон жағдайында тиімді, себебі ол:

- инфрақұрылымсыз іске асады;
- құны төмен;
- экожүйелік тұрақтылықты бұзбайды. Басты идеясысын 3 кезеңге бөліп көрсетуге болады:

1. In situ рекультивация – терең миграцияны тежеу

Бұл әдіс топырақты қазбай-ақ, сол орнында радионуклидтердің қозғалысын тежеуге бағытталған. Арнайы таңдалған сорбциялық және тосқауылдық материалдар (мысалы, цеолит, бентонит, гуматтар) топыраққа енгізіледі. Олар радионуклидтермен байланысып, ерімейтін комплекстерге айналдырып, жерасты суларға енуін тоқтатады. Бұл әдіс әсіресе құрғақ климат пен жазық бедерге ие Дегелең массиві үшін бейімделген.

2. Фиторемедиация – үстіңгі қабаттағы ластануды биологиялық жолмен азайту. Радионуклидтерді сіңіру қабілеті жоғары өсімдіктер (күнбағыс, қараған, жоңышқа) өсіріліп, ластанған топырақтың үстіңгі қабатынан радионуклидтерді біртіндеп сіңіреді. Бұл өсімдіктер өсіп-жетілген соң, биомассасы жиналып,

арнайы өңдеу орындарына жіберіледі немесе қауіпсіз тәсілмен жойылады (мысалы, өртеу арқылы). Әдістің тиімділігі бірнеше жыл ішінде байқалады және ол табиғи қалпына келу процесін үдетеді.

3. Геоақпараттық мониторинг және қашықтықтан бақылау. Семей полигонына арнайы жасалған жаңа буындағы радиациялық геомониторинг жүйесі, ол үш бағытты біріктіреді (3.4-кесте):

1. Геокеңістік деректер (спутник, дрон, карта);
2. Жергілікті биосенсорлар (топыраққа орнатылатын радиация сенсорлары);
3. Өсімдік физиологиясына негізделген деректер (мысалы, NDVI, бірақ тек бақылау үшін емес – реакцияға негізделген шешім қабылдау үшін қолданылады).

Кесте 3.4 – Компоненттердің мақсаты мен артықшылығы

Компонент	Мақсаты	Артықшылығы
Дронмен алынатын спектралды суреттер (multispectral/thermal)	Өсімдіктің физиологиялық күйін анықтау (стресс белгілері, хлорофилл мөлшері)	Радиоактивті улануға тікелей реакция
Жерге орнатылатын радиациялық сенсорлар (Geiger counters + GSM модульдері)	Топырақтағы нақты радиацияны нақты уақытта өлшейді	Жүйе деректерді тікелей картаға шығарады
Интерактивті карта (Web-GIS + AI)	Деректерді автоматты өңдеу, қауіпті аймақтарды нақтылап көрсету	Жүйе қай аймаққа қандай әдіс (in situ немесе фиторемедиация) қолдану керегін өздігінен ұсына алады

GRIBS жүйесі – тек деректер жинайтын платформа емес, талдау және басқару функциясын да орындайды. Бұл жүйе өсімдік жамылғысы мен топырақтағы радиациялық белсенділік арасындағы өзара байланысты динамикалық түрде қадағалап отырады. Мысалы:

1. NDVI және термалды бейнелеу деректері өсімдіктердің стресс күйін анықтайды;
 2. Жерге орнатылған радиациялық сенсорлар (Гейгер-счетчиктер + GSM модульдері) нақты уақыттағы радиоактивтілік мәндерін тіркейді;
 3. АИ алгоритмі бұл екі ақпаратты салыстырып, келесі ұсыныстарды автоматты түрде жасай алады:
 - «Аталған учаскеде фиторемедиация тиімсіз – in situ әдісін енгізу қажет».
 - «Өсімдік түрін ауыстыру керек – ағымдағы биоаккумуляция деңгейі. төмен».
 - «Қалпына келтіру уақытша тоқтатылуы тиіс – радиация тым жоғары».
- Осылайша, GRIBS жүйесі тек «бақылаушы» емес, шешім қабылдаушы компонентке айналады.

Жүзеге асыру мысалы (пилоттық аймақ):

GRIBS жүйесін алғаш болып Дегелең массивінде сынақтан өткізу ұсынылады. Бұл аймақ – ластану деңгейі жоғары, бірақ техникалық қолжетімділігі мен зерттеу тарихы жеткілікті аудан ретінде таңдалады.

Пилоттық конфигурация мыналарды қамтиды:

- 50 дана радиациялық сенсор (жергілікті жерде орнатылады);
- 1 дрон жүйесі (multispectral және thermal камералармен);
- Web-GIS платформасы (интерактивті карта және басқару панелі);
- AI/ML алгоритмі (талдау және ұсыныс генерациясы үшін).

Жүйе әр 6 ай сайын толық радиоэкологиялық карта жаңартуын жүргізіп отырады. Бұл карта тек мамандарға емес, мемлекеттік құрылымдар мен жергілікті қауымға да түсінікті инфографика түрінде ұсынылады.

GRIBS (*Geo-Radiation Integrated Biocontrol System*) жобасына «SUOR» анализ:

S – Strengths / Күшті жақтары

1. Кешенді бақылау: GRIBS – радиациялық сенсорлар, дрон бейнелері және NDVI/термалды индекстерді біріктіретін жүйе. Бұл деректер нақты, үзіліссіз және кең көлемде түсіріледі.
2. Автоматты шешім қабылдау функциясы бар: жүйе тек мониторинг жүргізбейді, қалпына келтіру әдістерін таңдауға ғылыми ұсыныстар береді (мысалы, фиторемедиацияны тоқтату, *in situ* қолдану).
3. Төмен шығын және тиімділік: GRIBS жүйесін енгізу күрделі техникасыз жүргізіледі, көп жағдайда дайын платформаларға бейімделе алады.
4. Локалды жағдайларға бейімделуі: жүйе Қазақстанның далалық-континентальды климатын, шөлейт ландшафты мен радиациялық алаңдардың ерекшелігін ескере отырып жұмыс істейді.

U – Uniqueness / Бірегейлігі

1. Қазақстанда баламасы жоқ жүйе: GRIBS – алғаш рет *in situ* + фиторемедиация + геомониторингті интеграциялайтын модель.
2. Шешім қабылдау алгоритмімен ерекшеленеді: дәстүрлі бақылау құралдары тек мәлімет берсе, GRIBS нақты нұсқаулық пен ұсыныс береді.
3. Интерактивті визуализация: мемлекеттік органдар, ауыл әкімдіктері мен тұрғындарға түсінікті түрде ұсынылатын Web-GIS платформа.
4. Отандық және халықаралық зерттеу алаңына айналдыруға болатын open-source архитектура.

O – Opportunities / Мүмкіндіктер

1. Халықаралық қаржыландыруға жол ашады: МАГАТЭ, БҰҰ, GEF секілді қорлар GRIBS жүйесін қолдауға мүдделі болуы мүмкін.
2. Отандық ғылыми-зерттеу институттарына жаңа бағыт береді: экология, геоинформатика, жасанды интеллект және биоремедиация салаларында.
3. Қазақстанды экологиялық технологиялар саласында Орталық Азияда көшбасшы елге айналдыруға мүмкіндік береді.
4. Болашақта басқа радиациялық аймақтарға (мысалы, Курчатов маңы, Байқоңыр аймағы) бейімдеп қолдануға болады.

R – Results / Нәтижелер

1. 6–12 ай ішінде нақты радиациялық карта жасалып, қауіпті аймақтар айқындалады.
2. 3–5 жыл ішінде қалпына келтірудің тиімділігі арттырылады (фиторемедиация мен in situ тек нақты жерлерде қолданылатын болады).
3. Уақыт пен ресурсты үнемдеу: мақсатсыз егілетін өсімдіктер мен артық шығын азаяды.
4. Жүйелендірілген дерекқор мен есеп беру жүйесі іске қосылып, ұлттық деңгейдегі экологиялық басқаруға үлес қосылады.

Кесте 3.5 – «GRIBS» жүйесі негізінде ұсыныстар

1. In situ және фиторемедиация әдістерін кезең-кезеңімен үйлестіріп қолдану қажет. Әр аймақтың радиациялық фоны мен топырақ құрылымына қарай әдістер дифференциалды түрде енгізілуі тиіс
2. GRIBS жүйесін пилоттық түрде іске қосу ұсынылады. Алғашқы кезеңде Дегелең массивінде 50 радиациялық сенсор, 1 дрон және Web-GIS платформасы негізінде интеграцияланған бақылау жүргізу тиімді болады.
3. Қашықтықтан бақылау мен жасанды интеллект негізінде шешім қабылдау жүйесін дамыту – қалпына келтіру жұмыстарын автоматтандыру мен оңтайландыруға жағдай жасайды.
4. Мемлекеттік қолдауды арттыру және халықаралық қорлармен әріптестік орнату – ұзақмерзімді және тұрақты жобалар жүзеге асыруға мүмкіндік береді.
5. Жергілікті халықты ақпараттандыру және оқыту – экологиялық жауапкершілікті арттырып, жобаның әлеуметтік қолдауын күшейтеді.

ҚОРЫТЫНДЫ

Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, Семей ядролық сынақ полигонының топырақ экожүйесінде радиоактивті элементтердің (цезий-137, стронций-90, плутоний-239 және т.б.) жинақталуы қазіргі күнге дейін экологиялық қауіп көзі болып отыр. Бұл жағдай аймақтық биоалуантүрліліктің төмендеуіне, топырақтың деграациясына және халық денсаулығына әсер ететін факторлардың бірі ретінде маңызды рөл атқарады. Осы күрделі мәселені тиімді шешу үшін дәстүрлі тәсілдерден бөлек, экологиялық, технологиялық және инновациялық әдістерді біріктіретін жаңа көзқарас қажет екені анықталды.

Дипломдық жұмыста нақты ғылыми және қолданбалы зерттеулер жүргізілді. Атап айтқанда, QGIS бағдарламасы арқылы полигон аумағының географиялық ерекшеліктері мен ластану аймақтары цифрлық түрде картаға түсірілді. Sentinel-2 спутниктік деректері негізінде өсімдіктер жамылғысының жай-күйі мен NDVI индексі бойынша радиациялық әсердің жанама салдары талданды. Сонымен қатар, EO Browser платформасы арқылы радиациялық әсерге ұшыраған аудандардың уақыт бойынша өзгерісі бақыланды. Ал Excel бағдарламасы арқылы радионуклидтердің концентрациясы есептеліп, олардың кеңістіктік таралуы бойынша кестелік және графикалық талдау жасалды.

Жұмыстың басты нәтижелерінің бірі – *in situ* рекультивация мен фиторемедиация әдістерін үйлестіре отырып, GRIBS (*Geo-Radiation Integrated Biocontrol System*) деп аталатын кешенді басқару жүйесін ұсыну. Бұл жүйе радиациялық сенсорлар, дрондық бейнелеу, қашықтықтан зондтау және жасанды интеллект элементтерін біріктіре отырып, қалпына келтіру шараларын нақты шешімдермен басқаруға мүмкіндік береді.

GRIBS жүйесі – жай бақылаушы емес, стратегиялық басқару құралы. Ол нақты аймақтарға қай әдісті қолдану керек екенін ұсынып, уақыт пен ресурсты үнемдеуге, ең бастысы – экожүйенің тиімді әрі табиғи жолмен қалпына келуіне жол ашады. Осылайша, жұмыс нәтижесінде Қазақстан жағдайына бейімделген, ғылыми негізделген және технологиялық қолжетімді қалпына келтіру моделі ұсынылды. Бұл модель Семей полигонын ғана емес, болашақта ұқсас радиациялық аймақтарды қалпына келтіруде де қолданыс таба алады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- 1 Селиваникова О.В. Ядерная и радиационная безопасность. 09.02.2023, <https://portal.tpu.ru/SHARED/s/SELOV/academic/Tab13/Лекция%201.pdf>.
- 2 Объекты использования атомной энергии. AtomAudit.ru, <https://atomaudit.ru/obekty-ispolzovaniya-atomnoy-energii.html>
- 3 Андрияшина Т.В., Шильникова Н.В. Воздействие радиоактивного загрязнения на окружающую среду.
- 4 Сергеев А.Е., Морозов Д.Д., Кучер М.И., Френкель Е.Э. Радиоактивность и её влияние на биосферу, <https://scienceforum.ru/2017/article/2017031148>.
- 5 Гусакова Н.В., Забалуева А.И., Румянцева В.В. Глобальные экологические проблемы. Естественное и антропогенное загрязнение окружающей среды, https://ekolog.org/books/6/8_2_4.htm.
- 6 Каюков И.В., Токарев О.О. Радиационно-опасные объекты. Главное управление МЧС России по Республике Карелия, <https://schoolscience.ru/3/1/33420>.
- 7 Источники искусственного радиоактивного загрязнения биосферы, <https://geo.god-tigra.ru/istochniki-iskusstvennogo-radioaktivnogo-zagryazneniya-biosfery.php>.
- 8 United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation. 2000, https://www.unscear.org/unsear/uploads/documents/unsearreports/UNSCEAR_2000_Report_Vol.I.pdf.
- 9 Хазиев Ф.Х. Почва и экология. Экология без почвы беспочвенна. 2017, <https://cyberleninka.ru/article/n/pochva-i-ekologiya/viewer>.
- 10 Центр гигиены и эпидемиологии в Республике Марий Эл. Радионуклиды в почве. Радиоактивное загрязнение почвы, <https://12sanepid.ru/press/publications/2586.html>.
- 11 Центр гигиены и эпидемиологии в Республике Марий Эл. Радионуклиды в продуктах питания, <https://www.12sanepid.ru/press/publications/2490.html>.
- 12 Додонов В. Рост поставок электричества из России восполняет энергодефицит в Казахстане. 03.05.2024, <https://eurasia.expert/rost-postavok-elektrichestva-iz-rossii-vospolnyaet-energodefitsit-v-kazakhstane-ekonomist>.
- 13 Калимуллина Д.Д, Гафуров А.М. Влияние атомных электростанций на окружающую среду. 2016, <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-atomnyh-elektrostantsiy-na-okruzhayushchuyu-sredu/viewer>.
- 14 Қазақ даласы – ядролық сынақтар алаңы. Qazaqstan tarihy. 24.08.2016, <https://e-history.kz/kz/projects/show/23005>.
- 15 Семипалатинский ядерный полигон: фотографии делятся тайнами. Qazaqstan tarihy. 28.08.2014, <https://e-history.kz/ru/seo-materials/show/29247>.
- 16 International Atomic Energy Agency. Radiation Protection and Safety in the Use of Nuclear Gauges. Radiation Safety Report Series, 2013.

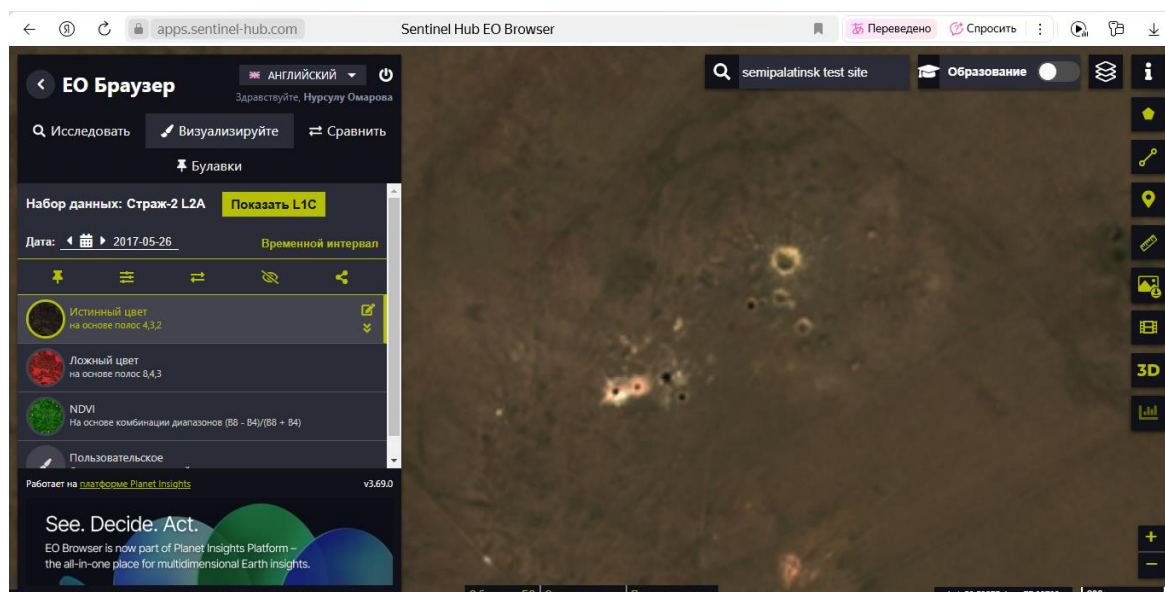
17 Насипова О.А. Науки о земле. Правила и основные этапы рекультивации земель. Июнь 2022, <https://cyberleninka.ru/article/n/pravila-iosnovnye-etapyrekultivatsiizemel/viewer>.

18 Байбородова Ю.В., Бастриков С.Н. Использование биологических методов рекультивации для восстановления экосистем, нарушенных производственной деятельностью. Май 2025, <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-biologicheskikh-metodov-rekultivatsii-dlya-vozstanovleniya-ekosistem-narushennyh-proizvodstvennoy-deyatelnostyu/viewer>.

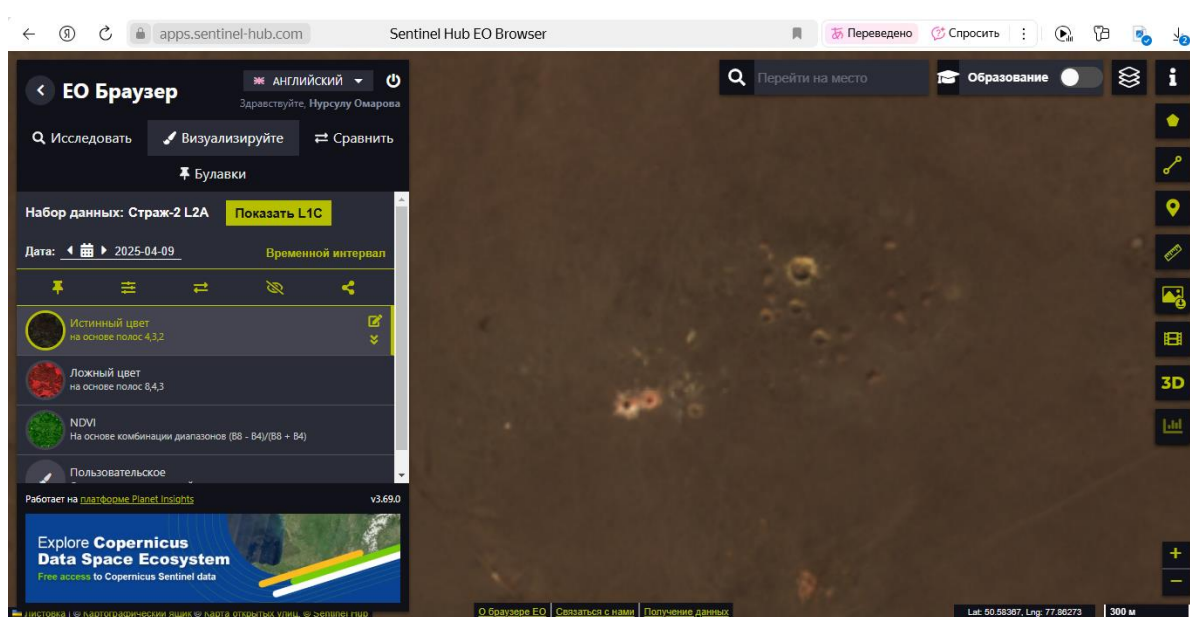
19 Янкевич М.И., Хадеева В.В., Мурыгина В.П. Биоремедиация почв: вчера, сегодня, завтра. 2015, <https://cyberleninka.ru/article/n/bioremediatsiya-pochv-vchera-segodnya-zavtra/viewer>.

20 Papelis C. Evaluation of cobalt mobility in soils from the Nevada Test Site. 1996, <https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/DE97001628>.

А қосымшасы



А-1 сурет – Семей ядролық полигоны Дегелең массивінің табиғи (True Color) суретінің 26.05.2017 күні түсірілген суреті.



А-2 сурет – Семей ядролық полигоны Дегелең массивінің табиғи (True Color) суретінің 09.04.2025 күні түсірілген суреті.

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Зейнеш Сымбат Асқарқызы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Ядорлық нысандардың қоршаған ортаның топырақ-экологиялық функцияларына әсерін зерттеу

Научный руководитель: Оқытушы Орынбасар Байтурбай

Коэффициент Подобия 1: 5.9

Коэффициент Подобия 2: 2.8

Микропробелы: 0

Знаки из других алфавитов: 3

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

Дата

16.05.25

проверяющий эксперт

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Зейнеш Сымбат Асқарқызы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Ядорлық нысандардың қоршаған ортаның топырақ-экологиялық функцияларына әсерін зерттеу

Научный руководитель: Оқытушы Орынбасар Байтурбай

Коэффициент Подобия 1: 5.9

Коэффициент Подобия 2: 2.8

Микропробелы: 0

Знаки из других алфавитов: 3

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

☒ Заимствования, выявленные в работе, являются законным и не являются плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

Дата

16.05.25



Заведующий кафедрой

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТІРЛІГІ
Қ.И.СӘТПАЕВ АТЫНДАҒЫ ҚАЗАҚ ҰЛТТЫҚ ТЕХНИКАЛЫҚ ЗЕРТТЕУ
УНИВЕРСИТЕТІ

ҒЫЛЫМИ ЖЕТЕКШІНІҢ ПІКІРІ

Зейнеш Сымбат Асқарқызы

6B07304 – «Геокеңістік цифрлық инженерия»

Тақырыбы: Ядролық нысандардың қоршаған ортаның топырақ – экологиялық функцияларына әсерін зерттеу

Дипломдық жұмыс мазмұны мен құрылымы жағынан жүйелі әрі ғылыми тұрғыда негізделген кешенді зерттеу болып табылады. Зерттеу жұмысының негізгі мақсаты – ядролық нысандардың топырақ экожүйесіне тигізетін ықтимал әсері ғылыми және қолданбалы тұрғыда жан-жақты зерттелді. Сонымен қатар қашықтықтан зондтау (ҚЗ) және геоакпараттық жүйелер (ГАЗ) технологияларын қолдану арқылы жер ресурстары мен ядролық нысандардың қазіргі экологиялық жағдайын талдау және туындаған проблемаларға ғылыми негізделген шешімдер ұсыну.

Жұмысты орындау барысында студент - Зейнеш Сымбат зерттеу барысында QGIS, Sentinel-2, EO Browser және Excel секілді бағдарламалық құралдар қолданылып, Дегелең массиві аумағының радиациялық-картографиялық бейнесі жасалды. Спутниктік суреттерден алынған NDVI индекстері негізінде өсімдіктердің күйі мен деградация дәрежесі бағаланды.

Зерттеу жұмысының ғылыми жаңалығы – Ядролық нысандардың әсерінен бүлінген жерлерді рекультивациялау мен фиторемедиациялау әдістерін біріктіре отырып, оларды GRIBS атты интеллектуалды бақылау жүйесі арқылы үйлестіру ұсынылды. Бұл модель нақты шешім қабылдау құралы ретінде, бүлінген жерлерді қалпына келтіру процестерін ғылыми негізде бағыттауға және тиімді пайдалануға мүмкіндік береді.

Жалпы, дипломдық жұмыс зерттеу тақырыбына және жоғары оқу орнының ғылыми-әдістемелік талаптарына толықтай сәйкес келеді. Жұмыс мазмұны заманауи әдістермен орындалған, аналитикалық және қолданбалы аспектілер оңтайлы үйлестірілген. Осыған орай, дипломдық жұмысты 97% балл (өте жақсы) деп бағалап, Зейнеш Сымбаттың бакалавр академиялық дәрежесін беруге және жұмысты қорғауға жіберуге ұсынамын.

Ғылыми жетекші

PhD қауымдастырылған профессор

«05» 06 2025ж.



Токтар Мұрат

РЕЦЕНЗИЯ

Дипломдық жұмысқа
(жұмыс түрлерінің атауы)

Зейнеш Сымбат Асқарқызы
(оқушының аты жөні)

6B07304 – Геокеңістіктік цифрлық инженерия
(мамандықтың атауы мен шифрі)

Тақырыбы: «Ядролық нысандардың қоршаған ортаның топырақ – экологиялық функцияларына әсерін зерттеу»

Орындалды:

а) слайдтық бөлім 13 парак

б) түсініктеме 20 бет

ЖҰМЫСҚА ЕСКЕРТУ

Бұл дипломдық жұмыста ядролық нысандардың топырақтың экологиялық функцияларына әсері кешенді түрде зерттелген. Зерттеу нысаны ретінде Семей полигонының Дегелең массиві алынған. Студент қашықтықтан зондтау, ГАЗ технологиялары және лабораториялық талдауларды тиімді қолданған. Жұмысқа елеулі ескертулер жоқ.

ЖҰМЫСТЫҢ БАҒАСЫ

Ізденуші Зейнеш Сымбат Асқарқызының дипломдық жұмысы ғылыми терендігімен, құрылымдық нақтылығымен ерекшеленеді. Қазіргі кезде өзекті тақырып таңдалған – ядролық нысандардың топырақ экожүйесіне тигізетін әсерін жан-жақты зерделеуге бағытталған.

Зерттеуші қашықтықтан зондтау әдістерін, Sentinel-2 деректерін қолданып, QGIS геоакпараттық бағдарламасында картографиялық талдау жүргізуі — зерттеудің заманауи әдістермен орындалғанын көрсетеді. Лабораториялық зерттеу нәтижелері жұмыстың практикалық негізін күшейтіп, алынған мәліметтерге ғылыми дәлдік беріп отыр. Сонымен қатар, зерттеу ауқымы тек жергілікті шеңберде шектелмей, шетелдік және отандық тәжірибелер салыстырылып, жаңа стратегия ұсынылған. Жалпы, жұмыс жоғары ғылыми деңгейде орындалған, сондықтан жұмысты 98 баллмен бағалаймын.

Рецензент

Әл-Фараби атындағы ҚазҰЗУ

*Картография және геоинформатика
кафедрасының доценті, т.ғ.к.*



Сарыбаев Е.С.

«09» 06 2025 ж.