

Агаарын $PM_{2.5}$ тоосонцрын морфологи, химийн найрлагын судалгааны зарим үр дүнгээс

Л.Энхцэцэг¹, Н.Төвжаргал^{2*}, П.Зузаан¹, Д.Шагжжамба¹, Ц.Амартайван^{1,2}

¹ Цөмийн физикийн судалгааны төв, Монгол Улсын Их Сургууль,

Энхтайвны өргөн чөлөө-122, Улаанбаатар хот, Монгол улс

² Монгол Улсын Их Сургууль, Шинжлэх ухааны сургуулийн

Физикийн тэнхим, Улаанбаатар хот 210646, Монгол улс

Бид энэ ажлаар Улаанбаатар хотын агаарын $PM_{2.5}$ тоосонцрын бохирдлын морфологи, химийн найрлагыг SEM-EDX-ийн аргаар судлав. Судалгааг зуны 15, өвлийн 10 өдрийн агаарын тоосонцрын дээжийг авч 5000X өсгөлттэй электрон микроскопын зургийг ашиглан $PM_{2.5}$ тоосонцрын морфологийн анализ хийсэн бол тухайн хэлбэр, хэмжээ бүхий тоосонцрын 639 ширхэгт элементийн анализ хийв. Тоосонцрын хэмжээний түгэлтийг тодорхойлсон дүнгээр нийт тоологдсон дүрсийн 80% хувийг 0.5 мкм хүртэлх хэмжээтэй тоосонцор эзэлж байгаа дүн гарсан бөгөөд энэ нь агаарын хатуу бодисын бохирдлын хүний эрүүл мэндэд хамгийн хортой фракц юм. Тус хэмжээтэй тоосонцор өвлийн улиралд 92% хүртэл нэмэгдэж дийлэнх нь тодорхойгүй хэлбэртэй тодорхойлогдсон нь шаталтын дүнд үүсэх $PM_{2.5}$ тоосонцрын бохирдол нь хэт нарийн ширхэгтэй, тодорхойгүй хэлбэр дүрс бүхий байгааг илтгэж байна. Мөн тоосонцрын ширхэгийн химийн найрлагыг судласан үр дүнг үзүүлэв.

PACS numbers: 68.37.-d, 81.10.Aj, 78.70.En

I. УДИРТГАЛ

Янз бүрийн үүсгүүрээс агаарт хаягдах бохирдуулагч бодисууд нь дангаараа болон нэгдэл үүсгэж хүрээлэн буй орчин, хүний эрүүл мэндэд сөргөөр нөлөөлдөг. Зураг 1-т агаарын бохирд-

*E-mail: tuvjargal@num.edu.mn

лын хүний эрүүл мэндэд үзүүлэх хор, нөлөөллийг үзүүлэв. Агаар дахь хатуу бодис (Particulate Matter) буюу тоосонцрын бохирдол тэр дундаа $PM_{2.5}$ нарийн ширхэглэгт тоосонцор нь бүх эрхтэн тогтолцооны өвчлөлийн шалтгаан болж байна [1].

АМЬСГАЛЫН ТОГТОЛЦОО

(NO_2 , SO_2 , $PM_{2.5}$)

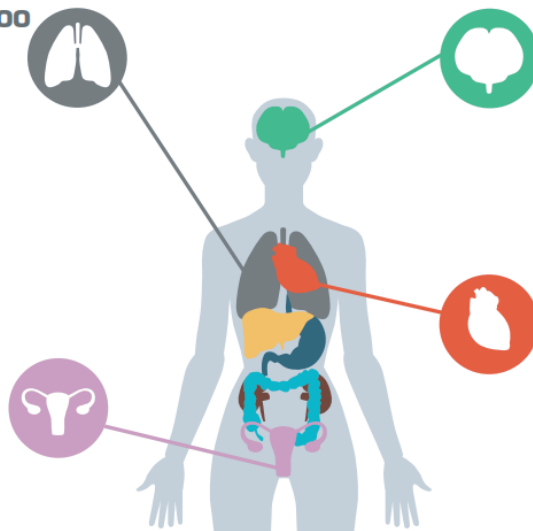
Амьсгалын замын хурц болон архаг өвчнүүд хамаарна

- Ханиах, найтаах
- Хоолой сэрвэгнэх
- Уушги гэмтэх
- Уушгины хавдар
- Бронхит
- Багтраа

НӨХӨН ҮРЖИХҮЙН ТОГТОЛЦОО

(SO_2 , $PM_{2.5}$, PM_{10} , CO)

- Төрөлхийн гажиг
- Дутуу төрөлт
- Бага жинтэй төрөлт
- Үргүйдэл



МЭДРЭЛИЙН ТОГТОЛЦОО

($PM_{2.5}$, CO_2 , SO_2)

- Толгой өвдэх
- Ядрах
- Уурлах, бухимдах
- Тархины цусан хангамжийн дутагдал

ЗҮРХ СУДАСНЫ ТОГТОЛЦОО

($PM_{2.5}$, PM_{10} , SO_2)

- Зүрх судасны үйл ажиллагааны алдагдал
- Зүрх судасны өвчин
- Зүрхний шигдээс

Зураг 1: Агаарын бохирдлын хүний эрүүл мэндэд үзүүлэх хор, нөлөө[1]

$PM_{2.5}$ тоосонцор хүний эрүүл мэндэд үзүүлэх нөлөөлөл нь түүний химийн найрлага, хэлбэр, хэмжээнээс хамаардаг [2–4]. Тухайлбал, 7 мкм-ээс бага хэмжээтэй тоосонцрууд амьсгалын замаар нэвтэрч астма, бронхит, силикоз, эмпием зэрэг амьсгалын замын архаг өвчлөлүүдийг үүсгэн хүндрүүлж эсийн түвшинд үйл ажиллагааны болон доод бүтцийн доголдлыг үүсгэн хорт хавдар үүсэх шалтгаан болдог ба 0.5 мкм-ээс бага хэмжээтэй нь төрөл бүрийн хавдар, түүний шалтгаан болон судасны хананд нэвчин цусанд орж судасны бөглөрөл үүсгэн, цусны эргэлтийн тогтолцоогоор дамжин зүрхэнд тусч даралт ихсэх нь даамжирснаар яваандаа зүрхний шигдээс үүсгэдэг байна [5]. Зураг 2 -т тоосонцор хүний биед нэвтрэх хэмжээ, үзүүлэх нөлөөг харуулав.



Зураг 2: Тоосонцор хүний биед нэвтрэх хэмжээ, үзүүлэх нөлөө [5]



Зураг 3: $PM_{2.5}$ болон PM_{10} тоосонцрын хэмжээний харьцуулалт [6]

Түүнчлэн тоосонцрын хэлбэр гэдэг нь түүний морфологийг тодорхойлох нэг чухал параметр бөгөөд энэ нь тоосонцрын бохирдлын эх үүсвэртэй

хэрхэн холбогдож байгааг авч үзэх болно. Аэрозол судлаачид тоосонцрын бохирдлыг диаметр хэмжээгээр нь 2.5-10 мкм хэмжээтэй $PM_{10-2.5}$; 2.5 мкм-ээс бага хэмжээтэй $PM_{2.5}$ хоёр фракцаар ялган судладаг [7]. Зураг 3 -т тоосонцрын хэмжээний харьцуулалтыг үзүүлэв.

Манай улсад цаг уур, орчны шинжилгээний газар агаарын чанарын ерөнхий шаардлага MNS4585:2016 -ын дагуу дээрх 2 фракцаар тоосонцрын мониторингийн мэдээ гаргадаг хэдий ч Улаанбаатар хотын агаарын чанарыг үнэлэх, тэр дундаа тоосонцрын хүний эрүүл мэндэд үзүүлэх нөлөөлөл, өвчлөлийн эрсдэлийг тооцоолоход шаардлагатай үзүүлэлт болохуйц судалгааны үр дүн дутмаг хэвээр байгаа юм [8].

Эрүүл мэндийн яамны мэдээгээр Монгол улсын хэмжээнд 2018 онд бүртгэгдсэн өвчлөлийн тохиолдол (давхардсан тоогоор) 3.0 саяд хүрч, 2008 оныхоос 2.0 дахин өсжээ. Бүртгэгдсэн өвчлөлийн тохиолдлын хандлагыг байршлаар авч үзвэл, 2008-2018 оны хооронд Улаанбаатар хотод 2013 оноос өссөн, аймгуудын хувьд буурсан хандлагатай байна. Үндэсний статистикийн хорооноос гаргасан "Улаанбаатар хотын гадаад орчны агаарын бохирдол ба эрүүл мэнд" тайлангаас үзэхэд хүн амын амьсгалын тогтолцооны, хүүхдийн хатгалгаа, уушгины архаг бөглөрөл зэрэг олон тооны өвчин агаарын тоосонцрын хэмжээний өөрчлөлийн давтамжаас хамаарч байгааг харуулсан байдаг [9]. Улаанбаатар хотын агаар дахь $PM_{2.5}$ тоосонцрын дундаж агууламж жил ирэх бүр нэмэгдэж байна. Тухайлбал 2019 оны хоёрдугаар сард өмнөх оны мөн үеэс 15%-аар өсөж 160 мкг/м³ болсон байдаг [9].

Иймээс агаар дахь $PM_{2.5}$ тоосонцрын морфологийн параметр түүний химийн найрлагыг судлах нь хүний эрүүл мэндэд үзүүлэх нөлөөг тогтоох, агаарын бохирдлыг бууруулахад чухал ач холбогдолтой. Сүүлийн жилүүдэд судлаачид агаар дахь тоосонцрын бохирдлыг энергиэр ялгах рентгенфлуоресценцийн детектор бүхий электрон микроскоп (SEM-EDX)-ийн аргаар судалж тоосонцрын хэлбэр хэмжээ, химийн найрлагыг тодорхойлох ажил хийж байна [10–12]. Энэ нь аэрозолийн тоосонцрын хэлбэр, хэмжээ, химийн найрлагыг зэрэг тодорхойлох сүүлийн үеийн арга юм.

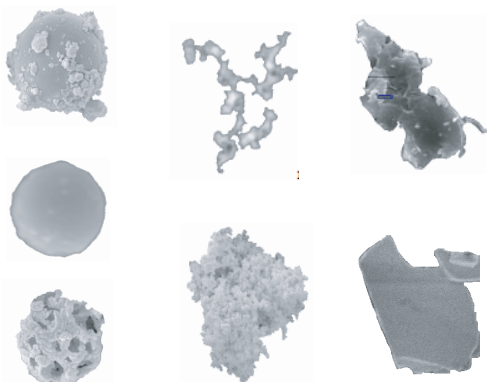
Иймээс бид Улаанбаатар хотын агаар дахь $PM_{2.5}$ тоосонцрын дээжийг тусгай шүүлтүүр ашиглан ялган авч тэдгээрийн хэлбэр, ширхэгийн хэмжээний түгэлт болон химийн найрлагыг SEM-EDX-ийн аргаар тодорхойлоход энэ ажлын зорилго оршино.

II. ТҮРШИЛТ

Улаанбаатар хотын агаар дахь тоосонцрын бохирдлын мониторингийн судалгааны цэг болох Баянзүрх дүүргийн 13 хороонд байрлах МУИС-

ийн Цөмийн физикийн судалгааны төвийн Gent агаарын дээж авагч төхөөрөмж ашиглан тоосонцрын дээжийг аэродинамик диаметрээр нь $PM_{2.5}$ болон PM_{10} 2 фракцаар ялган авсан. Улаанбаатар хотын энэ бүс нь хөрс болон шаталтын процессоос үүсэлтэй агаарын бохирдол өндөртэй бүс юм. Агаарын дээжийг авахдаа эхлээд $PM_{10-2.5}$ фракцын тоосонцрыг шүүх 8 мкм нүх бүхий шүүлтүүрээр, дараа нь $PM_{2.5}$ фракцын тоосонцрын дээжийг 0.4 мкм нүхтэй шүүлтүүрээр шүүж авна. Дээж авах шүүлтүүр поликарбонат материалтай, 47 мм диаметр хэмжээтэй. Агаарын $PM_{2.5}$ тоосонцрын морфологийн анализыг зуны 6, 7, 8-р саруудын 15 өдрийн дээж, өвлийн 11, 12, 1-р саруудын 10 өдрийн дээжинд санамсаргүй сонголтоор сонгон авч хийсэн. Ингэхдээ Hitachi, SU-8010 сканнин электрон микроскоп (SEM) ашиглан тоосонцрын ширхэгийн хэмжээ, хэлбэрийг судлах зураг, IXRF системийн SDD энергиэр ялгах рентген флуоресценцийн детектор (EDX)-аар химийн найрлагыг тогтоох хэмжилтүүдийг хийж гүйцэтгэсэн [13]. Нийт 25 дээж тус бүрээс 15 цэгийн зүслэг авч зүслэг бүр дээр бодит хэмжээнээс 5к дахин өсгөлттэй 3 удаагийн SEM зураг авч ашигласан. SEM зургийг боловсруулахад “Image J” зургийн программ ашиглан тоосонцрын хэлбэр, хэмжээний параметруудийг тодорхойлсон. Тоосонцрыг хэлбэрээр ангилахад судлаачид бөөрөнхий, өнцөгтэй, призм гэх мэт маш олон төрлийн геометр дүрсийг авч ашигладаг бол бид хамгийн ерөнхий байдлаар бөөрөнхий, өнцөгтэй ба үлдсэн геометрийн зөв биш хэлбэртэйг нь тодорхойгүй гэсэн 3 ангилалд хувааж авч үзлээ. SEM зурагт илэрсэн тоосонцрын хэлбэрийг дээрх 3 ангилалд хэрхэн хувааж авч үзсэнийг зураг 4-т үзүүлэв.

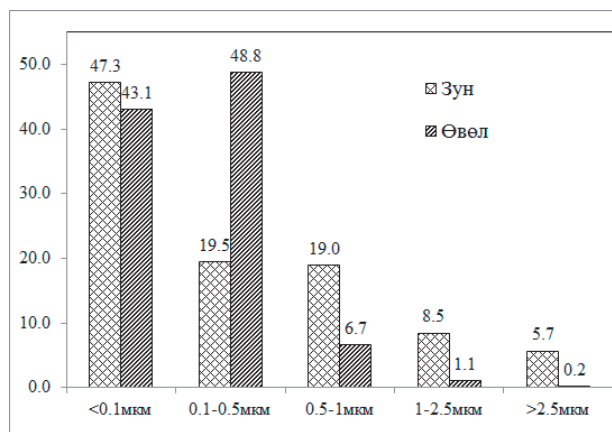
Бөөрөнхий Тодорхойгүй Өнцөгтэй



Зураг 4: SEM зурагт илэрсэн тоосонцруудын хэлбэрийн ангилал

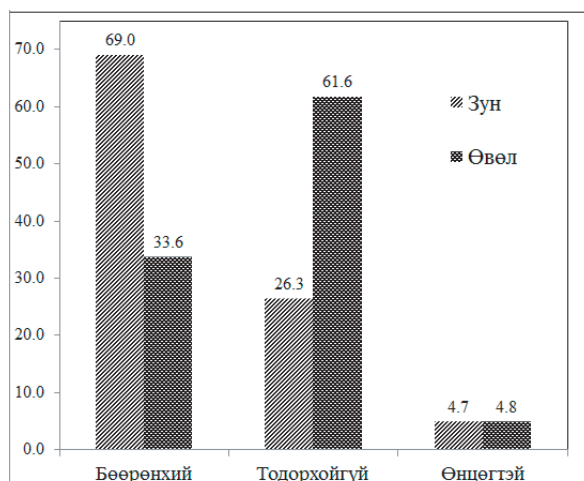
III. ҮР ДҮН, ХЭЛЭЛЦҮҮЛЭГ

Бидний энэхүү судалгаанд ашигласан зуны 15 дээж авсан өдрийн $PM_{2.5}$ тоосонцрын агаар дахь дундаж агуулга ~ 52.96 мкг/м³ байсан бол өвлийн улирлын 10 дээжийн хувьд ~ 101.29 мкг/м³ байсан. Манай улсын $PM_{2.5}$ тоосонцрын зөвшөөрөгдөх дундаж агуулга буюу стандарт нь 50 мкг/м³ байдаг [8]. Эдгээр дээжүүдээс авсан электрон микроскоп (SEM)-ийн 480 зургийг боловсруулж 10 сая гаруй тоосонцорын хэлбэр хэмжээний түгэлтийг гаргав. Тоосонцрын хэмжээний түгэлтийг өвөл, зуны хувьд харьцуулан гаргасан үр дүнг зураг 5-т үзүүлэв. Тоосонцрын хэмжээг ангилж түгэлтийг гаргахдаа ДЭМБ-аас гаргасан тоосонцрын бохирдол хүний эрүүл мэндэд үзүүлэх нөлөөлд үндэслэсэн болно [5]. $PM_{2.5}$ тоосонцрын хэмжээний түгэлтээс үзэхэд зуны улирлын дээжийн 66.8%-ийг, өвлийн улирлын дээжийн 91.9%-ийг 0.5 мкм хүртэлх хэмжээтэй тоосонцор эзэлж байна.



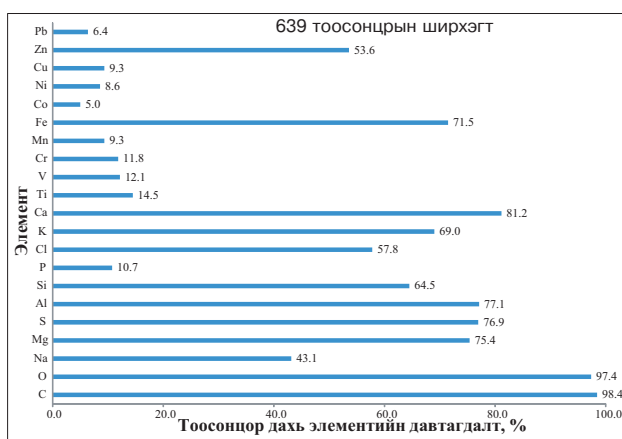
Зураг 5: $PM_{2.5}$ тоосонцрын хэмжээний түгэлт

Эндээс үзэхэд < 0.1 мкм хэмжээтэй тоосонцрын хэмжээ улирлаас хамаарсан өөрчлөлт ажиглагдахгүй байгаа бол $0.1 - 0.5$ мкм хэмжээтэй тоосонцрын хэмжээ зун $\sim 20\%$ байсан бол өвөл $\sim 50\%$ болж өссөн байна. Харин 0.5 мкм дээш хэмжээтэй тоосонцрын хэмжээ зун их өвөл бага байна. Энэ нь шаталтын бүтээгдэхүүн болох утаа тортгоос гаралтай тоосонцрын хэмжээ ихэвчлэн $0.1 - 0.5$ мкм хэмжээтэй, хөрсний гаралтай тоосонцрын хэмжээ ихэвчлэн 0.5 мкм дээш хэмжээтэй байж болохыг илтгэж байна. $PM_{2.5}$ тоосонцрын хэлбэрийн түгэлтийг өвөл, зуны хувьд харьцуулсан үр дүнг зураг 6-т үзүүлэв. Түгэлтээс харахад бөөрөнхий хэлбэртэй тоосонцрын хэмжээ өвөл 2 дахин буурсан бол тодорхойгүй хэлбэртэй тоосонцрын хэмжээ 2.3 дахин ихэссэн үр дүнг үзүүлж байна.



Зураг 6: $PM_{2.5}$ тоосонцрын хэлбэрийн түгээлт

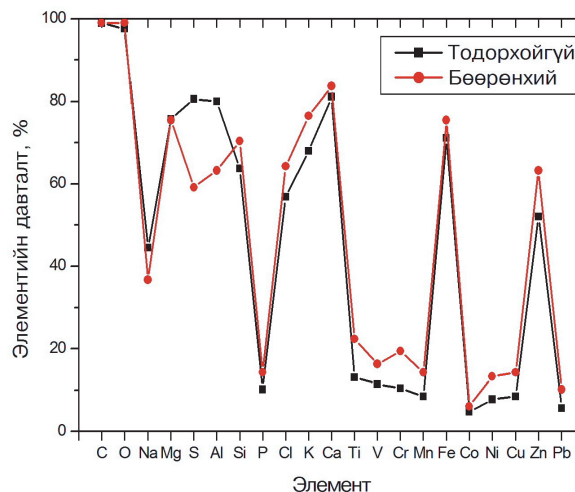
Харин өнцөгтэй хэлбэрийн тоосонцрын хувьд мэдэгдэхүйц өөрчлөлт ажиглагдахгүй байна. Байгалийн хүчин зүйлс болон хүний үйл ажиллагаанаас үүсэлтэй агаарт дэгдэх хатуу бодис нь шууд зөв бөөрөнхий хэлбэртэй хаягдах бараг боломжгүй ялангуяа шаталтаас үүсэх тоосонцор нь арзгар, хэлбэрийн ангилалд оруулахад төвөгтэй байдаг бол хөрснөөс дэгдэх тоосонцор нь агаарын урсгалд орж өөр хоорондоо мөргөлдөх, салхинд үрэгдэх замаар бөөрөнхий хэлбэрийг олдог байна[6]. Бид тоосонцрын элементийн агуулгыг тодорхойлох зорилгоор зуны 15 дээжээс авсан 522 ширхэг тоосонцорт, өвлийн 10 дээжээс авсан 117 ширхэг нийт 639 тоосонцорт EDX аргаар $PM_{2.5}$ тоосонцрын элементийн агуулгын тодорхойлсон үр дүнг зураг 7-т үзүүлэв.



Зураг 7: $PM_{2.5}$ тоосонцор дахь химийн элементийн агуулга, түүний давтагдалтын хувь

Эндээс үзэхэд C болон O-ийн агуулга бүх тоосонцорт улирлаас хамаарахгүй илэрсэн нь эдгээр

элемент нь агаарын бүрэлдэхүүн хэсэг төдийгүй дээж авсан шүүлтүүрийн материал поликарбонат байсантай холбоотой. Mg, S, Al, Si, Ca, Fe зэрэг элементүүд 50%-аас дээш хувийн давтагдалтайгаар илэрсэн байна. Тоосонцор дахь химийн элементийн агуулгыг хэмжсэн үр дүнгээс үзэхэд зарим элементүүд тоосонцрын хэлбэрээс хамааран харилцан адилгүй агуулгатай бүртгэгдсэн байсан. Иймд нийт элементийн агуулга тоосонцрын хэлбэрээс хэрхэн хамаарч байгааг зураг 8-т үзүүлэв.



Зураг 8: $PM_{2.5}$ тоосонцрын элементийн агуулга, хэлбэрийн хамаарал

Эндээс үзэхэд тодорхойгүй хэлбэртэй тоосонцорт S, Al элементүүд их агуулагдаж байгаа бол бөөрөнхий хэлбэртэй тоосонцорт Si, Ti, V, Cr, Mn, Zn зэрэг элементүүд илүү агуулагдаж байна. Энэ нь тоосонцрын гарал үүсэлтэй холбоотой байж болох юм.

IV. ДҮГНЭЛТ

Бид Улаанбаатар хотын агаарын бохирдол дахь тоосонцрын морфологи болон химийн найрлагыг SEM-EDX -ийн арга ашиглан судлав. Судалгааг зуны 15, өвлийн 10 фильтр дээрээс санамсаргүй сонголтоор сонгож авсан 480 зурагт буусан тоосонцруудад хэлбэр хэмжээний буюу морфологийн анализ хийсэн бол 639 тоосонцорт элементийн анализ хийв. Судалгааны дүнгээс үзэхэд хүний эрүүл мэндэд хамгийн хортой буюу 0.5 мкм-ээс бага хэмжээтэй тоосонцор ~85 хувийг бүрдүүлж байна. Өвлийн улиралд 0.5 мкм хүртэлх хэмжээтэй тоосонцор зуныхаас 25%-аар нэмэгдэж байгаа бол харин тодорхойгүй хэлбэртэй тоосонцрын хэмжээ 2 дахин нэмэгдэж байна. Эндээс шаталтын дүнд үүсэх $PM_{2.5}$

тоосонцор < 0.5 мкм хэмжээтэй, тодорхойгүй хэлбэртэй байж болох нь харагдаж байна. Мөн зуны улиралд хөрс шорооны гаралтай тоосонцор давамгайлж байгаа бол өвөл шаталтын бүтээгдэхүүнээс гаралтай тоосонцор давамгайлж байгааг харуулж байна.

PM_{2.5} тоосонцрын элементийн агуулгын давтагдлын хувийг, тоосонцрын хэлбэрээс хамаарах хамаарлыг үзүүлж, зарим элементийн агуулгаар тоосонцрын гарал үүслийг тодорхойлж болохыг үзүүлэв. Энэ үр дүнг цаашид агаар дахь тоосонцрын бохирдол үүсгэгч эх үүсвэрүүдтэй уялдуулан гарал үүсэл, хэлбэр хэмжээний түгэлттэй холбон нарийвчлан судалж, тайлбарлах шаардлагатай. Тоосонцрын хэмжээ, хэлбэрийн түгэлт түүний химийн элементийн найрлагыг тодорхойлох судалгааны дүн нь агаарын PM_{2.5} тоосонцрын хүний эрүүл мэндэд үзүүлэх нөлөөллийг үнэлэх, өвчлөлийн эрсдэлийг тогтоох, урьдчилан сэргийлэх арга хэмжээ авч хэрэгжүүлэх зэрэгт ач холбогдолтой.

ТАЛАРХАЛ

Энэхүү судалгааг МУИС-ийн ЦФСТ-ийн "Хүрээлэн буй орчин, биологийн объектыг шинжлэх цөмийн физикийн арга зүйн судалгаа" сэдэвт ажлын хүрээнд гүйцэтгэсэн бөгөөд ОУАЭА, Ази, Номхон далайн бүсийн хэлэлцээрийн байгууллагын шугамаар "Хотын тоосонцрын бохирдлын агаарын чанарт үзүүлэх нөлөөг үнэлэх" RAS7029 судалгааны төслийг хэрэгжүүлж буй хамт олон, судалгааны хэмжилтийг хийх тоног төхөөрөмжөөр тусалсан БНХАУ-ийн ӨМӨЗО-ны Багшийн их сургуулийн функционал материалын физик-химийн лабораторийн хамт олонд талархал илэрхийлье.

- [1] Эрүүл мэндийн яам, Нийгмийн эрүүл мэндийн үндэсний төв, Баримтын цомог: Агаарын бохирдол хүний эрүүл мэндэд, 2018 он
- [2] Schwartz, J. (1994) Air Pollution and Daily Mortality: A Review and Meta-Analysis. *Environmental Research*, 64, 36-52.
- [3] Brüning, Thomas et al. Assessment of the Health Effects of Toner Particles on People in the Workplace. BG Research Institute for Occupational Medicine. 2006, pp. 14 et seq
- [4] Dockery, D.W. and Pope, Acute Respiratory Effects of Particulate Air Pollution. *Annual Review of Public Health*, 1994, 15, 107-132, C.A.
- [5] <https://www.who.int/airpollution/en/>
- [6] <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics>
- [7] National Research Council. 1998. Research Priorities for Airborne Particulate Matter: I. Immediate Priorities and a Long-Range Research Portfolio. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/6131>.
- [8] Стандартчилал хэмжилзүйн газар, Агаарын чанар, Техникийн ерөнхий шаардлага-Монгол Улсын стандарт MNS 4585:2016, 2016 он
- [9] Монгол Улсын үндэсний статистикийн хороо, Улаанбаатар хотын гадаад орчны агаарын бохирдол ба эрүүл мэнд, 2019 он
- [10] Roberto Ramirez-Leal, Maryanna Valle-Martinez, Martin Cruz-Campas, 'Chemical and Morphological Study of PM₁₀ analysed by SEM-EDS, 2014, 3, 121-129, Mexico
- [11] Bob Hafner, Energy Dispersive Spectroscopy on the SEM, Chapter 1, Characterization Facility, University of Minnesota-Twin cities, 2009
- [12] Ramirez-Leal, R., Valle-Martinez, M. and Cruz-Campas, M. (2014) Chemical and Morphological Study of PM₁₀ Analysed by SEM-EDS. *Open Journal of Air Pollution*, 3, 121-129
- [13] Л.Энхцэцэг, Н.Төвжаргал, Д.Шагжжамба, П.Зузаан., МУИС-ийн эрдэм шинжилгээний бичиг 478, ФИЗИК сэтгүүл (25), х133, 2017