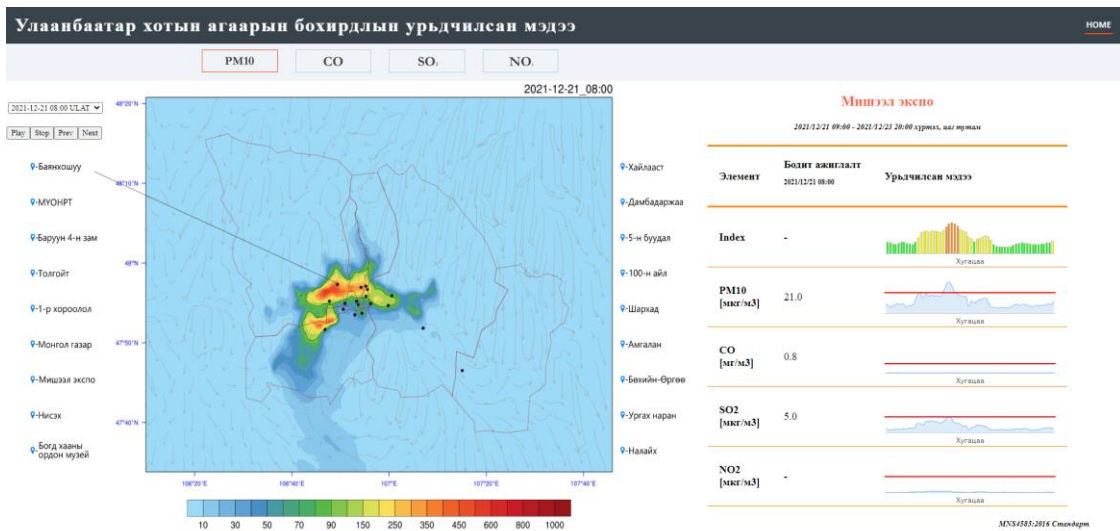




Улаанбаатар хотын агаарын бохирдлын прогнозын технологи



Улаанбаатар 2022

Агуулга

1	Оршил	3
2	Судалгааны арга зүй болон мэдээ, өгөгдөл	4
2.1	Бүс нутгийн агаарын бохирдлын WRF-Chem загвар.....	4
2.2	Эх үүсвэрийн ялгарлын мэдээ	5
3	Үр дүн	9
3.1	Агаар бохирдуулагч бодисын хэмжилт	9
3.2	Улаанбаатар хотын агаарын бохирдлын хоногийн явц, динамик	10
3.3	Агаарын бохирдлын прогнозын үр дүн	12
3.4	Агаарын бохирдлын прогноз мэдээг хэрэглэгчид хүргэх.....	14
4	Дүгнэлт, санал	16
5	Ашигласан номзүй	17
6	Хавсралт	18

1 Оршил

Монгол орны төв суурин газар, ялангуяа хүн амын 50 гаруй орчим хувь нь аж төрөн амьдардаг Улаанбаатар хотод өвлийн улиралд агаарын бохирдол дээд цэгтээ хүрдэг. Учир нь гэр хорооллын айлууд, бага оврын уурын зуухууд нүүрсийг харьцангуй их хэмжээгээр түлж агаар мандалд харьцангуй их бохирдлыг бий болгохоос гадна, цахилгаан станц, автомашин ч бохирдолд тодорхой хувь нэмрийг оруулдаг юм.

Энэхүү улирлын чанартай эх үүсвэрийн харьцангуй их ялгаралтаас гадна Улаанбаатар хотын өөрийнх нь газарзүйн онцлог, Монгол орны нутаг дэсвгэрт Сибирийн их даралтын орон өвлийн улиралд тогтвортой ноёлдог, түүний улмаас эх газар дулаанаа алдаж, газар орчимд эрчимтэй инверсын давхарга тогтдог зэрэг нь эрчимтэй агаарын бохирдлыг харьцангуй удаан хугацаанд байх нөхцлийг бүрдүүлдэг. Энэ нөхцөл хүн амын эрүүл мэнд, ялангуяа нийгмийн эмзэг бүлэгт хүчтэй нөлөөлж байгаа тул Улаанбаатар хотын агаарын бохирдлыг богино хугацаандаа (1-3 хоног) урьдчилан тооцоолж, зарлан мэдээлэх нь чухал холбогдолтой байгаа юм.

Төслийн судалгааны ажлаар бид дараахь зорилтыг тавж ажиллав. Үүнд:

1. Агаарын бохирдлын бүс нутгийн WRF-Chem загварыг зүгшрүүлэх, 48-72 цагийн урьдчилалтай прогноз гаргах шуурхай
2. Агаарын бохирдлын прогнозыг олон нийтэд хүргэх вэб хуудсыг хөгжүүлэх
3. Сургалт, семинар зохион байгуулж, үр дүнг хэлэлцүүлэх зэрэг болно (Хавсралт).

Эцэст нь судалгаагаар доохи үр дүнг гаргав. Үүнд:

- Агаарын бохирдлын WRF-Chem загварыг суперкомпьютерт суулгах, оролтын мэдээ бэлтгэж ажиллуулав.
- Эх үүсвэрийн ялгаралтын тооцоог цахилгаан станц, гэр хороолол, автомашин, бага оврын уурын зуухын хувьд тооцоолж, грид мэдээ рүү хөрвүүлэв.
- Агаарын бохирдлын прогноз үр дүнг газрын хэмжилтийн мэдээтэй харьцуулж алдааг үнэлэн систем алдааг арилгав.
- Агаарын бохирдлын прогноз агууламжийн утгыг индексжүүлэв.
- Бохирдлын прогнозын технологийг боловсруулж, шуурхай ажиллах программ хангамжийг бичив.
- Вэб хуудаст орох тоон мэдээ, зураг, графикийг бэлтгэж, дизайныг гаргаж вэб хуудсыг хөгжүүлэв.

Эцэст нь хөгжүүлсэн агаарын бохирдлын прогнозын технологи нь чанарын индекс (index), PM10-ийн тоосонцор, нүүрстөрөгчийн дутуу исэл (CO), хүхэрлэг хий (SO₂), азотын давхар исэл (NO₂)-ийн агууламжийг хоногт 2 удаа 72 цагийн урьдчилалтайгаар харуулын хэмжилтийн 18 цэгээр гаргадаг байдлаар хөгжүүлсэн болно. Мөн тэдгээрийн орон зайн тархалтыг тооцоолон зураг байдлаар, хөдөлгөөнт дүрсээр үзүүлэв.

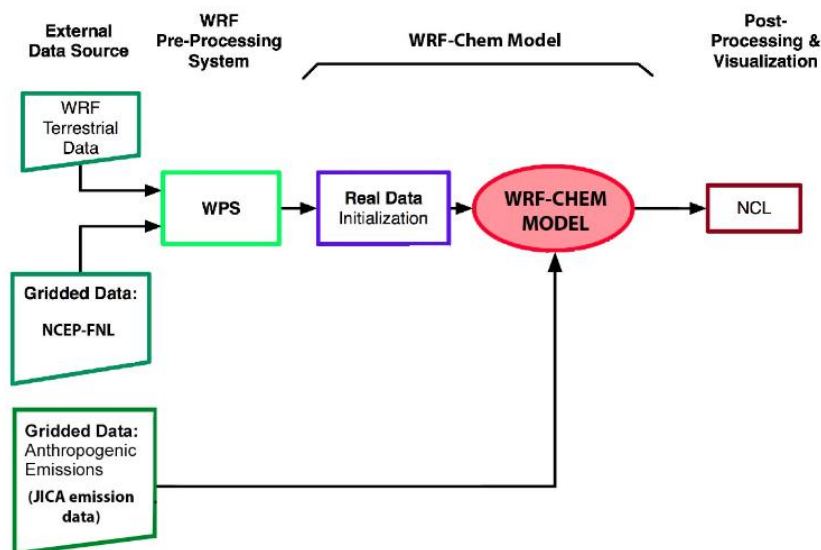
2 Судалгааны арга зүй болон мэдээ, өгөгдөл

2.1 Бүс нутгийн агаарын бохирдлын WRF-Chem загвар

Энэхүү WRF-Chem загвар агаар мандлын WRF (Weather Research Forecast) загварт суурилсан, Эйлерийн гидростатик биш динамик онолд үндэслэгдсэн. Загварын үндсэн дифференциаль тэгшитгэлүүд өндөршлийг дагасан даралтаар нормчлогдсон босоо координатад тодорхойлогдсон байна (Laprise, 1992). Харин загварын химийн хэсэг нь хуурай унал, байгалийн болон антропоген ялгаралт, хийн фазын химийн механизм, фотолиз, аэрозолын шууд болон шууд бус нөлөө, хүлэмжийн хийн зөөгдөл зэргийг загварчилдаг болно.

WRF-Chem загварыг Зураг 1-т үзүүлсэн байдлаар судалгаа болон прогнозын технологид ашиглав. Гол нь агаар мандын загварын бүрэлдхүүн хэсэгт химийн хэсэг нэмэгдэж, агаарын бохирдлын ялгаралтын мэдээ оролтонд орсон бөгөөд бидний судалгаанд ЖАЙКА олон улсын байгууллагын төслөөс гаргасан гэр хороолол, авто зам, дулааны цахилгаан станцын /ДЦС/ инвентор мэдээг загварын оролтын мэдээ болгон ашиглав.

Хүснэгт 1-т судалгаанд ашиглагдсан WRF-Chem загварын конфигурацийг үзүүлэв. Харин загварын хамрах бүс нутгийн өндөршил, газар бүрхэвчийн ангилалыг Зураг 2-т үзүүлээ.

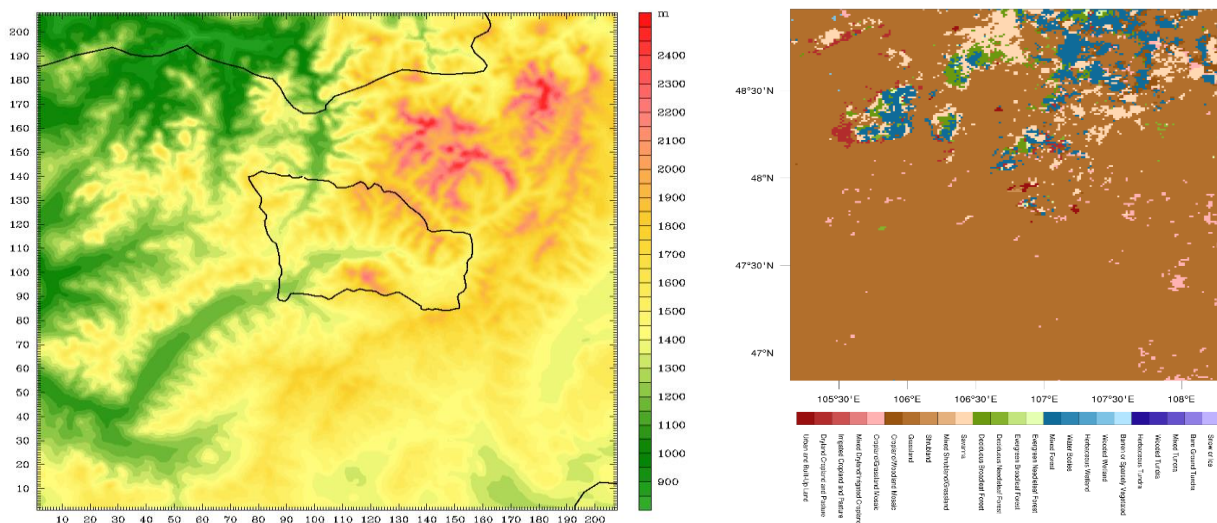


Зураг 1. WRF-Chem загварын бүрэлдхүүн хэсэг

Хүснэгт 1. WRF-Chem загварын конфигураци

Name	Selection
Model and version	WRF-Chem v3.4.1 (Skamarock et al., 2008)
Dynamic core	Advanced Research WRF (ARW)
Horizontal grid resolution (size)	1x1 km (208x208 grid)
Vertical levels	43
Initial and lateral boundary conditions	NCEP_GFS forecast data
Computational platform	Cray XE6m (224 cores)
Simulation length	72 hours (3 days)
Time step	6 seconds
<i>Physics schemes</i>	
Cloud microphysics	Lin scheme (Lin et al., 1983)
Shortwave radiation	Dudhia scheme, (Dudhia, 1989)

Longwave radiation	RRTM scheme, (Mlawer et al., 1997)
PBL physics	Yonsei scheme, (Hong et al., 2006)
<i>Chemistry schemes</i>	
Chemical mechanism scheme	RADM2 scheme, Stockwell et al. (1990)
Photolysis scheme	Fast-J photolysis scheme, (Wild et al., 2000)
Aerosol scheme	No aerosol scheme
Emission data	
Biogenic emissions	No biogenic emissions
Anthropogenic emissions	User-specified anthropogenic emissions such as JICA emission (АББГ, 2017)



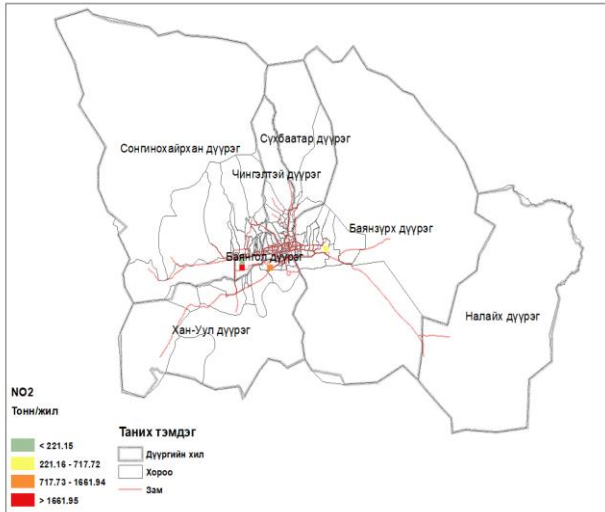
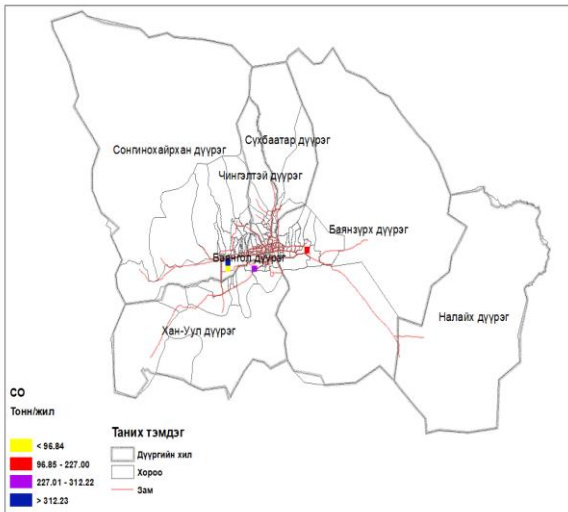
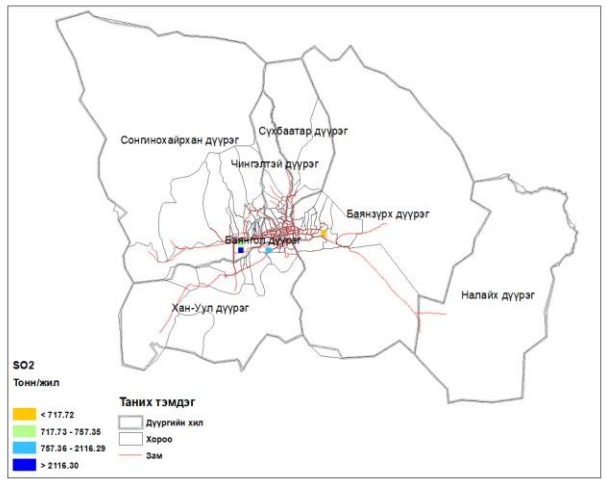
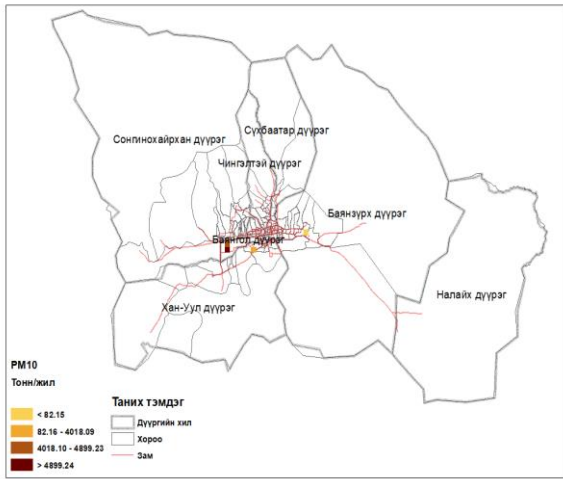
Зураг 2. загварын хамрах бүс нутгийн өндөршил, газар бүрхэвчийн ангилал

Агаарын бохирдлын агаар мандлын загварт АНУ-ын Хүрээлэн буй орчны төвийн дэлхийн хэмжээст NCEP_GFS загварын 27 даралтын түвшний 0.5°x0.5° нарийвчлалтай грид мэдээний прогноз утгыг анхны болон захын нөхцлөөр авч ашиглав. Энэ нь 3 цаг тутамдаа шинэчлэгдэж байна.

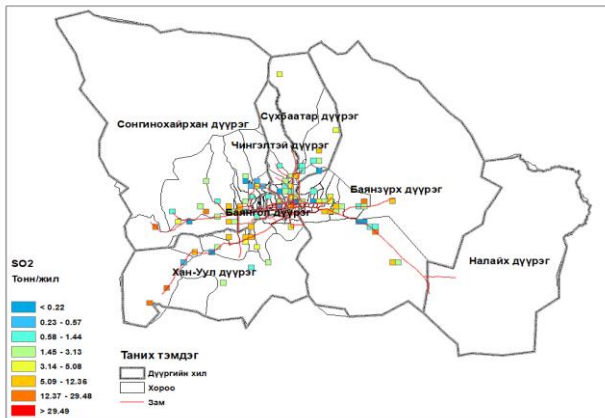
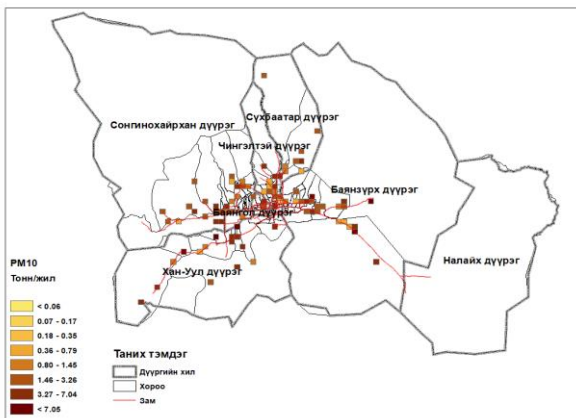
2.2 Эх үүсвэрийн ялгарлын мэдээ

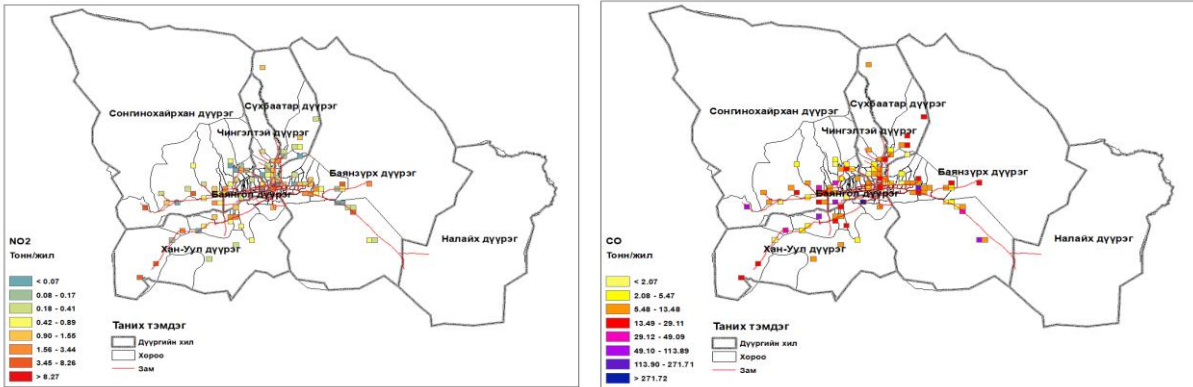
Судалгааны ажилд ЖАЙКА олон улсын байгууллагын төслөөс гаргасан гэр хороолол, авто зам, дулааны цахилгаан станцын /ДЦС/ инвентор мэдээг загварын оролтын мэдээ болгон ашиглав.

ДЦС болон уурын зуухны ядангийн мэдээлэл, ядангаас гарах хийн төлөв, зуух ашиглалтын байдал, нүүрсний шинж төлөв гэх мэдээллийг ашиглан тооцоолсон сарын болон жилийн нүүрсний зарцуулалтыг Зураг 3-4-т үзүүлэв.



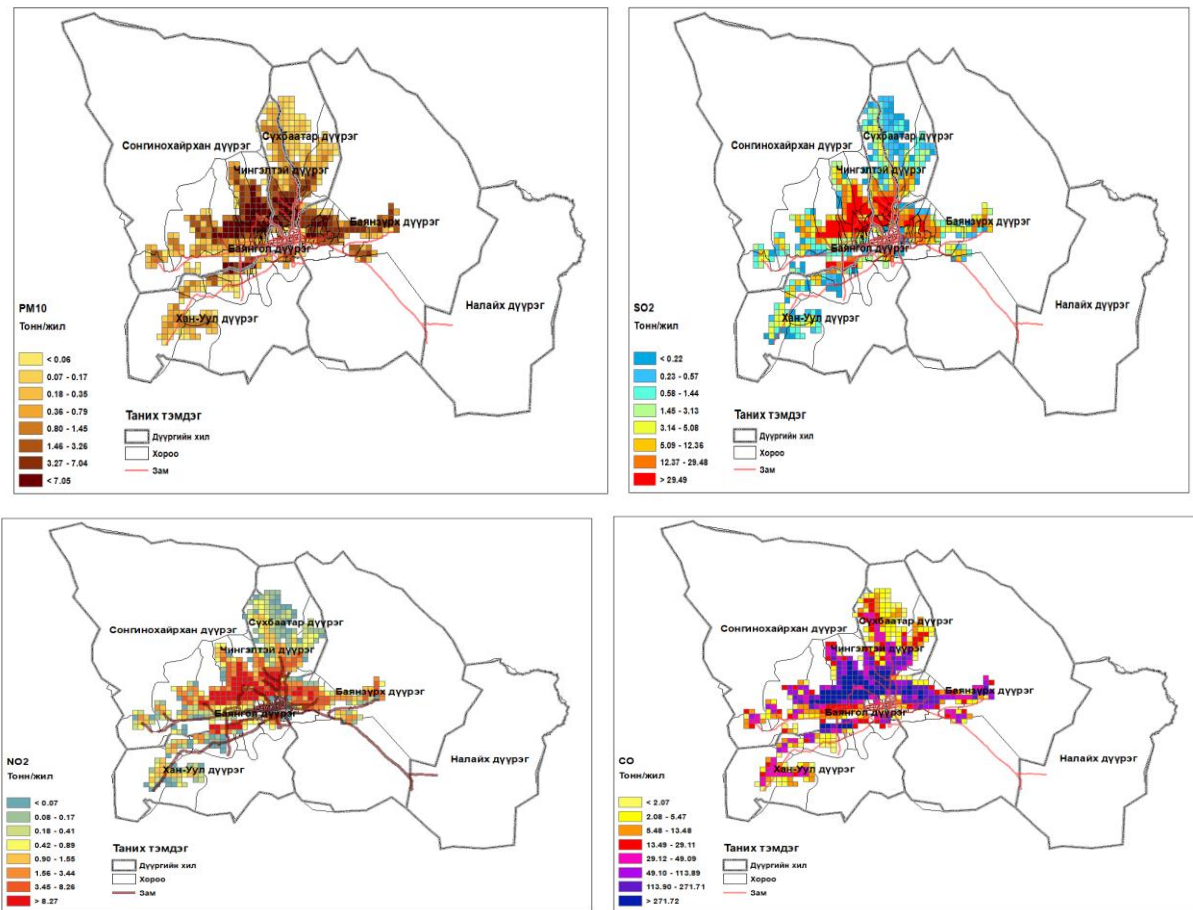
Зураг 3. Бохирдуулагч тус бүрээр тооцоолсон 2020 оны ДЦС-ын ялгаралт, тонн/жил





Зураг 4. Бохирдуулагч тус бүрээр тооцоолсон 2020 оны уурын зуухны ялгаралт, тонн/жил

Нийслэлийн хороодын айл өрхийн тоо болон хороодод сайжруулсан зуухыг борлуулсан тоо мэдээ, бусад мэдээллийг ашиглан хороо тус бүрийн түлшний зарцуулалтын хэмжээг тооцоолсныг Зураг 5-т үзүүлэв.

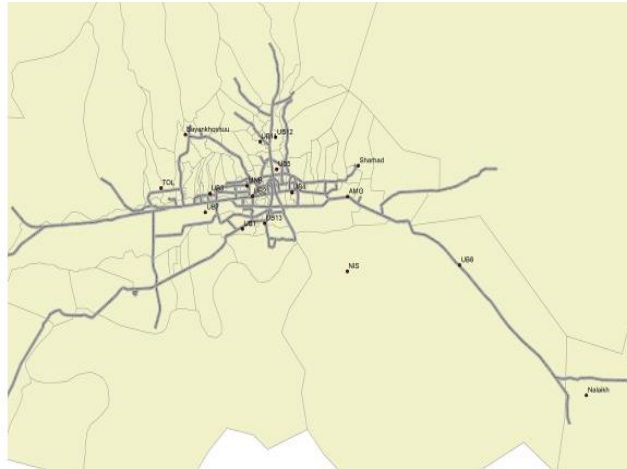


Зураг 5. Бохирдуулагч тус бүрээр тооцоолсон 2020 оны гэр хорооллын ялгаралт, тонн/жил

Харин автомашины эх үүсвэрийн инвенторт хөдөлгөөний эрчмийн нягтшил нь үйл ажиллагааны суурь өгөгдөл болон тухайн замын нийт зорчилт, замын урт зэргийг тооцсон гол замын ялгаралтыг авч үзэв.

Агаарын бохирдлын харуулын хэмжилтийн мэдээ

Мөн Улаанбаатар хотын агаарын чанарын 14 харуулын 2020-2021 оны цаг тутмын PM10, PM2.5, CO, SO2 NO2 болон O3-ын эх мэдээг ашиглав (Зураг 6). Мөн нэмэлтээр 2019 оны автозамын 14 замын камерын цаг тутмын мэдээ / 100 айл, сансар, Гэсэр сүм, Зүүн 4 зам, 25-р эмийн сан, Бөхийн өргөө, Багшийн дээд, Баруун 4 зам Намянжугийн гудамж, Энхтайвны гүүр, Саппоро гэсэн 8 зам/, 2020. 2021 оны сар бүрийн түлшний нийлүүлэлтийн мэдээ зэргийг ашиглав.



Зураг 6. Улаанбаатар хотын агаарын чанарын харуулуудын байршил

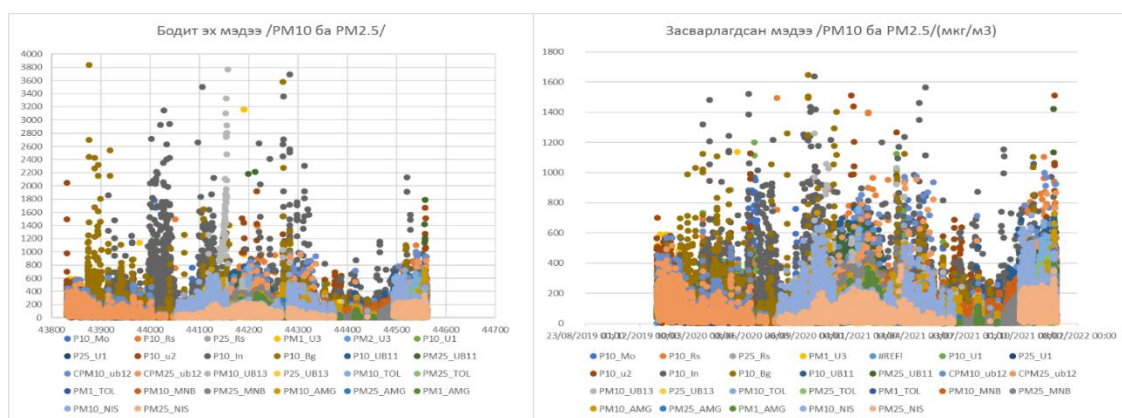
3 Үр дүн

3.1 Агаар бохирдуулагч бодисын хэмжилт

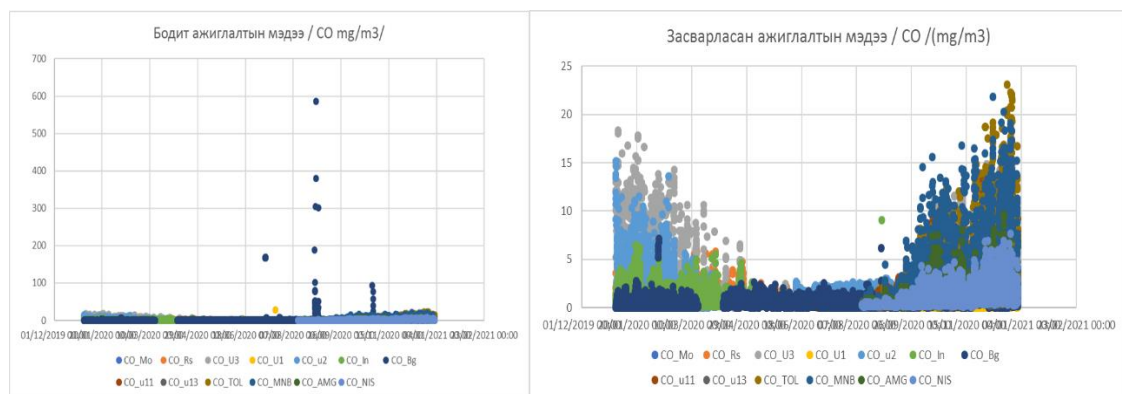
Улаанбаатар хотын агаарын бохирдлын хоногийн явц, динамикийг нарийн ширхэглэгт тоосонцор (PM10, PM2.5) хүхэрлэг хий (SO2) азотын давхар исэл (NO2) газар орчмын озон (O3) бодисуудаар гаргав. Ингэхдээ агаарын чанарын 14 харуулын цаг тутмын мэдээнд шалгалт хийж дараахь тохиолдлын мэдээг тооцооноос гологдол болгон хасав. Үүнд:

- Тэг утгуудыг ажиглалт хийгдээгүй гэж үзэх.
- PM10 concentration < PM2.5 concentration утгуудыг хаслаа.
- Станцууд дээр нийтлэг ажиглагдаагүй илт их үсрэлттэй утгуудыг хассан. Эдгээр утгууд нь багажийн алдаа гэж үзэв.

Зураг 7-8-т жишээ болгон бодит хэмжилтийн мэдээ, засварласан мэдээг харьцуулан үзүүлэв.



Зураг 7. PM10 ба PM2.5 агууламжийн мэдээг шалгаж сайжруулсан байдал



Зураг 8. Угаарын хийн (CO) агууламжийн мэдээг шалгаж сайжруулсан байдал

Мөн бүх ажиглалтын мэдээний ирцийг харуул бүр дээр гаргаж 70%-иас дээш ирцтэй мэдээнд боловсруулалт хийв (Зураг 9). Энэхүү дүнгээс харвал Улаанбаатар хотын мэдээний тасралтгүй байдал, чанар олон харуул дээр сайнгүй байна.

	2020	2021		2020	2021		2020	2021
P10_Mo	97.146118	97.557077	O3_Mo	99.93150685	39.7716895	SO2_Mo	97.84246575	96.26712329
P10_Rs	83.66438356	88.02511416	O3_U3	45.90182648	31.71232877	SO2_Rs	82.39726027	89.9543379
P25_Rs	81.28995434	89.41780822	O3_U1	77.10045662	80.0456621	SO2_U3		75.23972603
PM1_U3	50.07990868	0.011415525	O3_u2	54.48630137	89.16666667	SO2_U1	95.03424658	95.77625571
PM2_U3	47.9109589	0.011415525	O3_Bg	99.94292237	90.91324201	SO2_u2	97.97945205	94.6803653
P10_U1	88.28767123	97.43150685	O3_TOL	18.27625571	73.94977169	SO2_In	93.65296804	95.68493151
P25_U1	90.05707763	61.67808219	O3_MNB	22.42009132	73.82420091	SO2_Bg	82.79680365	73.05936073
P10_u2	97.1347032	97.46575342	O3_AMG	20.78767123	73.69863014	SO2_UB11	28.12785388	94.543379
P10_In	88.15068493	93.39041096	O3_NIS	36.75799087	77.2260274	SO2_ub12	75.2283105	98.69863014
P10_Bg	96.05022831	97.3630137				SO2_UB13	24.29223744	95.78767123
P10_UB11	22.71689498	77.53424658				SO2_TOL	0.079908676	0.011415525
PM25_UB11	22.89954338	77.15753425				SO2_MNB	27.57990868	95.19406393
CPM10_ub12	73.60730594	88.99543379	NO2_Rs	88.94977169	99.69178082	SO2_AMG	23.82420091	87.43150685
CPM25_ub12	73.56164384	88.98401826	NO2_U3	33.86986301	74.46347032	SO2_NIS	36.75799087	78.96118721
PM10_UB13	12.97945205	90.61643836	NO2_U1	97.52283105	99.85159817			
P25_UB13	18.31050228	35.84474886	NO2_u2	54.65753425	53.72146119			
PM10_TOL	34.31506849	89.07534247	NO2_In	95.55936073	97.6826484			
PM25_TOL	34.31506849	86.28995434	NO2_BG	49.62328767	85.30821918			
PM1_TOL	34.34931507	2.933789954	NO2_UB11	27.84246575	90.63926941			
PM10_MNB	33.37899543	95.06849315	NO2_ub12	50.14840183	73.33333333			
PM25_MNB	33.41324201	95.05707763	NO2_UB13	7.168949772	92.38584475			
PM10_AMG	34.7260274	51.99771689	NO2_TOL	16.50684932	37.47716895			
PM25_AMG	34.76027397	52.03196347	NO2_MNB	31.47260274	88.90410959			
PM1_AMG	34.79452055	49.09817352	NO2_AMG	34.76027397	94.42922374			
PM10_NIS	35.2283105	55.20547945	NO2_NIS	36.76940639	66.91780822			
PM25_NIS	35.26255708	57.03196347						

Зураг 9. Улаанбаатар хотын агаарын чанарын харуулуудын хэмжилтийн ирц.

3.2 Улаанбаатар хотын агаарын бохирдлын хоногийн явц, динамик

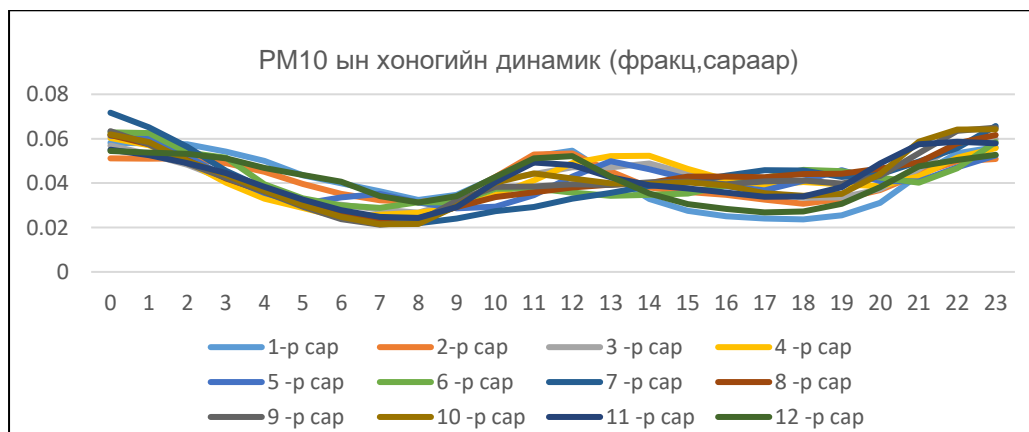
Улаанбаатар хотын агаарын бохирдлын хоногийн явцыг гаргахдаа 2020, 2021 онд мэдээний ирц 70%-иас дээш байсан харуулын мэдээг ашиглав. Тухайн бодисын агууламжийн хоногийн явц нь эх үүсвэрээс ялгарч байгаа хэмжээ, хугацаа, бодисын физик химийн шинж чанар, болон тухайн үеийн цаг агаарын нөхцлөөс хамаарч өөрчлөгдөж байдаг.

Харуулуудын сар бүрийн цаг тутмын дунджийг гаргаж дундаж агууламжийн хоногийн явцыг гаргаж, сар бүрийн тухайн цагийн утгыг 24 цагийн дундаж утгын нийлбэрт харьцуулах замаар 0-1 утгын хооронд фракцлав.

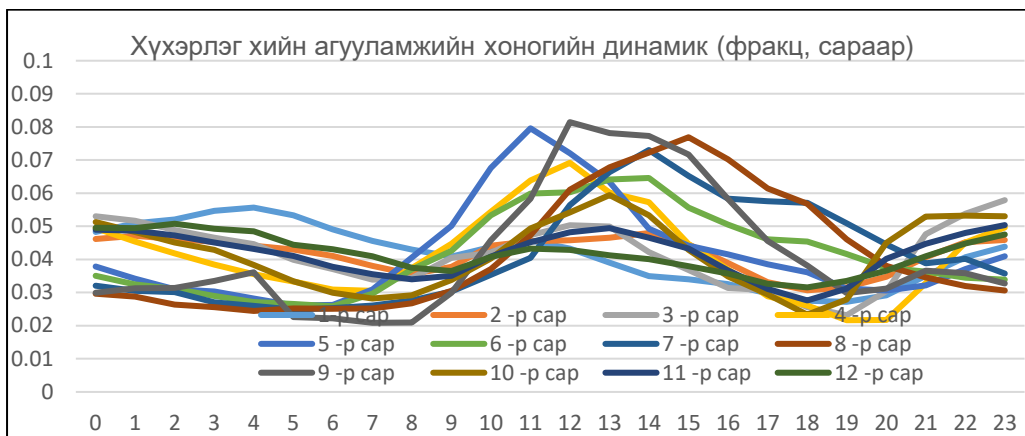
$$\text{Fraction(Pollutant)}_i = \frac{\text{concentration(Pollutant)}_i}{\sum_{i=1,24} \text{Concentration(Pollutant)}_i}$$

Энэхүү утгыг агаарын бохирдлын прогнозын загварт ялгарлтын мэдээг 24 цагаар тодорхой явц, динамиктайгаар оруулахад ашиглав.

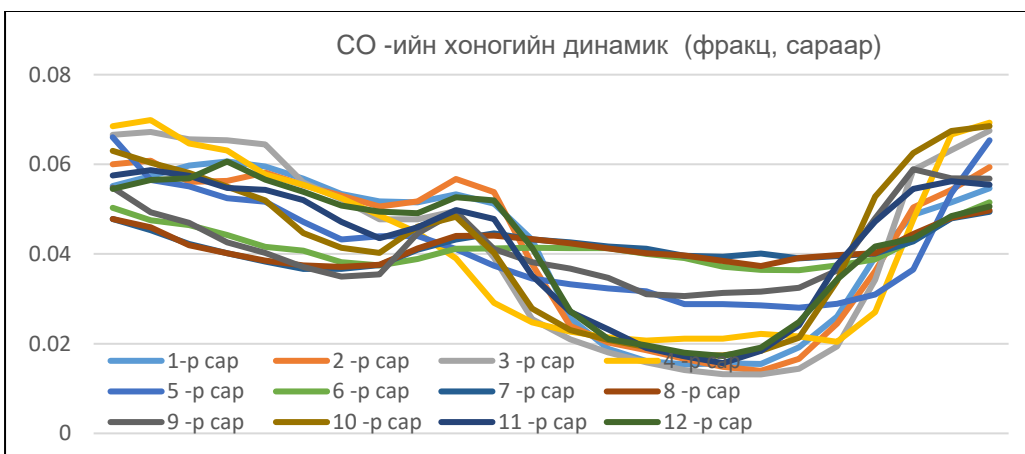
Зураг 10-13-т гэр хорооллын ялгарлтыг загварт оруулахдаа ашигласан сар бүрийн хоногийн динамикуыг үзүүлэв.



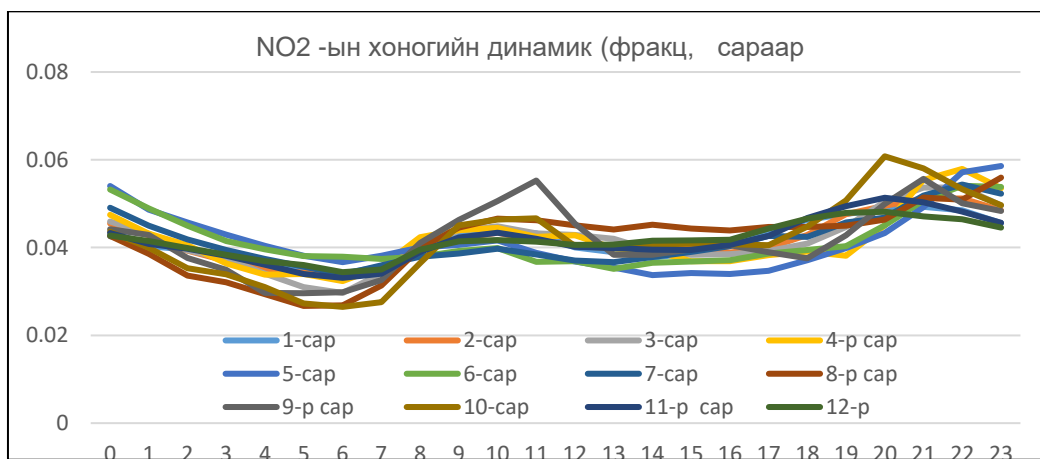
Зураг 10. Улаанбаатар хотын агаар дахь PM10 ын хоногийн динамик /фракцаар/



Зураг 11. Улаанбаатар хотын агаар дахь хүхэрлэг хий (SO₂) ын хоногийн динамик /фракцаар/

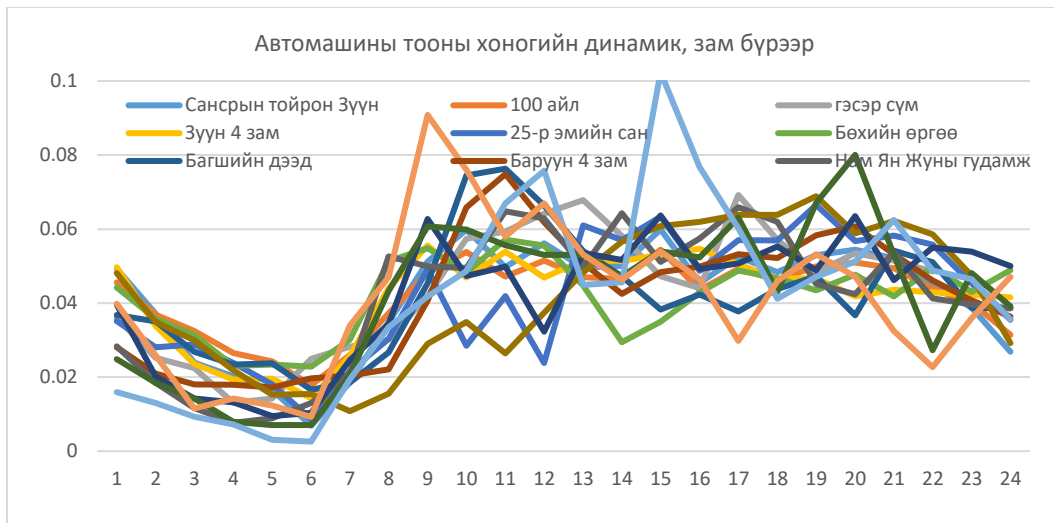


Зураг 12. Улаанбаатар хотын агаар дахь угаарын хий (CO) ын хоногийн динамик



Зураг 13. Улаанбаатар хотын агаар дахь угаарын хий (CO) ын хоногийн динамик /фракцаар/

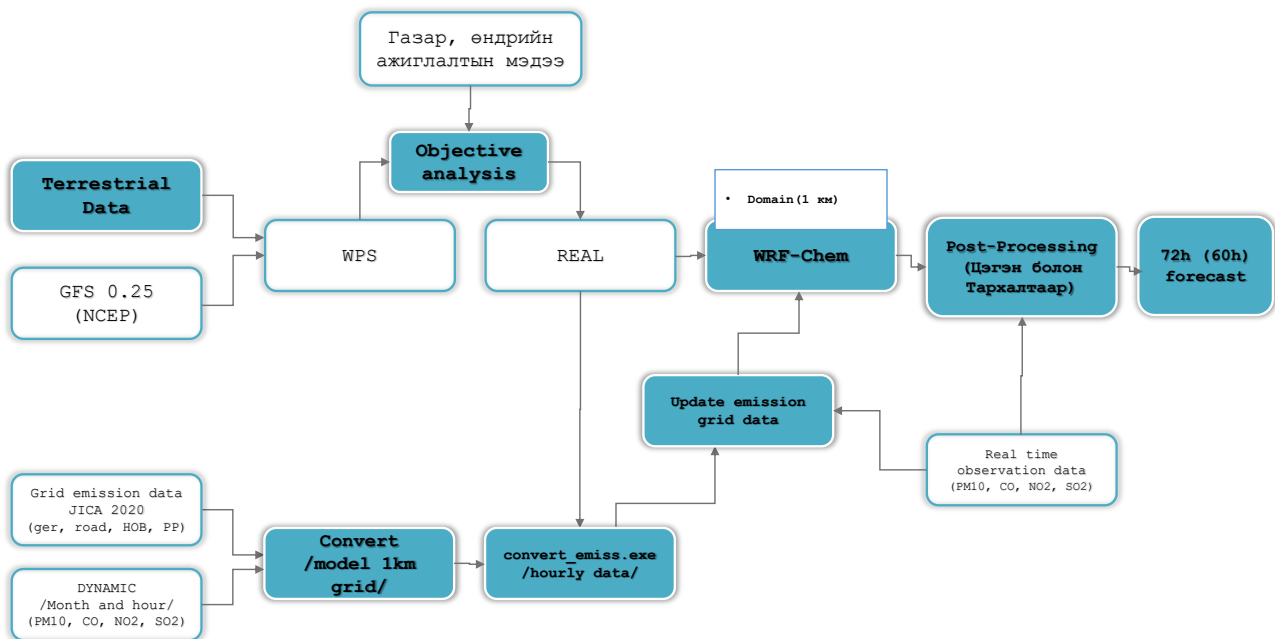
Харин Улаанбаатар хот дахь автомашинаас ялгарах бохирдуулах бодисын хоногийн динамикийг хотын замаар зорчиж буй тээврийн хэрэгслийн тоогоор төлөөлүүлэн 8 камерын 24 цагийн тооллогын дүнг цагаар дундажлан гаргах мөн фракцлав (Зураг 14). Загварт эдгээр замуудын дундаж динамикаар автомашины ялгаралтыг оруулав.



Зураг 14. Улаанбаатар хотын гол замууд дээр камерт тоологдсон машины хөдөлгөөний динамик

3.3 Агаарын бохирдлын прогнозын үр дүн

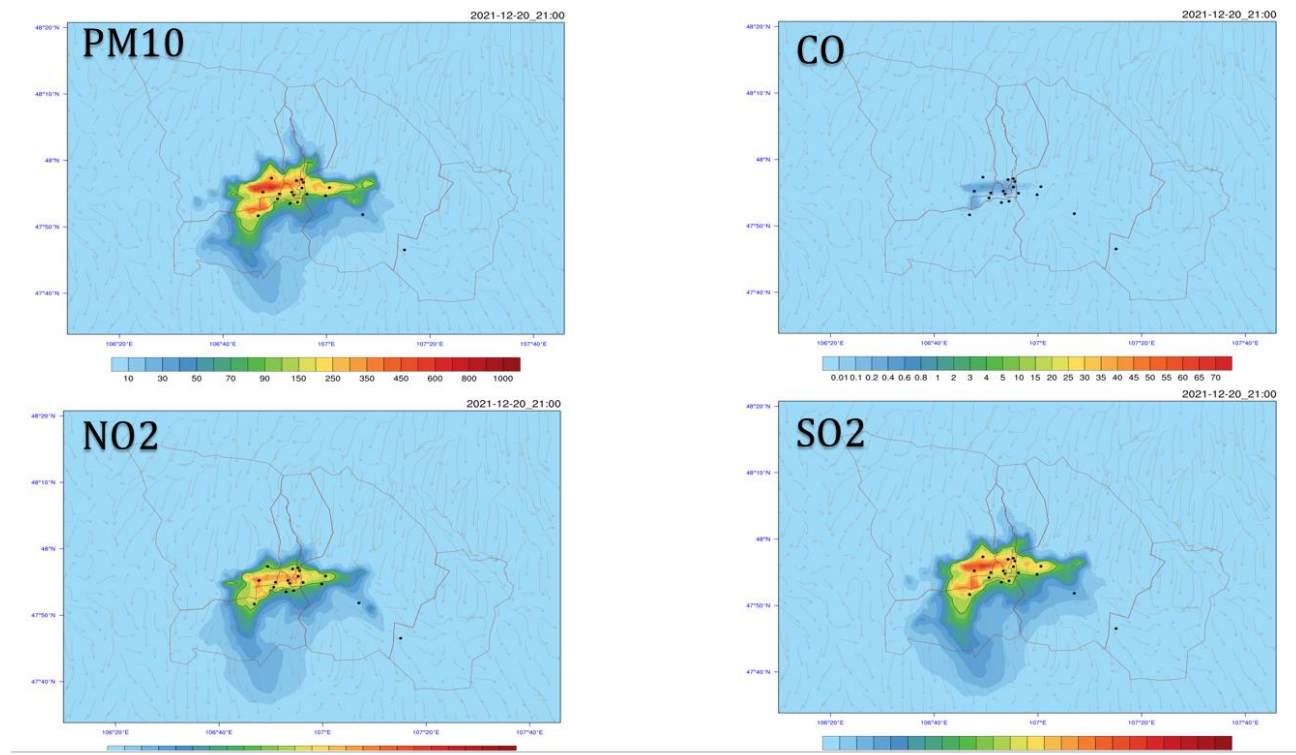
Бид WRF-Chem загварын оролтонд 1км орон зайн нарийвчлалтай PM10, CO, NO2, SO2-ын 1 цаг тутмын тодорхой динамик явц бүхий ялгаралтын мэдээг загварын тодорхой түвшнүүдэд оруулж цаашид цаг агаарын прогноз нөхцлөөс хамаарч бохирдол хэрхэн яаж тархах 72 цагийн урьдчлалтай прогнозыг технологийг боловсруулав (Зураг 15). Энд цэнхэр өнгөөр будсан хэсэгт агаарын бохирдлын технологийг боловсруулахад хийгдсэн ажлуудыг үзүүлэв.



Зураг 15. Агаар бохирдлын прогнозын технологийн бүдүүвч

Шуурхай ажиллагаатай энэхүү технологи буюу агаарын бохирдлын прогноз үр дүнг 2021 оны 12 дугаар сарын 20-ны байдлаар Зураг 16-д үзүүллээ. Зурагт тухайн бохирдуулагчийн агууламжийн орон зайн тархалт, салхины урсгалын шугамын хамт

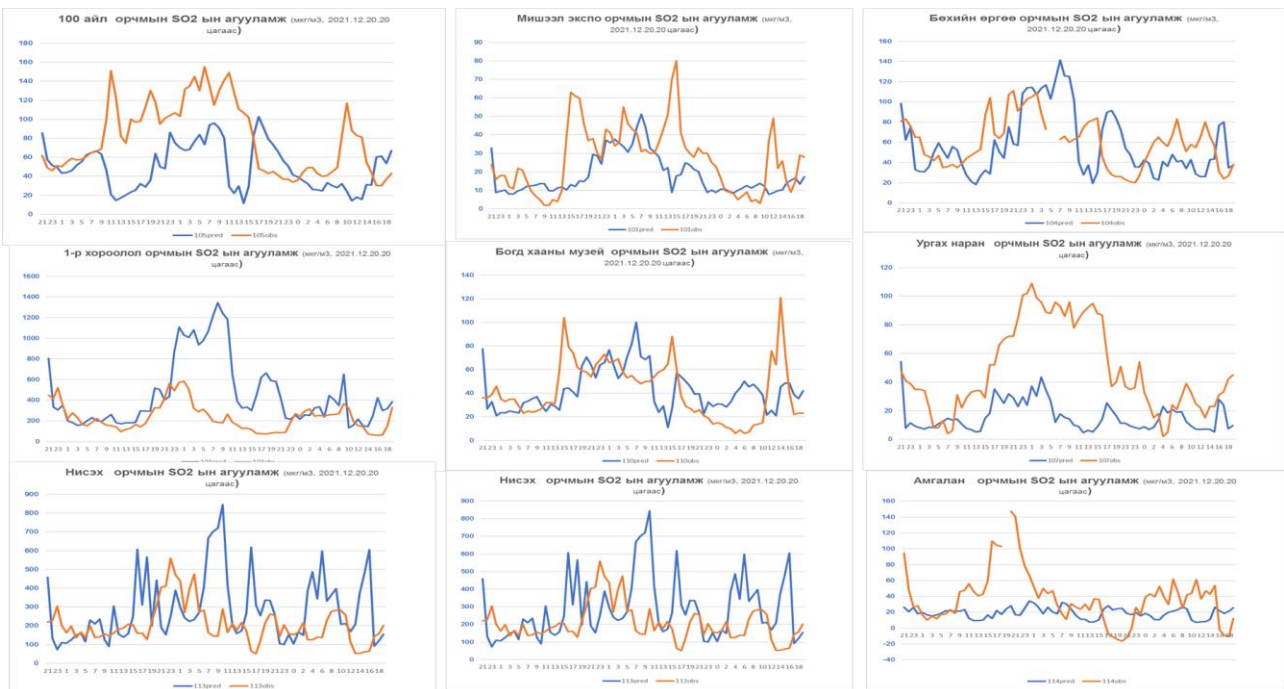
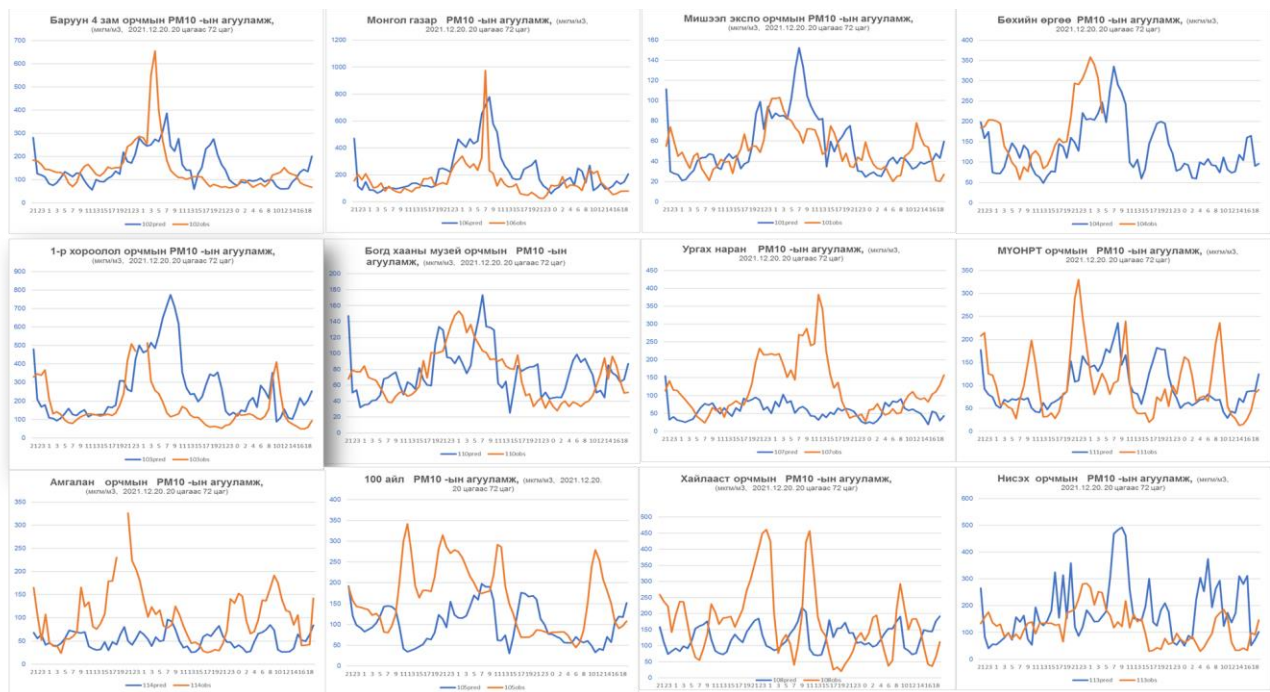
үзүүлэв. Агаарын бохирдлын тархалт уулзүйн онцлог цаг агаарын нөхцлөөс хамааран тархалтын зүй тогтол физик үндэслэлтэй сайн тооцоологдож байгааг харж болно.



Зураг 16. WRF-Chem загварын прогнозуур дүн (PM10 – 2021.12.20_12:00)

Мөн агаарын бохирдлын харууллын цэгүүд дэх 72 цагийн PM10 болон SO2-ийн прогнозууламжийн утгыг гарган авч, ажиглалтын бодит утгатай харьцуулан Зураг 17-д үзүүлэв. Загвараар тооцоолсон прогнозуур дүн ерөнхийдөө ажиглалтын динамиктай сайн таарч, харьцангуй сайн таарцтай байна.

Мэдээж загварын орон зайн 1 км нарвийвчлалтай мэдээг цэгэн мэдээтэй харьцуулсан, мөн хотжилт, байшин барилгын нөлөө зэргээс хамаарч хугацааны буюу фазын зөрүү, их утгыг ихэсгэж, мөн багасгаж тооцоолсон байдал прогнозуур дүн мэдээ, ажиглалтын хооронд байна. Хэдийгээр тийм боловч, ерөнхийдөө агаарын бохирдлын сигнал, дохиог өгч чадаж байгаа болно.

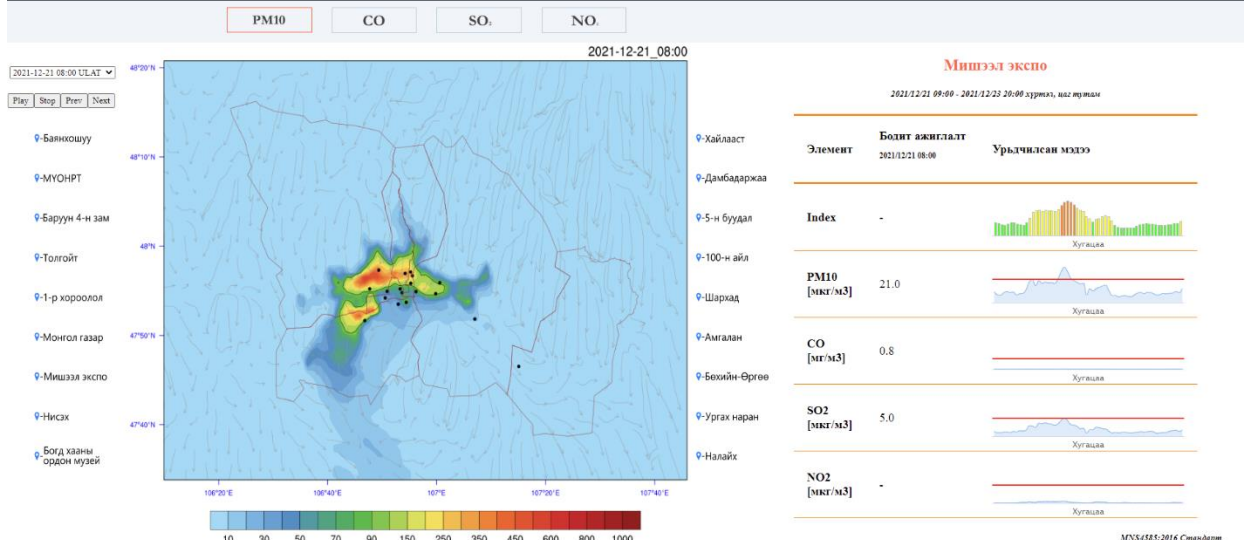


Зураг 17. WRF-Chem загварын прогноз үр дүнг ажиглалтын мэдээтэй харьцуулсан байдал (PM10 – 2021.12.20_12:00)

3.4 Агаарын бохирдлын прогноз мэдээг хэрэглэгчид хүргэх

Улаанбаатар хотын агаарын бохирдлын прогноз мэдээг одоогоор <http://ubaq.tsag-aqaar.gov.mn/> гэсэн цахим хуудсаар дамжуулан хэрэглэгчид хүргэнэ.

Нийт PM10 тоосонцор, нүүрстөрөгчийн дутуу исэл (CO), хүхэрлэг хий (SO2), азотын давхар исэл (NO2) гэсэн 4 бүтээгдэхүүнийг Улаанбаатар хотын газар нутгаар болон хэмжилтийн 18 цэгээр 72 цагийн урьдчилалтайгаар өдөрт 2 удаа шинэчилж байхаар хэрэглэгчид хүргэхээр вэб хуудсыг хөгжүүлэв (Зураг 18).

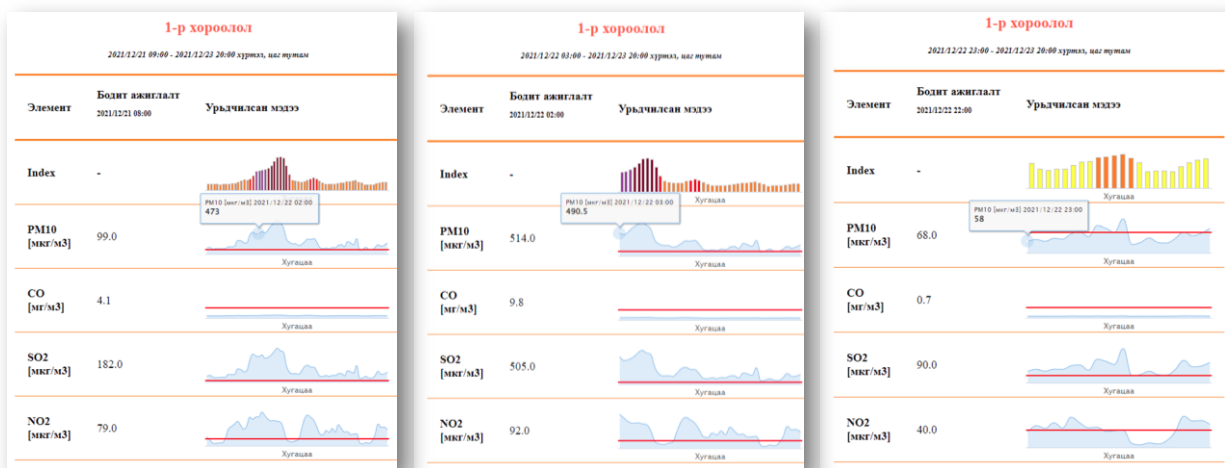


Зураг 18. Агаарын бохирдлын прогноз мэдээний цахим хуудас

Цахим хуудасны дээд хэсэгт PM10, CO, SO₂, NO₂-ийн харах товчийг тэмдэглэгээгээр нь холбоосоор байрлуулж өгсөн бөгөөд зүүн дээд хэсэгт агаарын бохирдлын прогноз мэдээг цаг бүрээр харах хугацааны сонговторыг хийж, Play, Stop, Prev, Next товчны тусламжтайгаар бүтээгдэхүүнийг шилжүүлж харах боломжтой.

Нийт 18 хэмжилтийн цэгийн нэрийг зурагны 2 талаар байрлуулж, тухайн нэр дээр дарахад хэмжилтийн цэгийн байршилгыг зааж, хуудасны баруун талд бүтээгдэхүүн бүрийн хэмжилтийн бодит болон прогноз утга, урьдчилсан мэдээнд хугацааны графикаар харж болно.

Хуудасны доод талбарт Агаар боирдуулагч бодисын тайлбар, зөвлөмжийг тус тус байрлуулсан болно.



Зураг 19. Агаарын бохирдлын хэмжилтийн бодит болон прогноз утга, урьдчилсан мэдээнд хугацааны график

4 Дүгнэлт, санал

Агаарын бохирдлын прогнозын технологийг хөгжүүлэх явцад одоо хэмжилт хийж буй харуулын мэдээний тасалдал, мөн эдгээр эх мэдээг цаг хугацаанд шуурхай байдлаар тоон форматаар авч чадахгүй байдал, тооцоолох машины хүчин чадлаас хамааран загварыг харьцангуй богино цаг хугацаанд ажиллуулаг шалгалтыг хийсэн, прогнозын үр дүнг ажиглалт хэмжилтийн мэдээтэй харьцуулахад систем алдаа гарч байсан зэрэг саад бэрхшээлүүд тулгарч байв.

Бид цаашид хийх ажлаа одоо нэн шаардлагатай байгаа болон харьцангуй урт хугацаанд хийх гэсэн байдлаар тодорхойлон бичлээ.

Одоо шаардлагатай

- Агаарын бохирдлын харуулын тоон мэдээг шуурхай байдлаар авч байх
- Агааг.mn Вэб хуудастай нэгтгэж холбох
- Цаашид шуурхай байдлаар яаж авч явах талаар зохион байгуулалт, хүн хүчний асуудлыг шийдэх

Цаашид хийх

- Загварын орон зайн нарийвчлалыг сайжруулж, загварын зүгшрүүлэлтийг урт хугацаанд хийх
- Эх үүсвэрийн ялгаралтын тооцоог сайжруулах
- Агаарын бохирдлын прогнозын бүтээгдэхүүнд PM2.5-ыг оруулах

5 Ашигласан номзүй

- Dudhia J. 1989. Numerical study of convection observed during winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. *J. Atmos. Sci* 46: 3077-3107, doi: 10.1175/1520-0469(1989)046<3077:NSOCOD>2.0.CO;2.
- Hong, S-Y., Y. Noh, and J. Dudhia, 2006: A new vertical diffusion package with explicit treatment of entrainment processes. *Mon. Wea. Rev.*, 134 , 2318–2341.
- Jhun I, Coull BA, Schwartz J, Hubbell B, and Koutrakis P. 2015. “Impact of Weather Changes on Air Quality and Health in the United States in 1994-2012.” *Environ Res Lett*, 10, 8, Pp. 283-292.
- Lin, Y.-L., Farley, R. D., and Orville, H. D.: Bulk parameterization of the snow field in a cloud model, *J. Clim. Appl. Meteorol.*, 22, 1065–1092, 1983.
- Minrui Wang, Kenji Kai, Nobuo Sugimoto, Sarangerel Enkhmaa. 2018. Meteorological Factors Affecting Winter Particulate Air Pollution in Ulaanbaatar from 2008 to 2016. *Asian Journal of Atmospheric Environment* 12(3):244-254
- Mlawer EJ, Taubman SJ, Brown PD, Iacono MJ, Clough SA. 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-K model for the longwave, *J. Geophys. Res* 102 (D14): 16663-16682, doi: 10.1029/97JD00237.
- Skamarock WC, Coauthors. 2008. A description of the Advanced Research WRF Version 3, Tech. Note NCAR/TN-475 STR. 113 pp. Mesoscale and Microscale Meteorology Division, Natl. Cent. for Atmos. Res., Boulder, Colo.
- Stockwell, W. R., and F. W. Lurmann, Intercomparison of the ADOM and RADM gas-phase chemical mechanisms, report, *Electr. Power Res. Inst.*, Palo Alto, Calif., 1989.
- Tsatsral Batmunkh, Keichi Sato 2016. Meteorological condition during the highly polluted and clean days in Ulaanbaatar, Mongolia, *EANET Science bulletin*, vol 4, page 59-73
- Wild, O., Zhu, X., and Prather, M. J.: Fast-J: accurate simulation of in- and below cloud photolysis in tropospheric chemical models, *J. Atmos. Chem.*, 37, 245–282, 2000.
- Агаарын бохирдлыг бууруулах газар (АББГ), Эх үүсвэрийн инвентор боловсруулах, шинэчлэх гарын авлага, Улаанбаатар хотын Агаарын бохирдлын хяналтын чадавхыг бэхжүүлэх төсөл, Жайка, 2017.