

## АГААР МАНДАЛ ДАХЬ УСНЫ УУРЫН АГУУЛАМЖИЙГ GPS ХЭМЖИЛТЭЭС ТОДОРХОЙЛСОН ДҮН

Ш. Амаржаргал<sup>1</sup>, Г. Даваахүү<sup>1</sup>, Д. Лхагвасүрэн<sup>1</sup>, С. Санжжав<sup>1</sup>,

Н. Хишигжаргал<sup>2</sup>, Ч. Мөнхчимэг<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>Одон Орон Геофизикийн Судалгааны Төв, ШУА

<sup>2</sup> Ус Цаг Уур Орчны Шинжилгээний Алба, Дорнод, Чойбалсан, [amarshgt@yahoo.com](mailto:amarshgt@yahoo.com)

### Хураангуй

Тропосферийн эгшин зуурын төлөв байдлыг илэрхийлэгч тундасжих усны уурын агууламжийг газрын GPS ажиглалтаас гадаргын цаг уурын мэдээ ашиглан гаргаж авах боломжтой. Байнгын ажиллагаатай хоёр давтамжийн GPS системийн сүлжээ нь агаар мандал дахь тундасжих усны уурын агуулгыг орон зайн болон цаг хугацааны өндөр нарийвчлалтай тандах хүчин чадалтай техникт тооцогддог. Монголд ажиллаж буй GEODGPS сүлжээний байнгын ажиллагаатай 4 станцийн ажиглалтын мэдээг бид анх удаа цаг уурын судалгааны зорилгоор ашигласан үр дүнг энд нийтэллээ. Тундасжих усны уурын агуулгыг Bewis-ын загварын агаарын дундаж температураар тооцоолсон бөгөөд боловсруулалтын үр дүнгийн нийцийг Олон Улсын GNSS Албаас гаргадаг 5 минутын завсамжтай тропосферийн бүтээгдэхүүнтэй харьцуулж тогтооход дундаж ялгавар (бодсон – IGS) =  $\pm 15$  мм дотор байгаа нь хоёр бүтээгдэхүүний сайн нийлэмжтэйг харуулж байна.

Түлхүүр үг: GPS тропосфер Монголд, усны уурын агууламж, агаар мандлын зайнаас тандалт

### Оршил

Агаар мандал дахь усны уур нь өндөр нарийвчлалтай байршил тодорхойлох сансрын геодези, Синтетик Антеннт Радар Интерферометр, радио астрономийн ажиглалтанд шууд нөлөөлж алдааны эх үүсвэр болдог гол хүчин зүйлүүдийн нэг. Нөгөө талаас, усны уур нь хүлэмжийн хийн 62%-ийг бүрдүүлж, агаар мандалд чийг болон дулааныг зөөвөрлөдгөөрөө цаг уур, уур амьсгалын динамик систем, гидрологид чухал үүрэг гүйцэтгэдэг доод агаар мандлын чухал бүрэлдэхүүн хэсэг. Тодруулвал, цаг уурчдын ихэвчлэн хэрэглэдэг “тундасжих” усны уур гэдэг параметр нэн чухал нөлөөтэй. Тундасжих усны уурыг (ТУУ) нэгж талбайд босоо чиглэлд интегралчилсан усны уурын массаар ( $\text{кг}/\text{м}^2$ ) эсвэл үүнтэй эквивалент шингэн усны баганы өндрөөр (мм) хэмжинэ ([5]-д). Харин түүний тархалт орон зай, цаг хугацааны хувьд маш хувьсмал учир нарийн тодорхойлоход амаргүй байдаг.

Усны уурыг тодорхойлдог радиозонд болон усны уурын радиометрийн уламжлалт аргууд нь усны уурын агууламжаас гадна температур, салхины мэдээгээр хангадаг давуу талтай ч үнэ өртөг ихтэй, цаг хугацааны (өдөрт хоёроос илүүгүй хөөргөдөг) болон орон зайн (зөвхөн эх газар хөөргөх боломжтой) шийдэл багатай, бороотой үед нарийвчлал буурдаг (усны уурын радиометр) зэрэг дутагдалтай талуудтай байдаг. Харин GPS-ийн тасралтгүй ажиглалт нь харьцангуй хямд, цаг уурын ямар ч нөхцөлд, өдөр, шөнийн аль ч цагт усны уурын агууламжийг 1-2 мм-ийн нарийвчлалтай ([2]-д) тодорхойлж чаддагаараа дээрх уламжлалт аргуудыг нөхөх хүчин чадалтай. Эдгээр давуу талууд нь GPS хэрэглээний шинэ чиглэл болох “сансарт-сууриласан” (усны уурын өндрийн зүсэлт), “газарт-сууриласан” (тундасжих усны уурыг) “GPS Метеорологи” гэсэн салбар бий болгож усны уурын агууламжийн 3-хэмжээст орон зайн тархалт, хугацааны хувьслын тодорхойлолтоор гидрологи, цаг уурын мониторингид өргөн нэвтэрч байна ([8, 9]-д).

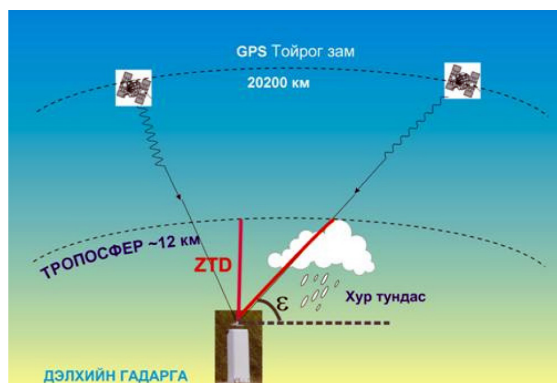
GPS-ийг агаар мандлын судалгаанд ашиглах энэ боломжийг өгч буй гол хүчин зүйл нь түүний агаар мандал дахь дохио тархалтын саатал юм. Ионосферээс үүдэлтэй саатлыг хоёр-давтамжийн геодезийн GPS хүлээн авагчийн тусламжтайгаар L-мужийн давтамжинд дисперс байх ионосферийн чанарт түшиглэн үнэлж, засварлаж, Дэлхийн ионосферийн судалгаанд ашигладаг бол тропосфероос үүдэлтэй саатлыг босоо чиглэлд интегралчилсан агаар мандал дахь усны уурын агууламжийг тодорхойлоход ашиглах ба энэ саатал нь давтамжаас биш харин тропосферийн бүрэлдэхүүнээс хамааралтай ([7, 10, 12]-д).

### GPS мэдээнээс ТУУ тодорхойлох арга

Агаар мандлын нейтрал молекулд рефракцийн улмаас саатсан GPS дохиог өндөр нарийвчлалын геодезийн хэрэглээнд *Зенитын Нийт Саатал* (Zenith Total Delay, ZTD, Zenith Path Delay, ZPD) гэж томъёолон бусад геодезийн параметруудтай хамт үнэлдэг. Зенитын зам дагуух нийт саатлыг (ZTD) агаар мандлын хуурай хийнээс хамааралтай зенитын гидростатик буюу хуурай (*Zenith Hydrostatic Delay, ZHD*) хэсгийн саатал ба усны уурын диполь моментоос хамааралтай чийгтэй (*Zenith Wet Delay, ZWD*) хэсгийн саатал гэж хоёр бүрэлдэхүүн хэсэгт хуваан үздэг ([4, 9]-д). Түүний математик загварчилгаа нь дараахь байдалтай байна:

$$ZTD = m_h(\varepsilon)ZHD + m_w(\varepsilon)ZWD \quad (1)$$

энд  $\varepsilon$  нь дагуулын өндрийн өнцөг, нь тусгагын функци (Зур. 1). Тусгагын функци нь дохионы саатал дагуулын өндрийн өнцгөөс хэрхэн хамаарч байгааг тодорхойлох зорилготой бөгөөд GPS –д өргөн хэрэглэгддэг тусгагын функци нь радиозондын олон жилийн хэмжилтээс гаргасан өндөр, өргөрөг, жилийн өдрөөс хамааралтай *Niell* функци юм ([6]-д).



Зураг 1. GPS ZTD тодорхойлох зарчим

Далайн түвшиний өндөрт ZTD ~ 230 см байх ба үүнээс зенитын хуурай саатал (ZHD) нийт саатлын 90%-ийг, зенитын чийгтэй хэсгийн саатал нь (ZWD) нийт саатлын 10%-ийг эзэлдэг. ZWD газрын станци дахь төдийгүй дохио тархалтын зам дагуух усны уураас хамаарч маш хувьсамтгай байдаг учир түүнийг нарийн загварчлахад төвөгтэй ([3]-д).

Идеал хийн хуулиар ZHD-ыг тухайн орчны гадаргын даралтнаас өндөр нарийвчлалтайгаар загварчилж болох бөгөөд энэ тооцоонд Saastamoinen, Hopfield, Black нарын эмпирик загваруудыг өргөн ашигладаг. Олон Улсын Дэлхийн Эргэлтийн Албын гаргасан (IERS, 2003) зөвлөмжийн дагуу бид Saastamoinen –ы загварыг ([11]-д) тооцоондоо ашигладаг бөгөөд Davis et al. ([3]-д) нарын илэрхийлсэнээр томъёолол нь дараахь байдалтай байна:

$$ZHD = 0.2277 \cdot \frac{P_s}{F(\varphi, H)};$$

$$F(\varphi, H) = 1 - 0.0026 \cdot \cos(2\varphi) - 0.00028 \cdot H; \quad (2)$$

энд  $\varphi$  нь станцийн өргөрөг,  $H$  нь хүлээн авагчийн антенны эллипсоидын өндөр (км)  $P_s$  нь гадаргын даралт (hPa),  $T$  - гадаргын температур (K). Ингэж тооцолсон хуурай саатлыг томъёолол (1)-ийн дагуу нийт саатлаас хасч чийгтэй саатлыг олно. Зенитын чийгтэй саатлаас ТУУ-ыг (PWV-Precipitable Water Vapor) олохын тулд тэдгээрийн хоорондын хамаарлын Bevis -ын коэффициентийг ашиглана ([2]-д):

$$PWV = \Pi \times ZWD \quad (3)$$

энд  $\Pi$  нь:

$$\Pi = \frac{10^6}{\rho R_v [k_3 / T_m] + k_2}, \quad (4)$$

энд  $\rho$  нь шингэн усны нягт ( $10^3 \text{ кг м}^{-3}$ ),  $R_v$  - усны уурын хийн тогтмол ( $461.5 \text{ Дж кг}^{-1} \text{ К}^{-1}$ ), хоёр тогтмол нь  $k_1$  ба  $k_2$ , утгатай,  $T_m$  агаар мандлын чийгтэй хэсгийн дундаж температур бөгөөд усны уурын уян харимхайн даралт ( $e$ ) ба температурын босоо профилээс:

$$T_m = \frac{\int (e/T) dz}{\int (e/T^2) dz} \quad (5)$$

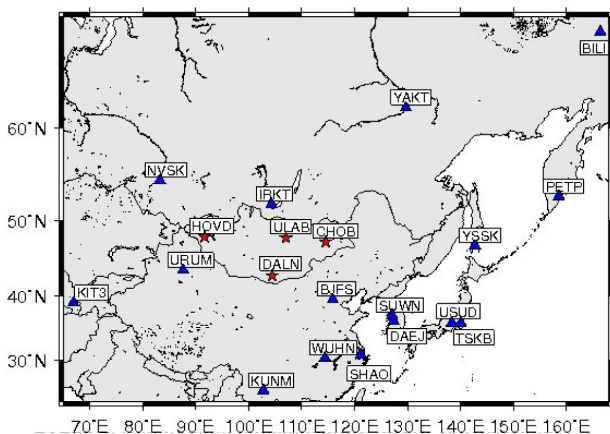
гэж гаргаж авна. (3), (4) томъёонуудаас харахад ТУУ нь “газарт-суурилсан” GPS хэмжилтээс гаргасан зенитын чийгтэй хэсгийн саатлаас, GPS антенны чигт атмосферийн багана дахь усны уурын жигнэгдсэн дундаж температур  $T_m$ -ээс шууд хамааралтай байна.  $T_m$  болон гадаргын температур  $T_s$  хоорондын шугаман хамаарлыг Bevis ([2]-д):

$$T_m = a + b T_s \tag{6}$$

анх загварчилсан бөгөөд улирал, өргөргөөс хамааралтай  $a$ ,  $b$  коэффициентүүдийг [10] Хойд Америкийн  $27^{\circ}$ - $65^{\circ}$  өргөрөгт хийсэн 13 радиозондын мэдээнээс  $a = 70.2$ ,  $b = 0.72$  гэж гаргасан байдаг. Манай GPS станцуудын ойролцоо радиозондын хэмжилт байхгүй тул энэ регрессийг бодож гаргах боломжгүй байлаа. Тиймээс бид эхний удаад Bevis-ийн загварыг бүх станцууд дээр ашиглав.

Дунд өргөрөгт байрлах GPS хүлээн авагчийн антенн 8-12 дагуулаас нэгэн зэрэг дохио хүлээн авах боломжтой байдаг. Үзэгдэх орчинд байрлах бүх дагуулаас хэмжсэн ZTD-г тусгагын функцийг тусламжтайгаар эгц босоо чиглэлд тусган (проекцлон) тухайн эгшиний дундаж ZTD утгыг гаргана.

**ТУУ монгол дахь GPS станцуудаас**



Зураг 2. Бодолтонд ашигласан GEODGPS сүлжээний (таван хошуу) ба IGS ( гурвалжин) станцуудын байршил.

Бид Потсдамын Геосудалгааны Төв, Токиогийн Их Сургуулийн Газар Хөдлөл Судлах Хүрээлэнтэй хамтран 1995-2005 оны хооронд монгол орны нутаг дэвсгэрт орон зайн хувьд жигд тархсан байнгын ажиллагаатай 4 GPS станц байгуулсан бөгөөд энэ нь нутгийн баруун, төв хэсгийн тектоникийн идэвхтэй бүсэд суулгасан давтан хэмжилтийн 17 хадны тэмдэгтийн хамт GEODGPS сүлжээг бүрдүүлдэг ([1]-д). Улаанбаатар,

Ховд, Чойбалсан, Даланзадгадад (Зур. 1, Хүснэгт 1) байрлах байнгын станцууд нь геодезийн чанартай хоёр-давтамжийн хүлээн авагч (Trimble, Turbo Rogue), геодезийн антенн (Choke Ring, Zephyr, Geodetic L1/L2) ашиглаж GPS дагуулаас ирэх дохиог 1 сек (ULAB), 30 секундын завсамжтайгаар тус тус бүртгэж байдаг.

GEODGPS сүлжээ нь орон нутгийн болон бүсийн хэмжээнд царцдасын шилжилт, деформацийг бүртгэх анхдагч зориулалттай. Эдгээрээс одоогоор зөвхөн ULAB станц чийг,

даралт, температурын мэдээгээр хангадаг цаг уурын сенсороор (Vaisala) тоноглогдсон учир бусад 3 станцын хувьд бид зенитын нийт саатлыг олохын тулд Европын Дунд-Хугацааны Урьдчилан Мэдээлэх Төв (European Center for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) –ийн мэдээнд суурилсан VMF (Vienna Mapping Function) загварыг ашигласан.

Хүснэгт 1. GEODGPS цэгүүдийн солбицол

Станц	Өргөрөг (°)	Уртраг (°)	WGS84 өндөр (м)
CHOB	48.081	114.538	729.402
DALN	43.568	104.416	1435.400
HOVD	48.009	91.668	1376.716
ULAB	47.673	107.052	1575.581

### GPS мэдээ боловсруулалт

ТУУ-ыг GPS-ийн тусламжтайгаар хэмжихийн тулд агаар мандлын нейтрал хэсгээс үүдэлтэй саатлыг байршлын алдаа үүсгэх бусад нөлөөнүүдээс салган, түүний зөв хувийг агаар мандлын усны уурын агууламжинд оноох явдал юм. GPS мэдээ боловсруулалтын явцад байршлын алдааны эх үүсвэрүүд болох дагуулын тойрог замын алдаа, цагийн алдаа, хүлээн авагчийн системт алдаа, олон замын ойлтын нөлөө зэргийг тодорхойлж устгах буюу багасгасны дараа байршлын утганд нөлөөлөх үлдсэн алдааг ионосфер, тропосферийн тархалтанд оноож болно. Радио долгионы тархалтын хурд ионосферт давтамж болон электроны нягтаас хамааралтай тул ионосферийн нөлөөг хоёр давтамжийн шугаман комбинацаар устгах ба үлдсэн алдаа агаар мандлын нейтрал хэсгээс үүдэлтэй гэж үзнэ. Бид GPS мэдээ боловсруулалтыг Массачусетсийн Технологийн Дээд Сургуулиас гаргасан (MIT) GAMIT програм хангамжаар [6] 3 үе шаттайгаар L1, L2 фазын давхар-ялгаврын, ионосферийн чөлөөт шугаман комбинацаар IGS-ийн нарийн тойрог замын мэдээ ашиглан хийсэн. IGS-ийн нарийн тойрог зам байршлын 5 см-ийн нарийвчлалтай бөгөөд энэ нь усны уурын агууламжийг 1 мм –ийн нарийвчлалтай тодорхойлох боломж өгдөг [4]. Дэлхийн хатуу биеийн түрэлт, дэлхийн эргэлт, далайн түрэлтийн нөлөөг Олон Улсын Дэлхийн Эргэлтийн Алба (IERS)/IGS-ын 2003 оны загварыг ашиглан тооцсон (Хүснэгт 1). GEODGPS 4 станцийг Евроазийн зүүн хэсэгт тархсан IGS-ийн 20 станцтай (BILI, BJFS, DAEJ, IRKT, KIT3, KUNM, LHAS, MAG0, NVSK, PETP, SHAO, SUWN, TSKB, URUM, USUD, WUHN, YAKT, YSSK- Зур.1, ажиглалтын мэдээ болон нарийн тойрог замын мэдээг - <ftp://gamer.ucsd.edu>) тэгшитгэн бодохдоо солбицлыг нь Олон Улсын Газрын Тулгуур Тогтолцооны сүүлийн хувилбар болох 2005 оны эгшинд (ITRF2005) тэдгээрийн жилийн дундаж утгад хойд, зүүн, босоо чиглэлд 2мм, 2 мм, 5 мм хазайлттай тус тус хатуу бэхэлж, зенитын нийт саатлыг (ZTD) Saastamoinen-ы засварын загварт (Тэгш. 2) Niell тусгагын функци ашиглан станц тус бүрийн хувьд 2 цагийн завсамжтай үнэлсэн.

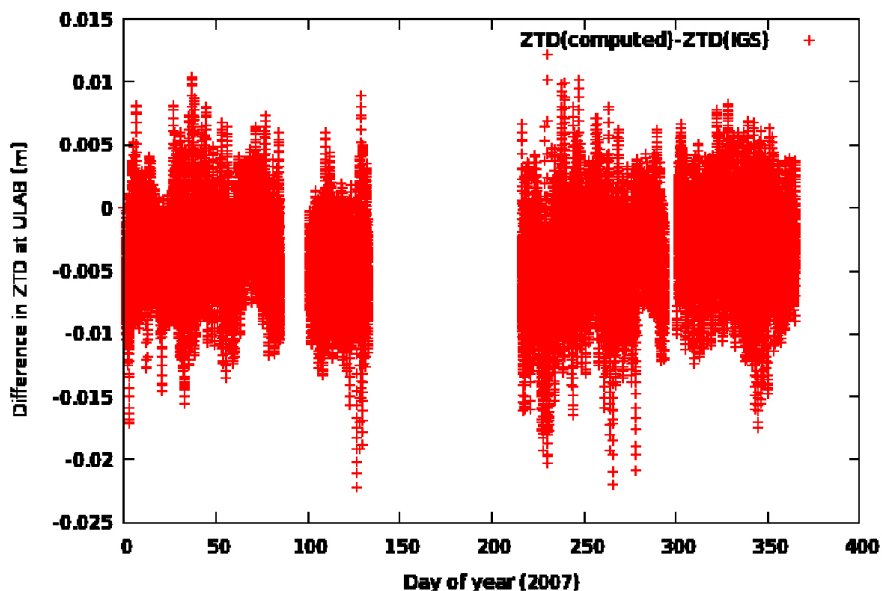
## Хүснэгт 1. GPS боловсруулалтын параметрууд

Дагуулын тойрог зам	IGS нарийн sp3
Тулгуур Тогтолцоо	ITRF2005
Ионосфер	Давхар ялгаврын ионосферийн чөлөөт комбинаци (L3)
Антенны Фазын Төвийн хувьсал	Өндрөөс хамааралтай IGS загвар
Дэлхийн хатуу биеийн түрэлт	IERS/IGS стандарт загвар
Далайн түрэлтийн загвар	FES2004
GPS мэдээ хураалтын завсамж	30 сек
Зенитын саатлын үнэлгээ	2 цагийн завсамжтай
Тусгагын функци	Niell
Дагуулын өндрийн доод хязгаар	10°

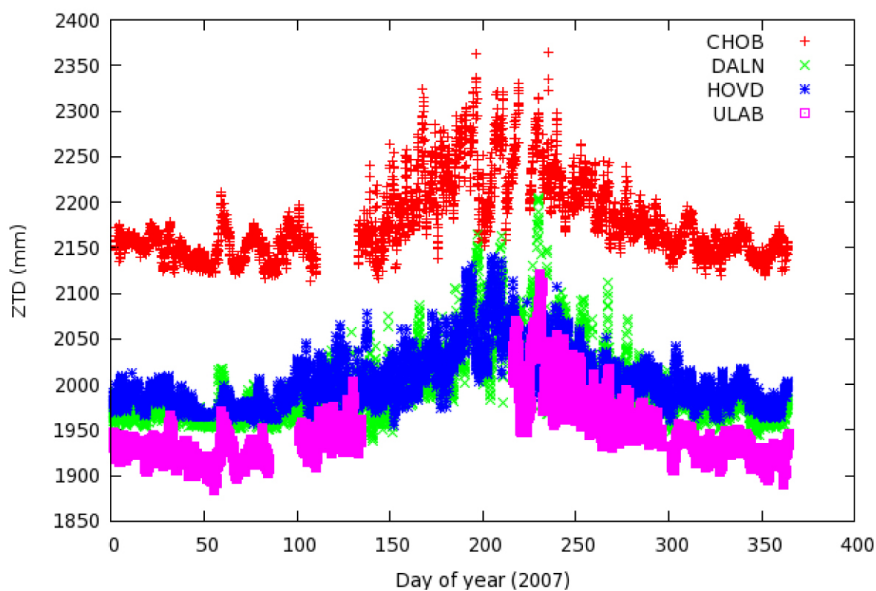
## Үр дүн ба хэлэлцүүлэг

Дээрх аргаар тооцоолж гаргасан GPS зенитын нийт саатлыг Олон Улсын Геодинамикийн GPS Албын (IGS) гаргадаг ZTD –тай ULAB станцын 2007 оны ZTD явцаар харьцуулж үнэлгээ хийлээ (Зур. 3). Бидний тооцоолсон, IGS-ийн гаргасан ZTD хоорондын зөрүү  $\pm 15$  мм дотор байна. Энэ зөрүү нь тэгшитгэн бодолтонд оруулсан сүлжээний зохион байгуулалт, станцын тоо, боловсруулалтын өөр өөр техник ашигласнаас үүдэлтэй байдаг. Иймээс, бидний тооцоолсон ZTD утга олон улсын IGS албын гаргасан утгатай сайн нийлэмжтэй болсон гэж үзнэ. Цаг уурын хэрэглээнд ZTD-ийн шаардагдах үнэмлэхүй нарийвчлал  $\sim 6$  мм байх ба энэ нь ТУУ-ын 1мм-т харгалзана.

Байнгын ажиллагаатай GPS станцын мэдээ боловсруулалт ZTD-г ихэвчлэн 1-3 мм-ийн нарийвчлалтай гаргаж өгдөг. Бидний тооцоолсон ZTD нарийвчлал 2.64-2.82 мм хооронд байсан бөгөөд  $10 \text{ мм} <$  хэмжээтэйг нь алдаа (outlier) гэж үзэн устгасан. 4 станци дээр гаргасан ZTD утгын жилийн явц бүх станцууд дээр 200-230 өдрүүдэд буюу 7 сард хамгийн их, 1-2 сард хамгийн бага утгатай байхын зэрэгцээ ZTD-ийн хэмжээ ЧНОВ-д хамгийн их (2300 мм), удаах нь DALN (2200 мм), НОВД (2120 мм), ULAB (2130 мм) байна (Зур. 4). Энэ нь тропосферийн саатал өндөрлөг уулархаг газар нам дор газрыг бодвол бага байдагтай холбоотой.



Зураг 3. Зенитын нийт саатлын ялгагар ULAB станци дээр ( $ZTD_{\text{бодсон}} - ZTD_{\text{IGS}}$ )



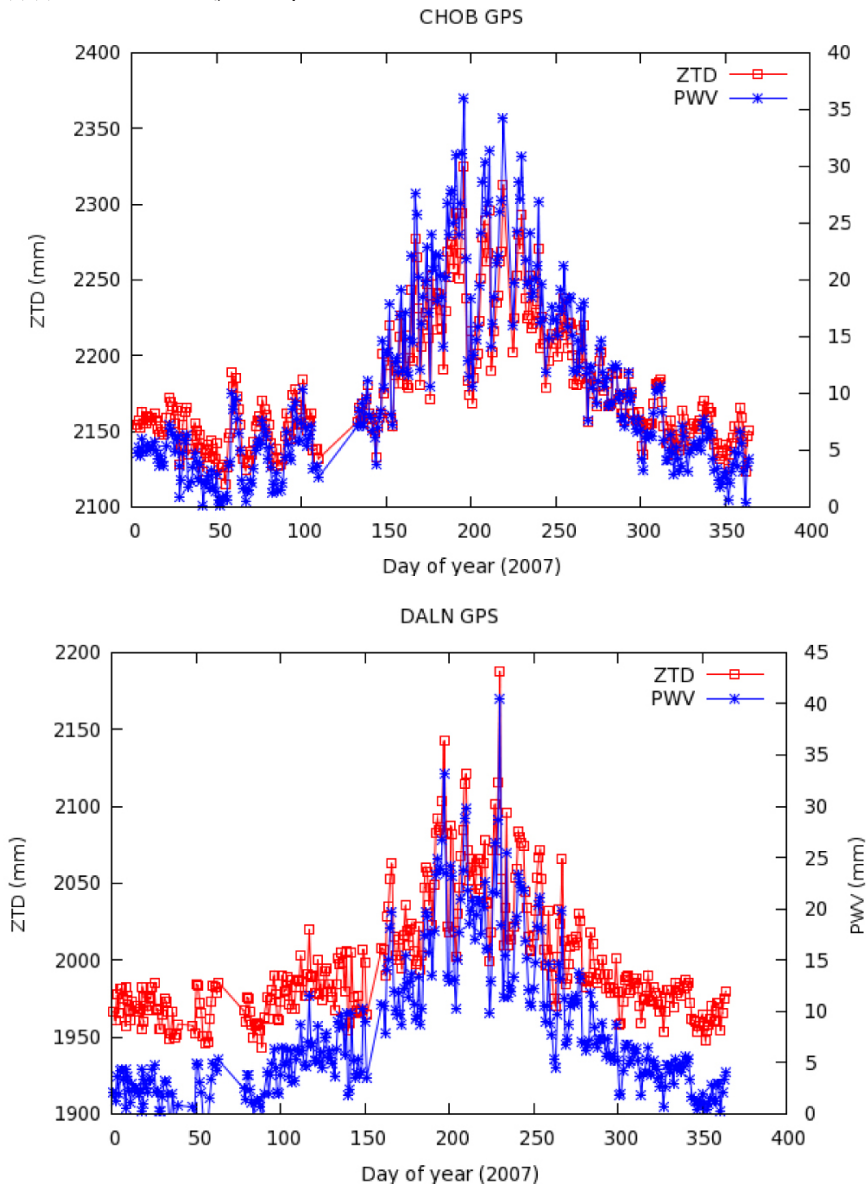
Зураг 4. 4 станц дээрх зенитын нийт саатлын жилийн явц

Станц тус бүрийн хувьд бодсон ZTD мэдээнээс зенитын чийгтэй хэсгийн саатлыг (ZWD) тооцоолж, тундасжих усны уурын мэдээ рүү (ТУУ, мм) хөрвүүлсэн графикийг Зур.5-д үзүүлэв. Тундасжих усны уур, зенитын чийгтэй хэсгийн саатал хоорондын харьцаа (PWV/ZWD) Улаанбаатарын хувьд 15.985, Ховдод 15.568, Чойбалсанд 15.551,

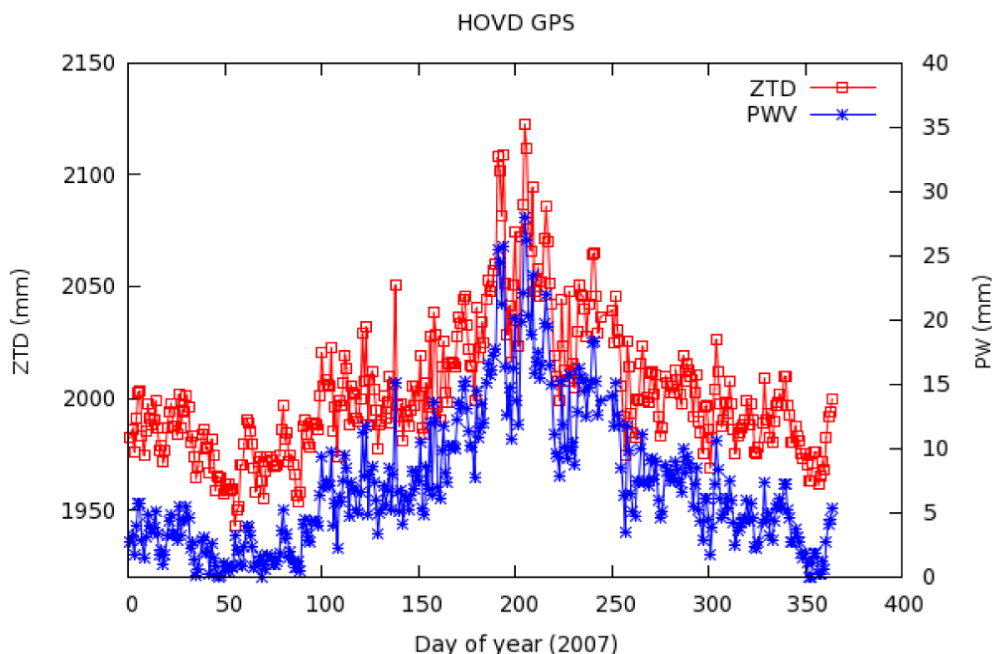


Даланзадгадад 14.965 хэмжээтэй байгаа нь Bevis [2]-ийн тогтоосон  $15 \pm 20\%$  дотор сайн нийлэмжтэй байна.

Тундасжих усны уурын жилийн явцаас харахад бүх станцууд дээр ZTD-ийн нэгэн адил хамгийн их утга зунд, хамгийн бага утга өвөлд ажиглагдаж байна (Зур. 5). ТУУ агууламж нь тухайн станцийн өндөр, газарзүйн байршил, метеорологийн нөхцөл, өргөрөг, топографийн рельефтэй холбоотой байх бөгөөд бидний тооцоогоор Чойбалсанд хамгийн их, Ховдод хамгийн бага утга гарч байна.

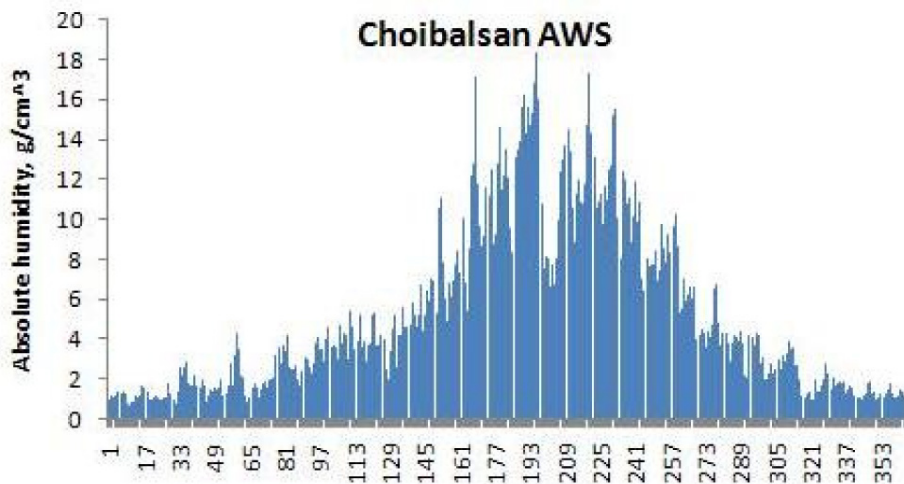






Зураг 5. *CHOB, DALN, HOVD GPS станцуудын зенитын нийт саатал, ТУУ-ын жилийн явц*

Чойбалсангийн Ус Цаг Уур Орчны Шинжилгээний Албаны (УЦУОША) автомат цаг уурын станц GPS станцаас 20 орчим метрийн зайд байрлах бөгөөд түүний бүртгэсэн үнэмлэхүй чийгшлийн жилийн явц (Зур.6) GPS ТУУ-ын явц фазаараа давхцаж байна.



Зураг 6. *Чойбалсан УЦУОША-ын цаг уурын автомат станцад бүртгэгдсэн үнэмлэхүй чийгшлийн жилийн явц.*

## Дүгнэлт

GEODGPS сүлжээний фазын ажиглалтын мэдээг Bevis-ийн загвар ашиглан тропосфер дэх тундасжих усны уурын агуулгыг тодорхойлох зорилгоор боловсрууллаа.

1. Боловсруулалтын үр дүнг Олон Улсын GPS Албын (IGS) тропосферийн бүтээгдэхүүн болох 5 минутын завсамжтай ZTD-тэй IGS ULAB станц дээр харьцуулсан утга  $\pm 15$  мм дотор байгаа нь бидний тооцоо нарийвчлал сайтай болсныг илтгэлээ.
2. Монгол орны баруун, зүүн, өмнөдөд байрлах GPS станцуудын зенитын нийт саатлын жилийн явц нь зуны улиралд, ялангуяа 7 сард, хамгийн их, өвлийн улиралд, 1, 2 сард, хамгийн бага утгад хүрч байгаа нь цаг уурын станцын мэдээнээс гаргасан монгол орны хур тундасны жилийн явцтай нийцтэй байна [13].
3. Өндөр уулархаг газар ТУУ-ын агууламж нам дор газартай харьцуулахад бага байдаг нь 4 станцын ТУУ-ын жилийн явц бататгаж байна.

Боловсруулалтын энэ үр дүн нь GPS техникийг цаг уурын хэрэглээнд ашиглах боломжтойг бататган харуулсан монгол орны нутаг дэвсгэрт хийгдэж буй энэ чиглэлийн анхны ажил юм. Бидний цаашдын судалгаа нь GPS-ээс гаргасан тундасжих усны уурын агууламжийг цаг уурын судалгаанд шууд ашиглахаас өмнө олон жилийн ажиглалтын мэдээтэй харьцуулж, тухайн орчинд илүү нийцтэй  $T_m$  загварыг тооцоолж гаргах, цаг уурын автомат станцуудын мэдээг GPS антенны өндрийн түвшинд холбох боловсруулалтын техникийг ашиглаж тооцооллыг илүү нарийвчлах зорилготой юм. Харин GEODGPS сүлжээний цаашдын өтгөрүүлэлт, бодит-горимын холболт зэрэг нь ТУУ-ын тархалтыг богино хугацаанд орон зайн өндөр шийдэлтэйгээр гаргаж бүс нутгийн цаг уурын судалгаа, урьдчилсан мэдээллийг нарийвчилж тодорхойлох боломжоор хангана.

## Ном зүй

1. Amarjargal Sh., S. Shimada, T. Kato, S. Sanjjav, D. Lhagvasuren, B. Bekhtur, S. Zagdsuren, et al., Preliminary results from continuous GPS measurements in Mongolia, 2000-2006. *J. Astronomy and Geophysics*, Ulaanbaatar, 2007, №3, pp.60-65.
2. Bevis, M., S. Businger, S. Chiswell, 1994. GPS Meteorology: Mapping wet delays onto precipitable water. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 33, American Meteorological Society.
3. Davis, J. L., T. A. Herring, I. I. Shapiro, A. E. E. Rogers, and G. Elgered, 1985. Geodesy by radiointerferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length. *Radio Science*. Vol. 20, No.6, pp.1593-1607.
4. Ge, M., E. Calais, J. Haase. Reducing satellite orbit error effects in near-real time GPS zenith troposphere delay estimation for meteorology. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 27, No. 13, pp. 1915-1918, 2000.
5. Jade, S., M. S. M. Vijayan, V. K. Gaur, T. P. Prabhu, S. C. Sahu. Estimates of precipitable water vapour from GPS data over the Indian subcontinent. *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial physics*, 67, pp.623-635, 2005.
6. Herring, T.A, R. W. King, S.C. McClusky, 2006. GAMIT Reference Manual. Release 10.3.
7. Hofmann-Wellenhof, B., H. Lichtenegger, and J. Collins, 2001. *GPS Theory and Practice*. Fifth, revised edition. Springer, Wien, New York, ISBN 3-211-83534-2.
8. Melbourne, W., E. Davis, C. Duncan, G. Hajj, K. Hardy, E. Kursinski, T. Meehan, L. Young, and T. Yunc., 1994. The application of spaceborne GPS to atmospheric limb sounding and global change monitoring. *JPL, Pub.* 94-18, pp. 147.
9. Pacione, R., V. Fespe. GPS Zenith total delay estimation in the Mediterranean are for climatological and meteorological applications. *J. Atmospheric and Oceanic Technology*. Vol. 20, 2002.
10. Rocken, C. R. H. Ware, T. Van Hove, F. Solheim, C. Alber, J. Johnson, M. Bevis, S. Businger, 1994. Sensing Atmospheric Water Vapor with the Global Positioning System. *Geophys. Res. Letters*, Vol. 20, No. 23, pp. 2631-2634.
11. Ross R.J., Rosenfeld, S. Estimating mean weighted temperature of the atmosphere for Global Positioning System applications. *J. Geophys. Res.*, Vol. 102, 1997.
12. Saastamoinen, J. 1972. Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites. In: Henriksen, S. W., et al. (Ed.) *Geophysical Monograph Series*, Vol. 15, AGU, pp. 245-251.
13. М. Цоодол, Н. Батсүх, Г. Сарантуяа, Д. Энхбат, С. Эрдэнэсүх, Л. Жамбажамц. Усны уурын конденсац. МУИС, ФЭС, Ус Цаг Уур Экологийн тэнхим, Улаанбаатар, 2005.