

Геодезийн хэмжлийн нэгдмэл байдал нивелирийн рейкны хэвтээ компаратор

Д.Өнөрбилэг^{1*}, Б.Болормаа²

¹ Монгол Улс, Стандарт, хэмжил зүйн газрын Хэмжил зүйн хүрээлэн

² ШУТИС Геологи, Уул Уурхайн Сургууль

СХЗГ-ын уртын эталоны лабораторид 3 м урт бүхий зурааст, бар код бүхий нивелирийн рейк ба 1 метрийн хяналтын ган ба латунь шугамыг шалгах зориулалттай хэвтээ компараторыг зохион бүтээлээ. Энэ компараторыг ашиглан OIML R-35-1,2:2007 стандартын дагуу хамгийн дээд нарийвчлалын ангийн шаардлагад нийцэх, бүх төрлийн рейк, хяналтын латунь шугамын шалгалт тохируулгыг гүйцэтгэх ба барилга, зам гүүр, геодези, зураг зүйн ажилд уртын үндэсний эталоноос нэгж дамжуулах, хэмжлийн нэгдмэл байдлыг хангахад чухал үүрэг гүйцэтгэнэ. Хэвтээ компараторын систем нь 3 м урттай хос ган зам, гүйгч тэргэнцэр бүхий механик хэсэг ба лазер интерферометр, цацраг хуваагч, ретро ойлгогч толь бүхий оптик хэсгээс тогтоно. Механик хэсгийг маш тэгш гадаргуутай хүнд ширмэн плитаг төмөр ширээн дээр байрлуулсан. Хос рельс замын дагуу гүйх тэргэнцэр нь өсгөгч микроскоп, 2 ш микрометр толгой, гэрэлтүүлэг зэргээс тогтох ба түүн дээр ретро ойлгогчыг байрлуулсан. Гүйгч тэргэнцэрийн шилжилтийг, ретро ойлгогч болон лазер интерферометрын тусламжтай тодорхойлон, рейк болон хяналтын шугамын хэвийн уртын бодит уртыг тогтооно. Лазер интерферометрийн долгионы урт 632,9 нм (тогтворжилт нь $3,4 \times 10^{-8}$) энэ нь уртын анхдагч эталон Ге-Не лазераас нэгж дамжуулсан. Нивелирийн рейк ба метрийн хяналтын шугамын шалгалт тохируулгын хэмжлийн өргөтгөсөн эргэлзээ 95%-ийн итгэх түвшинд 90 мкм орчим байна. Шалгалт тохируулгын зарчим ба эргэлзээний төсвийн талаар дэлгэрэнгүй өгүүлнэ. Хэвтээ компараторын урт хугацааны тогтворжилт, олон удаагийн туршилтын үр дүнгүүд OIML R-35:2007 стандартаар тавигдах шаардлагад нийцэж байна.

Түлхүүр үг: хуваарьт рейк, лазер интерферометр, шалгалт тохируулга, хэмжлийн эргэлзээ.

1. УДИРТГАЛ

Манай улсын өндрийн сүлжээний геодезийн хэмжлийн чанар, үр дүн нь өндөр нарийвчлалын цахилгаан оптик зайн хэмжлийн багажны болон бүх төрлийн нивелир ба түүнтэй хамт хэрэглэгддэг рейкны хуваарийн алдаа, нэгж дамжуулалтаас ихээхэн хамаардаг. Энэ төрлийн хэмжүүрийг манай улсад шалгалт тохируулга огт хийдэггүй учир геодезийн компаниуд нь I, II ангийн нивелирдлэгийн ажилд хэрэглэж буй бар код бүхий рейкийг БНХАУ, ОХУ-ын хэмжилзүйн лабораторид өндөр үнэ ханштайгаар шалгалт тохируулга хийлгүүлж байна. Мөн барилга, авто болон төмөр зам, гүүр хоолой, инженерийн байгууламж, эрчим хүч, уул уурхай зэрэг нийгэм эдийн засгийн салбарт хэрэглэж байгаа 1500 гаруй рейкийг шалгахгүй байгаа нь тухайн ажлын нарийвчлалд чанарт сөргөөр нөлөөлж байгаа юм.

Газрын гадаргуугийн өндрийн зөрүүг хэмжих зориулалттай өндөр нарийвчлалын тоон нивелир

нь нивелирийн рейкны хамт хэрэглэгддэг. Нивелирийн рейк нь инвар, мод болон бусад материалаар хийсэн 3 м урт, 100 мм өргөн, 5 мм зузаантай хуваарьт уртын хэмжүүр юм. Хээрийн нөхцөлд цаг агаарын янз бүрийн нөхцөлд ашигладаг рейкны гадаргуугийн гузайлт, деформац нь тоон нивелирийн заалт буюу рейкны хуваарийн өөрчлөлтөд нөлөөлөх учир OIML R-35-1,2:2007 стандартын дагуу анхдагч баталгаажуулалт, шалгалт тохируулгыг гүйцэтгэх нь маш чухал юм.

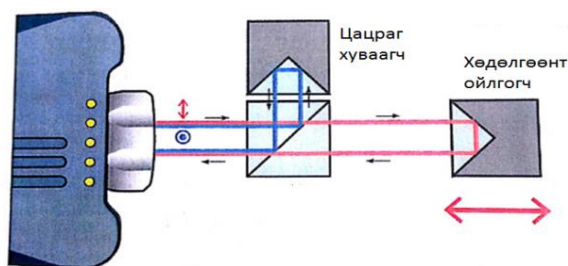
2012 онд БНЧУ-ын буцалтгүй тусламжаар ХЗХ-ийн уртын эталоны лабораторид 633 нм долгионы урттай, иодоор тогтворжуулсан Ге-Не лазерын үүсгүүр, зайн хэмжлийн лазер интерферометр суурилуулан геодези, зураг зүйн ажилд уртын үндэсний эталоноос нэгж дамжуулах нөхцөл бүрдсэн. Тиймээс уртын эталоны лабораторид дотоод нөөц бололцоог ашиглан нивелирийн рейк шалгалт тохируулгын 3 м урттай хэвтээ компаратор байгуулсан нь

* Electronic address: unurbileg@masm.gov.mn

геодезийн хэмжлийн нэгдмэл байдлыг хангахад нэн чухал ач холбогдолтой юм.

2. НЭГЖ ДАМЖУУЛАЛТ

СХЗГ-ын уртын эталоны лабораторид хадгалагдаж буй 633 нм долгионы урттай иодоор тогтворжуулсан Гели-Неон лазер үүсгүүр нь олон улсын хэмжигдэхүүний нэгжийн СИ системийн тодорхойлолтод нийцсэн уртын хэмжлийн нэгж дамжуулалтын шатлалын дээд түвшиний анхдагч эталон юм. Уртын хэмжлийн нэгж “метр”-ийн хэмжээг материаллаг (биет) хэмжүүрт дамжуулах үндсэн арга нь лазер интерферометрийн систем юм. Техник технологи үсрэнгүй хөгжсөн өнөө үед маш олон төрлийн хийц, зориулалттай интерферометрийг үйлдвэрлэж байна. Үүнээс зайн хэмжилт буюу шугаман шилжилт тодорхойлох зориулалттай Майклсоны интерферометрийг уртын хэмжилд гол төлөв ашигладаг. Майклсоны интерферометр нь гэрлийн интерференцийн үзэгдэл дээр үндэслэсэн. Үндсэн зарчим нь цацраг хуваагчид туссан лазерын туяа харилцан перпендикуляр 2 хэсэгт хуваагдах ба хөдөлгөөнт ойлгогч толь болон үл хөдлөх толиноос ойсон туяаны нийлбэрээр үүсэх интерференцийн судлыг тоолон уртын нэгжид хувиргадаг байна. (Зураг.1 хар)



$$L = f_D \cdot \frac{\lambda}{2} = N \cdot \frac{\lambda}{2}$$

Зураг.1 Майклсоны интерферометрийн зарчим.

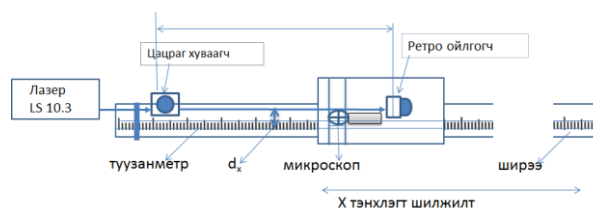
3. ТОНОГ ТӨХӨӨРӨМЖ

3.1 Оптик хэсэг

Хэвтээ компараторын лазер интерферометрийн хэмжлийн систем нь 633 нм долгионы урт бүхий LS 10.3 лазерын үүсгүүр, удирдлагын программ хангамж, тэжээлийн хэсгийг агуулах интерфейс LS 30.20 цацраг хуваагч, ретро ойлгогч толь зэргээс тогтоно.

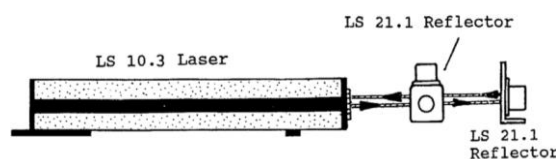


Зураг.2 LIMTEK – LMS хэмжлийн систем.



Зураг.3 Интерферометрийн шалгалтын бүдүүвч.Энд LS 10.3 - лазерын үүсгүүр LS 30.20 - удирдлагын программ хангамж, LS 20.1 - цацрагийн хуваагч LS 21.1 - ретро ойлгогч толь.

Удирдлагын интерфэйс нь WiFi эсвэл Ethernet сүлжээгээр компьютерийн программ хангамжтай холбогдон хэмжлийн өгөгдлийг бүртгэнэ.

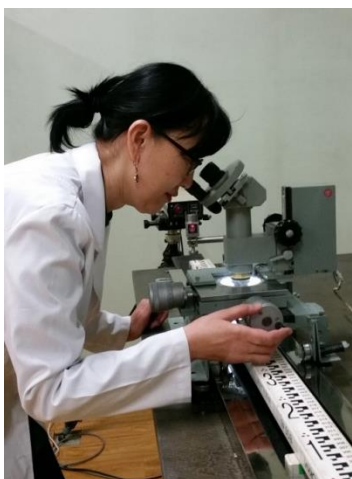


LS 10.3 лазерын туяаны тусгалын чиглэл суурийн тавцан ширээтэй параллель байх ба лазерын үүсгүүрээс гарсан туяа, цацраг хуваагчаар дамжин ретро ойлгогчид ойгоод цацраг хуваагчид буцсан цацрагууд лазерын үүсгүүрийн оролт буюу дохио хүлээн авагч уруу давхацсан байх нөхцлийг хангахаар ретро ойлгогч болон цацраг хуваагч, лазер үүсгүүрийн харилцан байрлалыг сайтар тохируулах шаардлагатай. Үүний тулд цацраг хуваагчийн шилжилтийг X, Y, Z тэнхлэгт бага зэрэг тохируулах боломжтой байх суурийг угсран ширмэн плита дээр байрлуулсан. Ретро ойлгогчийг гүйгч тэргэнцэрийн их биеийн нэг хэсэг болох X, Y тэнхлэгт шилжин хөдлөх боломжтой тавцан дээр ширмэн плитатай перпендикуляр байхаар наасан.

3.2 Механик хэсэг

Хэвтээ компараторын ерөнхий зураглалыг харуулав. Ретро ойлгогч, оптик микроскопыг

байрлуулсан тэргэнцэр чөлөөтэй гүйх зориулалт бүхий хос рельс замыг гадаргуугийн өнгөлгөө сайтай тус бүр 3.2 м урттай, 38х38 мм ган квадратыг сонгон суурийн ширмэн плита дээр шууд байрлуулсан. Хос замын дунд талд 100 мм өргөнтэй 3.2 м урт полоса төмөр байрлуулсан хос замын хоёр талаар түүний хөндлөн шилжилтээс хамгаалсан соронзон бэхлэгчүүдийг байрлуулсан. Энэ нь тэргэнцэрийн хөдөлгөөнд үл нөлөөлөх ба лазерийн үүсгүүртэй харьцангуй хэвтээ байрлалыг өөрчлөн тохируулах боломжтой болно. Гүйгч тэргэнцэрийг эхлэл цэгээс ширээний төгсгөл хүртэл 3 м аажим гүйлгэхэд ретро ойлгогчоос ойсон лазерын туяаны буцах тусгал хүлээн авагчид очиход дохионы далайц нэгэн жигд, алдаа өгөхгүй байх нөхцөлийг хангасан.



Зураг.4 Уртын эталоны лаборатори - Хэвтээ компаратор.

Гүйгч тэргэнцэрийн хувьд ММИ-2 маягийн оптик микроскопыг ашигласан ба бүтцийг бага зэрэг өөрчилсөн. ММИ-2 нь янз бүрийн шаблону геометр хэмжээг тодорхойлох

зориулалттай хэмжлийн микроскоп бөгөөд үндсэн бүтэц нь 10 дахин өсгөгч дуран нь хөдөлгөөнгүй байх ба шалгагдаж буй шаблону хөндлөн ба босоо шилжилтийг доороос нь гэрэлтүүлэн сүүдрийн аргаар хэмжихээр хийгдсэн байдаг.



Зураг.5 ММИ-2 микроскопи.



Зураг.6 Шинэчлэсэн микроскоп- гүйгч тэргэнцэр.

Бид оптик микроскопын өсгөгч дуранг их биенээс салган авч Х-У тэнхлэгт тавцантай хамт шилждэг байхаар 90° тэгш өнцгөөр бэхлэн гагнасан. Микроскопын суурь хэсгээс рейк чөлөөтэй багтах хэмжээтэй тайран, үлдсэн хэсэгт тэргэнцэр замын дагуу чөлөөтэй гүйх нөхцөлийг хангаж 8 ш подшипникт ролик, холбогч эргээс болт зэргийг нэмж угсарсан. Шинэчлэсэн микроскопын (зураг.6) өсгөгч дуран нь Х, У тавцантай хамт шилждэг байх ба суурьт бэхлэсэн подшипникт роликийн тусламжтай хос рельсын дагуу түүний дунд байрлуулсан рейкны дээгүүр чөлөөтэй гүйнэ. Шаблон тавих хэсгийн оронд туузан гэрэл

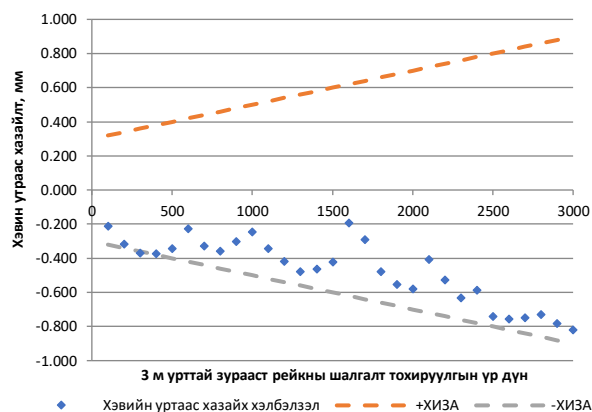
байрлуулан рейкны зураасыг өсгөгч дуранд шууд ажиглах бөгөөд дурангийн торны нарийн шилжилтийг 0,005 мм унших чадвартай микрометрийн толгойг ашиглан гүйцэтгэнэ. Ретро ойлгогчыг мөн Х, Y тавцантай хамт тогтоосон тул гүйгч тэргэнцэрийн өчүүхэн шилжилтийг лазер интерферометрийн системээр шууд хэмжих боломжтой болсон.

4. ХЭМЖИЛ, ҮР ДҮНД НӨЛӨӨЛӨХ ХҮЧИН ЗҮЙЛҮҮД

Энэ систем нь рейкыг хэвтээ байрлуулан зураасны бодит уртыг лазерын долгионы уртаар шууд тодорхойлж, хэмжлийн өгөгдлийг компьютерт дамжуулах программ хангамжаар хангагдсан. Лазер интерферометрийн LMS программ хангамж нь ретро ойлгогчийн зайн шилжилтийн утгуудыг шууд бүртгэн харуулах ба дурын цэгээс эхлүүлэх, давших болон буцах чиглэлд давтан хэмжих зэрэг сонголттой бөгөөд агаарын хүчин зүйлийн залруулгыг оруулах боломжтой. Мөн түүнчлэн гүйгч тэргэнцэрийг операторийн урьдчилан сонгосон цэгт хэвийн уртаас хэлбэлзэх зөрүүг шууд харуулахаас гадна дохионы далайцын диаграммыг ажиглах боломжтой.

Хэмжлийн үр дүнд нөлөөлөх хүчин зүйлүүд: системийн босоо ба хэвтээ өнцгийн Авве шилжилт, лазерын туяаны чиглэл ба гүйгч замын хоорондох зэрэгцээ байдал, лазерын долгионы далайц, агаарын хугарлын илтгэгч, орчны нөхцөл, температурын градиент зэрэг болно. Компараторын хэвтээ ба босоо өнцгийн шилжилтийг ретро ойлгогчийн 200 мм зай тутам дах тусгалыг тэмдэглэн босоо ба хэвтээ тэнхлэг дэх шилжилтийг тэмдэглэх замаар хэмжсэн бөгөөд Аввегийн босоо тэнхлэг дэх алдаа ± 2.02 мрад, хэвтээ тэнхлэг дэх алдаа ± 1.15 мрад байна. Компараторын нийт уртын хүрээнд лазерийн туяаны гаралтын дохионы далайц 112% – 125% хэлбэлзэж байгаа нь интерферометрийн заалтын 10 нм түвшинд нөлөөлж байна. Энэ нь рейкны зөвшөөрөгдөх алдааны утгаас олон дахин бага юм. Туршилтын хэмжилтэд 2 м урттай рейк, 3 м урттай угсардаг хуваарьт рейкны үнэмлэхүй уртыг 100 мм тутамд лазерийн долгионы уртаар тодорхойлсон. Үүнд хэвийн уртаас хазайх хэлбэлзэл нь MNS OIML R 35-1:2015

стандартын нарийвчлалын II ангийн хамгийн их зөвшөөрөгдөх алдаанаас ихгүй байна. (зураг.7)



Зураг.7 Зурааст нивелирийн рейкны шалгалт тохируулгын үр дүн.

5. ХЭМЖЛИЙН ДҮН БА ХЭЛЭЛЦҮҮЛЭГ

Рейкны хуваарийн бодит уртын 20°C дах утгыг дараах томъёогоор олно.

$$L = L_{opt} + \Delta T_{20} \cdot \alpha \cdot L + \Delta l_c + \Delta l_s + \delta_m$$

$$L_{opt} = \frac{\lambda_0}{n}$$

Энд: α - дулаан тэлэлтийн коэффициент

ΔT_{20} - жишиг 20°C температураас хазайх хазайлт

Δl_c - системийн косинусын алдаа

Δl_s - Авве алдаа

δ_m - хуваарийн хэмжлийн алдаа

n - агаарын хугарлын илтгэгч

λ_0 - лазерийн вакуум дах долгионы урт

Агаарын хугарлын илтгэгчийг Сиддорын томъёогоор бодох ба томъёоны эргэлзээ

$$u_n = 1 \cdot 10^{-8} \text{ гэж авна.}$$

$$(n-1) \cdot 10^8 = \left(8342.54 + \frac{2406147}{130 - 1/\lambda_0^2} + \frac{15998}{38.9 - 1/\lambda_0^2} \right) \times \left(\frac{p}{96095.43} \right) \left[\frac{1 + 10^{-8} (0.601 - 0.00972t)p}{1 + 0.003661t} \right] - R(8.753 + 0.036588t) \left(0.0373345 - \frac{0.00040 \cdot T}{\lambda_0^2} \right)$$

Энд p - агаарын даралт [Па], T - агаарын температур [$^{\circ}\text{C}$], R - харьцангуй чийг [%]

Хэмжлийн өргөтгөсөн эргэлзээг хэмжлийн эргэлзээг илэрхийлэх олон улсын ISO GUM удирдамжийн дагуу тооцоолсон ба $U = \sqrt{a^2 + b^2} \cdot L^2$ хэлбэрээр илэрхийлсэн ба хамрах коэффициент $k=2$ болно. Энд a – тогтмол хэсэг, b – уртаас хамаарах хэсэг ба L – хуваарийн

хэвийн урт. Хэмжлийн эргэлзээний төсвийн хураангуйг хүснэгтээр харуулав.

Хүснэгт 1. Эргэлзээний төсөв.

Эргэлзээний үүсвэр	Стандарт эргэлзээ
Лазерын долгионы урт	$2 \times 10^{-8} * L$
Хоосон явалтын алдаа	0,027 мкм/°C
Агаарын хугарлын илтгэгч	$3,3 \times 10^{-7} * L$
Дулаан тэлэлтийн коэффициент	$2,3 \times 10^{-6} * L$
Температурын градиент	$8,8 \times 10^{-8} * L$
Косинусын алдаа	0,316 мкм
Авве алдаа	44,317 мкм
Хуваарийн хэмжлийн алдаа	8,16 мкм
Өргөтгөсөн эргэлзээ, k=2	
$U = \sqrt{90.1^2 + (6.13 + L)^2}$ мкм	

Рейкны шалгалт тохируулгын өргөтгөсөн эргэлзээний утгад хамгийн их нөлөөлж буй үзүүлэлт нь лазерын туяаны босоо тэнхлэг дэх хазайлт болон Авве-гийн алдаа юм. Үүнийг гүйгч тэргэнцэрийн хөдөлгөөн, эд ангийг сайжруулах, ретро ойлгогчийг шалгагдаж буй хэмжүүрт аль болох ойрхон байрлуулах зэргээр бууруулах боломжтой. Энэхүү хэвтээ компараторыг ашиглан зөвхөн зурааст рейкны хуваарийн бодит уртыг тодорхойлохоос гадна инвар бар код бүхий хос рейкны өндрийн зөрүүг тодорхойлж болно.

6. ДҮГНЭЛТ

СХЗГ-ын уртын эталоны лабораторид 3 м урттай хуваарьт, бар код бүхий нивелирийн рейкны хэвтээ компараторыг дотоод нөөц боллоцоог ашиглан байгуулсан. Хэмжлийн эргэлзээ болон үр дүн нь MNS OIML R 35-1:2015 “Ерөнхий зориулалтын хуваарьт уртын хэмжүүр-хэмжил зүйн ба техникийн шаардлагууд” стандартын шаардлагад бүрэн нийцэж байна. Цаашид энэ системээр зөвхөн нивелирийн рейкны төдийгүй 1 метрийн хяналтын ган ба латунь шугамын шалгалт тохируулгыг гүйцэтгэх техникийн боломж бүрдлээ. Өмнө нь манай улсад энэ төрлийн хэмжүүрийн шалгалт тохируулгыг хийдэггүй байсан тул хэрэглэгчид өөрсдийн хэмжүүрийг ОХУ ба БНХАУ-ын холбогдох лабораторид өндөр өртөгөөр шалгалт тохируулгад

хамруулдаг байсан; тухайлбал тоон нивелир, тоон нивелирийн бар кодтой рейкны шалгалт тохируулга хийх багажны тоног төхөөрөмжийн үнэ өртөг өндөр учир улсын өндрийн сүлжээний ажил, I, II ангийн нивелирдлэгийн хэмжилт хийхийн тулд Герман улсын лабораторид явуулж 3 сарын хугацаанд 2000 \$ -оор рейкны шалгалт тохируулга хийлгэсэн байна. ГЗБГЗЗГ-ын хэмжил зүйн лабораторид жилд 1500 гаруй геодезийн хэмжих хэрэгсэл баталгаажуулалтад хамрагддаг, үүнээс 30 гаруй хувь нь тоон нивелир эзэлж байгаагаас харахад улсын хэмжээнд 500 гаруй нивелирын рейкыг огт шалгалт тохируулгад хамруулахгүй ашиглаж байгаа юм. Тиймээс хуваарьт, бар код бүхий нивелирийн рейкны хэвтээ компараторыг байгуулснаар геодези, зам гүүр, барилга төмөр замын салбарт уртын хэмжлийн нэгж дамжуулах, хэмжлийн нэгдмэл байдал хангагдах нөхцөл бүрдсэнээс гадна гадаад улс орон уруу гарах хөрөнгө мөнгө хэмнэсэн чухал ач холбогдолтой ажил боллоо.

7. ТАЛАРХАЛ

Тус нивелирийн рейкны хэвтээ компаратор хийхэд туслалцаа үзүүлсэн Гео Сет ХХК-д (Г.Батсүх) гүн талархал илэрхийлье.

АШИГЛАСАН НОМ

- [1] H.S.Suh, J.A.Kim et al “50 m linear measuring interferometer for calibration of survey tape” KRISS,
- [2] C.B Bosenberg, C.S.Muxteanu, “Calibration of flexible tapes to ppm accuracy level” NPL, Teddington, UK
- [3] T.Yandayan, B.Ozgun, “A motorized 5 m tape comparator for traceable measurements of tapes and rules” Measurement 49.2014.
- [4] JCGM 100:2008 “Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement”, JCGM (2008)
- [5] Д.Өнөрбилэг “Хэмжил зүйн үндэс” ISBN 978-99962-57-95-7, 2016
- [6] MNS OIML R-35-1,2:2015 “Ерөнхий зориулалтын хуваарьт уртын хэмжүүр – хэмжил зүйн ба техникийн шаардлагууд” үндэсний стандарт.