

СУДАЛГААНЫ ӨГҮҮЛЭЛ

ГЕОРАДАРЫН (GPR) –ИЙН ТАНДАН СУДАЛГААГААР ИДЭВХИТЭЙ ХАГАРЛЫН ПАРАМЕТРУУДИЙГ НАРИЙВЧЛАХ НЬ

Ц.Нямбаяр^{1,*} | Maksim Vano² | Х.Цээдулам³ |

¹ ШУА, Одон орон геофизикийн хүрээлэн

² University of Strasbourg/east, Strasbourg, France

³ ШУТИС, Геологи Уул Уурхайн Сургууль

Abstract

Хүлээн авсан: 2021-12-07

Засварлагдсан: 2021-12-09

Зөвшөөрөгдсөн: 2022-01-18

Түлхүүр үг:

Георадар (GPR), Дифференциал GPS, зөрөл хагарал, шилжил хагарал, палео-суваг, мөргөцөг

Харилцах зохиогч:

Ц.Нямбаяр ШУА
Одон орон, геофизикийн
хүрээлэн

Имэйл: nyambayar@iag.ac.mn

Seismic activity around the capital city of Ulaanbaatar has been increasing significantly since 2005. This activity is observed in the vicinity of Emeelt and is located at just over 10 km from the residential area of Ulaanbaatar, which is a high risk. As part of the seismic activity survey near Ulaanbaatar, we identified several active faults and began to study them in detail in 2010 year. The length and geomorphology of these active faults indicate a strong earthquake of magnitude 6.5-7.5.

After the Paleo-earthquake, the loose soil around the fault has undergone a process of geological erosion, which has significantly altered the traces and geomorphology of the faults on the soil of the fault plane. Therefore, the GPR sensing method for determining the fault parameters in detail, mapping and reconfiguration technology has been tested and proven to be widely used in the future.

In 2010-2019, we conducted detailed GPR surveys on active faults around Ulaanbaatar and in the central region to accurately determine their parameters. This article presents the results of using GPR 250MHz, 500MHz, and 50MHz antenna measurements in combination with differential GPS system measurements to determine how active fault parameters can be accurately determined by their results.

УДИРТГАЛ

Монгол улс нь төв Азийн идэвхитэй тектоникоор өргөгдсөн уулархаг бүс нутагт оршдог учраас газар хөдлөлийн идэвхитэй хагарал элбэг байдаг нутаг юм. Нийслэл Улаанбаатар хот орчмын сейсмик идэвхжил нь баруун Монголын сейсмик идэвхжилтэй харьцуулбал арай бага боловч мэдэгдэхүйц нэмэгдэж байгаа нь ажиглагдах болсон. Гэвч 2005 оноос эхэлсэн энэхүү идэвхжил нь зөвхөн Улаанбаатарын орчимд биш бөгөөд Улаанбаатараас баруун болон хойд зүгт сунаж тогтсон, хоорондоо перпендикуляр байрлалтай 2 идэвхтэй хагарлын хүрээнд явагдаж байгаа нь тогтоогдсон. Эмээлт хагарлыг 2008 онд илруулсан ба харин Хустай хагарал нь Эмээлтээс баруун зүгт оршдог (Зураг 2) бөгөөд эдгээр хагарлуудын урт болон

геоморфологи нь 6.5-7.5 магнитудтай газар хөдлөл болсныг илтгэдэг (Дугармаа ба бусад., 2006). Улаанбаатар хот нь өдгөө Монгол улсын хамгийн их хүн ам буюу 3 сая хүнээс 1.3 сая нь төвлөрөн суурьшсан эдийн засаг, улс төрийн гол төв болсон байна. Тиймээс газар хөдлөлийн аюулын судалгаа болон газар хөдлөлүүдийн ирээдүйд учруулж болзошгүй хөнөөл, хохирлын магадлалын тооцоо нь манай орны тэргүүн чухал асуудлуудын нэг болж байна (Munkhsaikhan, 2016). Улаанбаатар хотын эргэн тойрны газар хөдлөлийн идэвхжилийн нарийвчилсан судалгааг 2008 оноос эхлэн ШУА-ийн Одон Орон Геофизикийн Хүрээлэнгийн судалгааны баг, Франц улсын Страсбургийн Их Сургуулийн судалгааны баг, Орос улсын ШУА-ийн Эрхүүгийн салбарын судалгааны баг бүрэлдэхүүнтэй хамтран жил бүр

гүйцэтгэж байгаа болно. Эдгээр идэвхитэй хагарлын хувьд хагарлын шинж чанар, геодинамикийн процессийг ойлгох, тайлбарлахад энэхүү судалгаа нь их ач холбогдолтой юм.

Хамгийн сүүлчийн газар хөдлөлтөөс хойш хагарал орчмын суларсан хөрс элэгдлийн процес орсноор хагарлын хавтгайн хөрсөн дээрхи эвдрэлүүдийн хэлбэр хэмжээ, байрлал мэдэгдэхгүй болж геоморфологи нь маш их өөрчлөгдөж анхны хэмжээг гажуудуулсан байдаг.

Георадарын судалгааны арга нь радарын долгионы ойлтуудын зураглалаар хагарлыг тодорхойлон дүрслэхэд (Lehmann, et al., 2000; Beauprktre, et al., 2012; Antoine, et al., 2012) мөн хөрсөн доор булагдаж далдлагдсан голын суваг жалгын тандалтад (Ferry, et al., 2010) маш сайн арга бөгөөд цаашид өргөн хэрэглэгдэхээр үр дүнтэй болох нь олон судалгааны ажлуудаар туршигдаж батлагдсан болно.

Beauprktre et al. (2012) нар нь далдлагдсан сувгийн сүлжээг сэргээн босгож зураглах 3 хэмжээст Георадарын тандалтын судалгаанд, мөн McClymont F. A. et al. (2008) нар нь идэвхтэй хагарлын дүрслэлийг сайжруулах, геометрийн шинж чанрийг тодорхойлоход 3 хэмжээст Георадарын мэдээллийг ашигласан. Харин Dentith et al. (2010) нар нь маш их элэгдэлд орсон эртний хувирал бүхий хагарлын мөргөцгийн судалгаанд георадарын мэдээллийг тренчийн үр дүнтэй харьцуулсан байдаг. Георадарын хөгжлийн дүр төрхийн үндсэн ухагдахуун нь идэвхтэй тектоникийн орчинтой нягт холбогдож уялдсан байдаг (McClymont et al., 2008; McClymont et al., 2010).

Тиймээс бидний энэхүү судалгааны ажлын гол зорилго нь идэвхитэй хагарлын үндсэн палеосейсмологийн шинж чанрыг тодорхойлох бөгөөд үүний тулд хагарлын геометрийн шаардлагатай параметруудийг георадарын аргачлал болон гадаргуугийн топографын геометрийн зүсэлттэй хосолсон судалгааны тусламжтайгаар тодорхойлж, палеосейсмологийн уламжлалт аргаар тодорхойлсон үр дүнтэй

харьцуулахад оршино.

ГЕОРАДАРЫН СУДАЛГААНЫ АРГА ЗҮЙ

Ground-Penetrating Radar (GPR) буюу Георадарын судалгааны онол нь анх 1930 онд гарсан бөгөөд 1937 онд анхны цахилгаан соронзон долгионоор геофизикийн хайгуул хийх аргыг туршсан байдаг боловч техник технологийн хувьд ашиглахад хүнд байсан. Харин 1992 оноос микроэлектроникийн хөгжлийг дагаж өндөр хурдацтай хөгжиж эхэлсэн ба өнөөдрийн байдлаар маш олон салбарт өргөн хэрэглэгддэг болсон (Jol, 1995).

Георадарын судалгаа нь Геологи, Байгаль орчин, Археологи, Уул уурхай, Барилга байгууламж, Инженерийн шугам сүлжээ, Гүний ус, Цас мөс, Агуй хонгилийн судалгаанд өргөн хэрэглэгддэг (Jol, 2009) ба багажийн давуу тал нь зөөж тээвэрлэхэд авсаархан, битүүмжлэгдсэн байдаг учраас эвдэрч гэмтэх тохиолдол бага, геофизикийн бусад судалгааны багажийг бодвол хэмжилтийг богино хугацаанд зардал багатайгаар босоо хэвтээ тэнхлэгийн дагуу хийх боломжтойгоор онцлог юм (Jol, 1995). Георадар нь 10 МГц – 2 ГГц –ийн өндөр давтамж бүхий цахилгаан соронзон долгионы тархалт, ойлт, сарнил гэх мэт физикийн хуулинд тулгуурласан геофизикийн судалгааны нэг гол аргачлал юм (Jol, 1995). Цахилгаан соронзон долгионы тархалт нь тухайн хөрс болон чулуулгын диэлектрик тогтмол болон цахилгаан дамжуулалт зэрэг геологийн шинж чанараас хамаардаг ба тархалтын хурд нь 50-150 м/микросек байдаг (Heincke, et al., 2005). Георадар нь бага гүний соронзон шинж чанаргүй чулуулгын өдөөгдөж цахилгаанжсан болон цахилгаанжаагүй ялгаралуудыг зураглах боломж олгодог (Jol, 2009).

Георадарын судалгааны арга нь бага гүний хайгуулын аргад ордог бөгөөд тандалтын гүн нь Георадарын антенний давтамжын цахилгаан соронзон долгионы замхралаас шалтгаалдаг (Jol, 1995). Хамгийн бага давтамж нь хамгийн их гүнд нэвтрэх бөгөөд

энэ нь 5 см – ээс 60 м хүртэл байдаг бол зураглалын орон зайн нарийвчлал нь 0.003-2 м (Heincke, et al., 2005). Нэвтрэх гүн болон зураглалын нарийвчлал нь дамжуулагчаас цацаж буй радио долгионы давтамж болон

тус хэмжилтийн орчны геологийн бүтэц, шинж чанар, цахилгаан эсэргүүцэл зэргээс хамаардаг (Jol, 1995).

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \text{ Томьёо 1}$$



Зураг 1. Георадарын Common Offset (CO) аргачлалын хамгаалагдсан антений хэмжилт, ажиллах зарчим. Хэмжилтийн алхам хэмжигч дугуйгаар замаа хэмжинэ, антенд өгөх импульс болон хэмжилтийн мэдээллийг оптик кабелиар хяналтын төхөөрөмж рүү дамжуулж түүнээс цааш нь хэмжилтийн компьютерт мэдээллээ дамжуулж хадгалах замаар георадарын хэмжилт хийгдэнэ.

Энд долгионы урт нь давтамжаас урвуу хамааралтай ба вакум дахь гэрэл тархах хурдтай шууд хамааралтай. GPR-ийн зарчим нь тухайн материалын харьцангуй диэлектрик нэвтрүүлэх чадварт суурилдаг. GPR-ийн цахилгаан соронзон (EM) орон нь цахилгаан соронзон долгион хэлбэрээр газарт тархдаг. Энэхүү тархалтыг

Максвеллийн тэгшитгэлүүдээс олж авсан цахилгаан соронзон (EM) долгионы тэгшитгэлээр илэрхийлбэл (Cassidy, 2009):

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu\sigma \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu\epsilon \cdot \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \text{ Томьёо 2}$$

Үүнд: E - цахилгаан орон, μ – соронзон нэвтрэх чадвар, ϵ – диэлектрик нэвтрүүлэх чадвар, σ – цахилгаан дамжуулах чадвар
Гүн рүү чиглэсэн босоо тэнхлэгийн нарийвчлал нь ашиглагдаж буй антений давтамж ба цахилгаан соронзон долгионы хурдаас хамаардаг. $\lambda/4$ хэмжээ нь 50 – 500 МГц давтамжууд ба 0.1 – 0.14 м/наносек хурднуудад 5 – 70 см хүртэл өөрчлөгддөг (Heincke, et al., 2005).

Георадарын хэмжилт хийх аргачлал нь үндсэн 2 төрөл байдаг бөгөөд бид энэхүү судалгаанд Common Offset (CO) буюу дамжуулагч болон хүлээн авагч антен хоорондын зай нь тогтмол байдаг хэмжилтийн аргачлалыг ашигласан болно (Зураг 1). Бидний хэмжилт хийсэн аргачлал нь дотроо дамжуулагч болон хүлээн авагч антений хувьд хамгаалагдсан (Shielded antenna) ба хамгаалагдаагүй (Unshielded antenna) антентай гэж мөн 2 ангилалдаг бөгөөд бид хамгаалагдсан 250МГц, 500МГц хамгаалагдаагүй RTA 50МГц антенүүдээр тухайн хэмжилтүүдийг гүйцэтгэсэн.

Хамгаалагдсан антен нь дамжуулагчаас цацруулж байгаа цахилгаан соронзон долгион нь зөвхөн газрын гүн рүү тархдаг учир орчны нөлөөлөл шуугиан бүртгэгддэггүй давуу талтай. Энэ ойлт нь радарграмм дээр ямар байдалтай харагдахыг харж болно. Георадарын хэмжилт хийх зарчмыг (Зураг 1) нарийн харж болно. Явсан нийт замыг антены ард байрлах дугуйгаар хэмжинэ (Jol, 1995).

Судалгааны талбай, түүний геологийн орчин

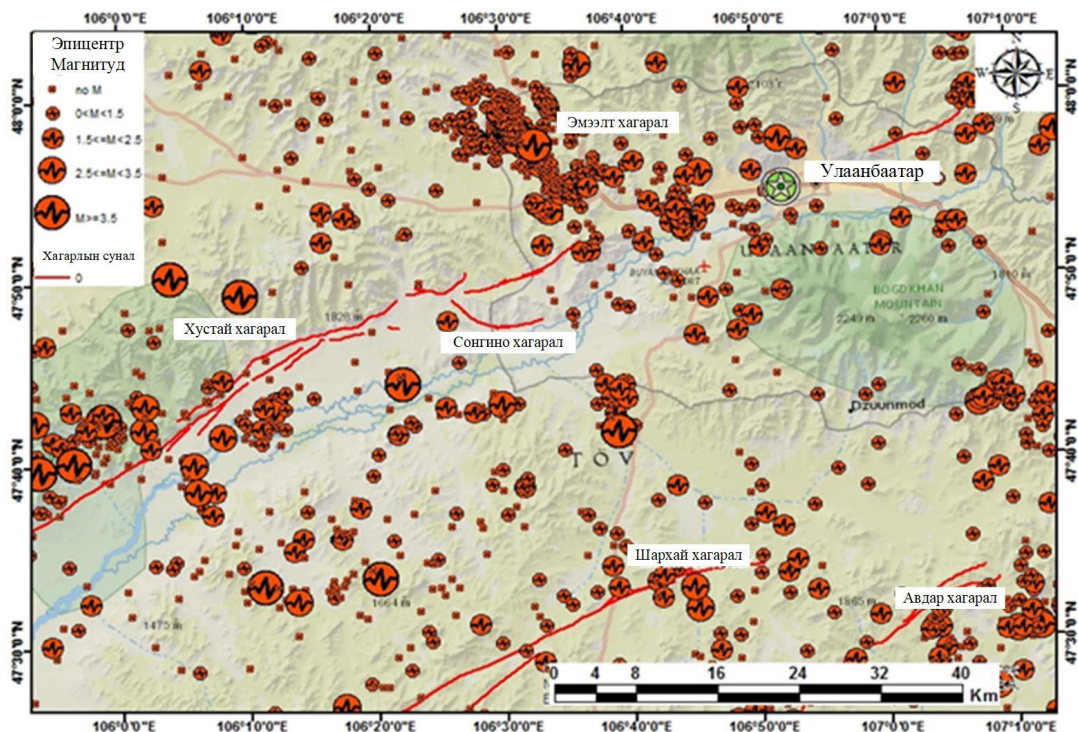
Бидний гүйцэтгэсэн георадарын судалгааны ажлуудаас Эмээлт, Сонгино болон Могод хагарлуудын үр дүнг оруулж байгаа учир тэдгээр хагарлуудын товч мэдээллийг танилцуулбал:

Бидний судалгаа Эмээлтийн хагарал дээр эхэлж төвлөрсөн ба энэ нь тив доторх микро блокуудтай холбоотой бөгөөд дунд зэргийн хэв гажилт нь жилд 1 мм-ээс бага байх магадлалтай (Calais, et al. 2003; Calais, et al., 2006). Геоморфологийн урьдчилсан ажиглалтын дараагаар 2009 онд анхны

судалгааны тренч ухсан (Jean-Remi, 2014). Эмээлт хагарал нь Улаанбаатар хотоос баруун хойд зүгт 10км зайд орших ба хамгийн багадаа 25км урт юм.

Хустайн гол хагарал ерөнхийдөө тэлэлтийн механизмаас үүдэлтэйгээр хагарлын хавтгайн дагуу босоо хөдөлгөөн буюу зөрөл төрлийн хэв шинж зонхилсон, зүүн хойшоо 60°-ын суналтай, зүүн-гарын хэвтээ шилжилттэй хагарал юм (Ferry, et al., 2004). Хустайн нуруу хагарлын системн зүүн жигүүр нь Монгол улсын нийслэл Улаанбаатар хотын баруун талд 10 орчим километрт оршино (Зураг 2). 1974 оноос хойш тухайн хагарлын орчимд магнитуд 4-тэй 5 удаагийн, магнитуд 5.4-тэй нэг удаагийн хөдлөлүүд ООГХ-ын станцуудад бичигдсэн байдаг. Өндөр нарийвчлалтай сансрын зургууд, соронзон зураглал, геоморфологи болон трэнчийн судалгаа зэргийг хослуулан судалсны үндсэн дээр хагарлын дагууд нарийвчилсан морфотектоник зураглал хийгдсэн (Munkhsaikhan, 2016; Ferry, et al., 2004; Ferry, et al., 2010).

Бидний хийсэн геоморфологи, сансрын зургийн тандан судалгаа, хагарлын механизм, хагарлын геометр бүтцийн судалгаа, хээрийн судалгаа, станцуудад бичигдэж байгаа газар хөдлөлийн орчин үеийн идэвхжил зэрэгт үндэслэн Хустай болон Эмээлтийн хагарлыг Улаанбаатар хотын газар хөдлөлийн болзошгүй аюулт бүсүүдийн нэгэнд тооцож байна (Ferry, et al., 2010) (Зураг 2).



Зураг 2. Улаанбаатар хот орчмийн 1994 – 2015 оны Сейсмик идэвхжилийн (улаан дугуй) зураг ((Munkhsaikhan, 2016) ба УМТ мэдээлэл, ООГХ, ШУА). Улаан сугамаар идэвхитэй хагарлуудын үл мөрийг харуулсан ((Ferry, et al., 2010), (Al Ashkar, 2015)). Хустайн гол хагарал ойролцоогоор 80 км урт, Эмээлт хагарал 40 км урт.

Харин Сонгино хагарал нь Эмээлт болон Хустай хагарлуудыг холбосон завсрын структур бөгөөд уг хагарлын нарийвчилсан параметрууд болон шилжилт хөдөлгөөн нь дээрхи хоёр гол хагарлын геодинамикийг тодорхойлоход чухал ач холбогдолтой юм. Могод хагарал нь Улаанбаатар хотоос баруун зүгт 300 орчим км зайд байрлах боловч үзүүлэх нөлөөлөл нь өндөрт тооцогддог (Bayasgalan, et al., 1999b). Тиймээс Могод хагарал дээр амжиж анхааруулах станц суурилуулсан байдаг.

Георадарын хэмжилт

“Улаанбаатар хотын бичил мужлалын шинэчилсэн зураг зохиох” ажлын хүрээнд 2010-2017 оны хооронд Улаанбаатар хот орчмын Хустай, Эмээлт, Сонгино болон Гүнж, Авдар, Шархай, Мөнгөнморьт зэрэг идэвхитэй хагарлууд дээр ШУА-ийн Одон Орон Геофизикийн Хүрээлэнгийн

судалгааны баг, Франц улсын Страсбургийн Их Сургуулийн судалгааны баг бүрэлдэхүүнтэй хамтран геологи, георадарын хэмжилтийн ажлуудыг хийж гүйцэтгэсэн бол 2014-2018 оны хооронд “Аймгийн төвүүдийн бичил мужлалын шинэчилсэн зураглалын” ажлын хүрээнд Батхаан, Хужирт, Баянхонгор, Могод, Баян Агт зэрэг идэвхитэй хагарлууд дээр ШУА-ийн Одон Орон Геофизикийн Хүрээлэнгийн судалгааны баг дангаараа геологи, георадарын нарийвчилсан хэмжилт судалгааны ажлуудыг хийж гүйцэтгэсэн.

Эдгээр георадарын судалгааны хэмжилтийг бид Швед улсын MALA Geoscience брэндийн ProEx – фибер оптик контрол систем болон XV11 – хээрийн хэмжилтийн компьютер ашиглан 250 МГц болон 500 МГц –ийн хамгаалагдсан антенүүд ба RTA 50 МГц – ийн хамгаалагдаагүй антенүүдээр

хийж гүйцэтгэсэн.

Хагарлын геометрийг тодорхойлох улмаар тренч ухах оновчтой байрлалыг тогтоох үүднээс хагарлын мөргөцөгт перпендикуляр чиглэлээр, харин эртний голын жалгын шилжилтийг тодорхойлох зорилгоор хагарлын мөргөцөгт параллель чиглэлүүдээр хөндлөн огтлолуудаа сонгон 2D болон 3D хэмжилтүүдийг хийсэн.

Шилжил төрлийн хагарал дээр хагарлын хавтгайд перпендикуляр байрлалтай Георадарын хөндлөн огтлолуудаар шаардлагатай параметрүүд харагддаггүй учраас шилжил хагарлын гол параметр болох хэвтээ шилжилтийг уулын амнуудын ус урсдаг жалгуудын шилжилтээр тодорхойлдог. Харин газар хөдлөлтөөс хойш геологийн элэгдлийн процессийн улмаас тухайн үеийн усны жалга суваг нь булагдаж далдлагдан өөр гольдрол бүхий жалгууд үүссэн байдаг учраас шилжил хагарлын хавтгайд параллель байрлалтайгаар буюу усны жалга сувгуудыг хөндлөн огтолсон байрлалаар Георадарын хөндлөн огтлолуудыг хийж эртний жалга сувгийн хувиралт өөрчлөлтүүдийг сэргээн зураглах замаар хэвтээ шилжилт бүхий эртний газар хөдлөлтийн хөдөлгөөний шилжилтийн хэмжээг нарийн тогтоодог (Нямбаяр, ба бусад., 2018).

Георадарын хээрийн хэмжилтийн мэдээлэл цуглуулалтыг MALA брендийн өөрийнх нь программ хангамж болох RAMAC Groundvision2 программ хангамж ашиглан гүйцэтгэдэг. Хэмжилт хийхэд хамгийн чухал параметрийн нэг нь триггер интервал

буюу хэмжилтийг гүйцэтгэх алхам бөгөөд үүнийг 250 МГц антены хувьд 3-5 см, 500 МГц антены хувьд 2-3 см – ээр сонгож харин RTA 50 МГц антены хувьд 10-20 см –ээр хэмжилтээ гүйцэтгэсэн.

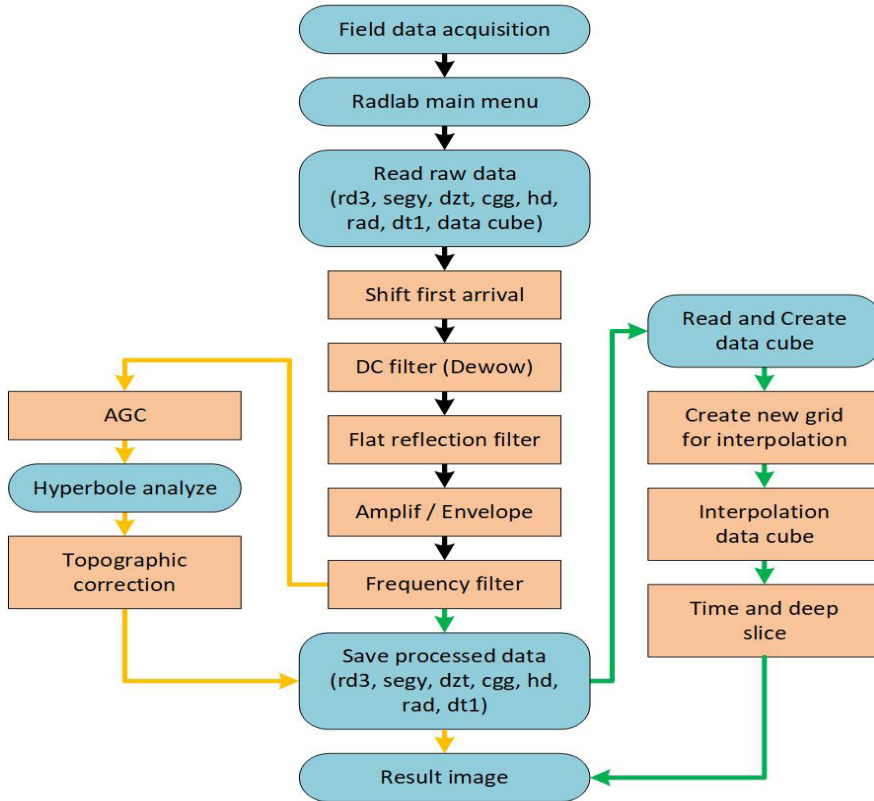
Георадарын хөндлөн огтлолууд тус бүр дээр сантиметрийн нарийвчлал бүхий дифференциал GPS систем ашиглан газрын гадаргуугийн топографыг хэмжиж зохих боловсруулалтын алхам дээр нь оруулан нэгтгэж өгдөг.

Георадарын мэдээлэл боловсруулалт

Георадарын бүх хэмжилтийн мэдээллийг MATLAB дээр бичигдсэн нээлттэй программ хангамж ашиглан гүйцэтгэдэг (Girard, 2002). Уг программ хангамжийг RadLab гэдэг ба Франц улсын Страсбург хотын Их Сургуулийн (EOST) хамт олон боловсруулсан бөгөөд бид хамтын ажиллагааныхаа хүрээнд чөлөөтэй ашиглаж байгаа болно.

RadLab программ нь Георадарын RD3, CGG, SEGY, DT1, DZT зэрэг бүх төрлийн мэдээлэлтэй ажиллах боломжтой ба олон функцуудтай чадварлаг програм юм. Бид Георадарын хэмжилтийн мэдээлэлдээ дараахи (Зураг 3) боловсруулалтуудыг хийж үр дүнгийн зураглалаа гаргаж авсан. Топографийн хэмжилтийн мэдээлэл байхгүй учраас GoogleEarth программын топографын утгаас авсан өндөршлийн утгыг оруулж топографийн засварыг хийсэн ба топографийн гажлийн шилжилтийн тооцоонд 0.12м/наносек тогтмол хурд хэрэглэсэн.

GPR Data processing diagram



2D processing → + → 3D processing → + →

Зураг 3. Георадарын 2D болон 3D хэмжилтийн мэдээлэлд боловсруулалт хийх алхамууд. 2D боловсруулалтыг хийх алхам нь хар болон шар сумыг дагаж харин 3D боловсруулалтыг хар болон ногоон сумыг дагаж гүйцэтгэдэг. Хөх өнгөөр ялгасан алхамууд нь мэдээлэл оруулах гаргах алхамууд бөгөөд улбар шар өнгөөр ялгасан алхамууд нь георадарын сигнал болон зургын боловсруулалтын алхамууд юм.

Георадарын зураглалын үр дүн, тайлал

Георадарын судалгааны арга нь хагарлын шилжилт ба бусад параметруудийг тодорхойлох, далдлагдсан хуучин суваг, жалгыг зураглах зэрэгт маш сайн үр дүнтэй арга юм. Георадарын зураглалын үр дүнд тайлал хийхдээ ялгаатай үе давхаргуудын зааг болон долгионы ойлт, хугарал, замхрал, гажилт өгч байгаа хэсгүүдэд анализ хийж түүнийгээ тухайн газрын геологийн бүтэцтэй харьцуулан эцсийн дүгнэлт хийдэг (Davis & Annan, 1989).

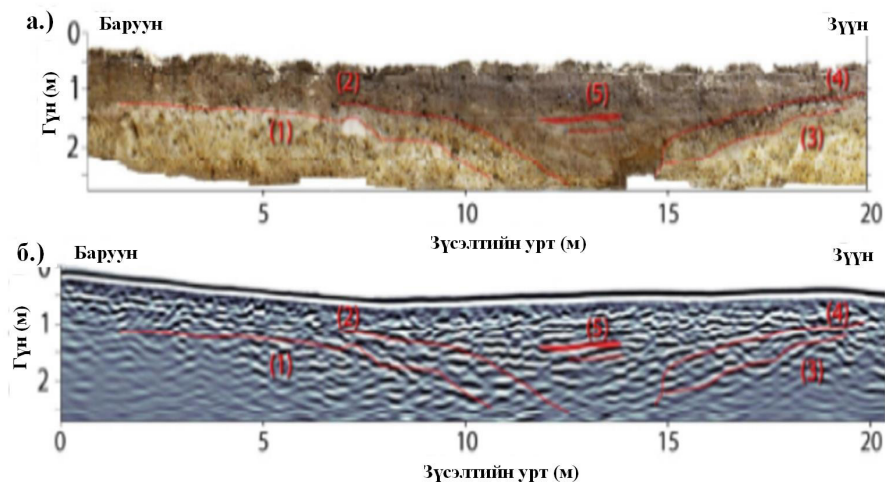
Бидэнд Улаанбаатар хот орчмийн болон төвийн бүсийн идэвхитэй хагарлууд

дээр хийгдсэн георадарын судалгааны үр дүнгүүд нь хагарлын бүх төрлүүдийг багтаасан байдаг ба тэдгээрийн төрлийг тодорхойлж гаргасан байдаг (Нямбаяр, ба бусад., 2018).

Эмээлт хагарлын 2010-2011 онд дараалж хийгдсэн “П” хэлбэртэй тренчийн дотор гүйцэтгэсэн палео-сүвгийн 3D хэмжилтийн үр дүнд хагарлаар шилжсэн сүвгийн шилжилтийг тодорхойлсон (Зураг 5). Уг сүвгийн ханын фото мозайк болон түүнтэй параллель хийгдсэн георадарын хэмжилтийн үр дүн сайн тохирдог (Зураг 4).

Харин георадарын RTA 50МГц антений үр дүнгээр хагарлын унлын өнцгийг тодорхойлж болох нь олон хэмжилтийн үр дүнгээр батлагдсан ба үүний нэгэн жишээ нь Эмээлт хагарлын үр дүнгийн зураглал юм (Зураг 5а). Тренчийн судалгаа болон

геофизикийн судалгааны үр дүнгүүдэд тайлал хийснээр Эмээлтийн хагарал нь шахалтын эффект болох босоо шилжилт бүхий огшил бүтэц агуулсан баруун гарын хэвтээ шилжилттэй хагарал болох нь тогтоогдсон.

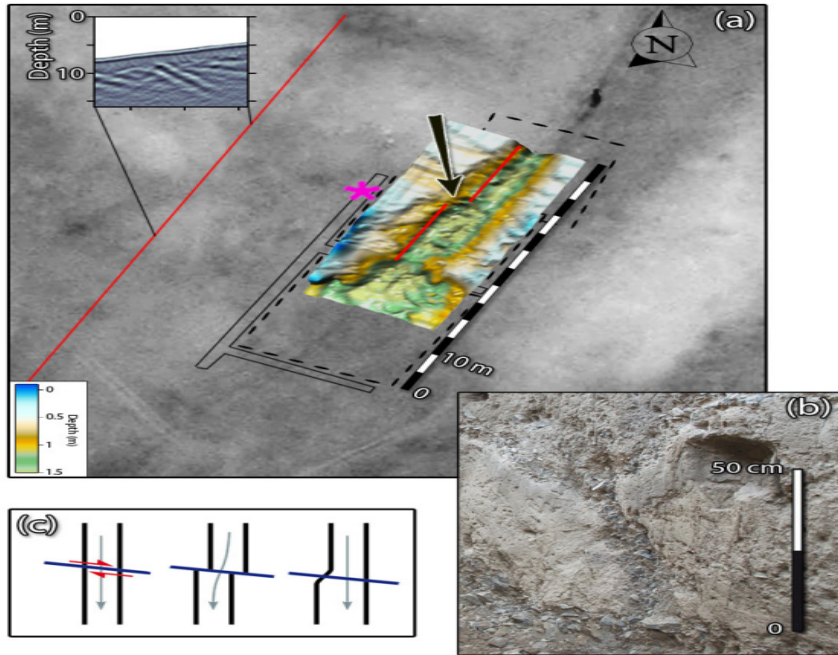


Зураг 4. Эмээлт хагарлаар шилжсэн палео-сүвгийг огтолж ухсан судалгааны тренчтэй параллель хийгдсэн георадарын 500МГц антений хэмжилтийн үр дүнгийн зураглалын тайлал. а.) судалгааны тренчийн хананы фото мозайк, б.) георадарын үр дүнгийн эцсийн зураглал ба түүн дээр тайлал хийсэн байдал. Хоёр давхаргын заагыг цагаан сумаар заав.

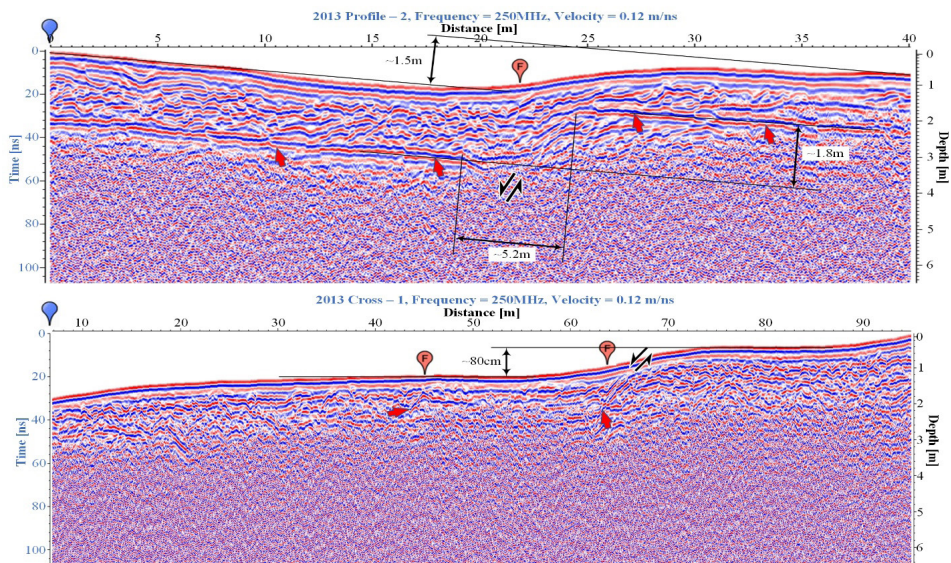
Сонгино хагарал дээр 3 өөр бүтэц ажиглагддаг бөгөөд тэдгээр нь мөн георадарын хэмжилтүүдээр тодохойлогдсон байдаг. Зөрөл структурын хэсэг дээр хийгдсэн зураглалын гол үр дүн дээр хэвтээ болон босоо шилжилтүүдийг нарийн тодорхойлох боломжтой байдаг бөгөөд газар доор далдлагдсан бүтэц болон гадаргуу дээрхи хэмжилтүүд нь хоорондоо 30см ялгаатай байгааг харж болох ба мөн хагарлын унлын өнцөг нь 45°-аас их байгаа нь харагдаж байна (Зураг 6). Уг зөрөл структурын хэвтээ шилжилт нь ойролцоогоор 5.2м, харин босоо шилжилт

нь 1.8м утгатай байна. Хагарлын суналтай параллель зүсэлт дээр мөн адил зөрөл унал ажиглагдаж байгаа нь уг зөрөл бүтцийн ерөнхий унал нь баруун хойш чиглэлтэй болхыг тодорхойлж байгаа юм.

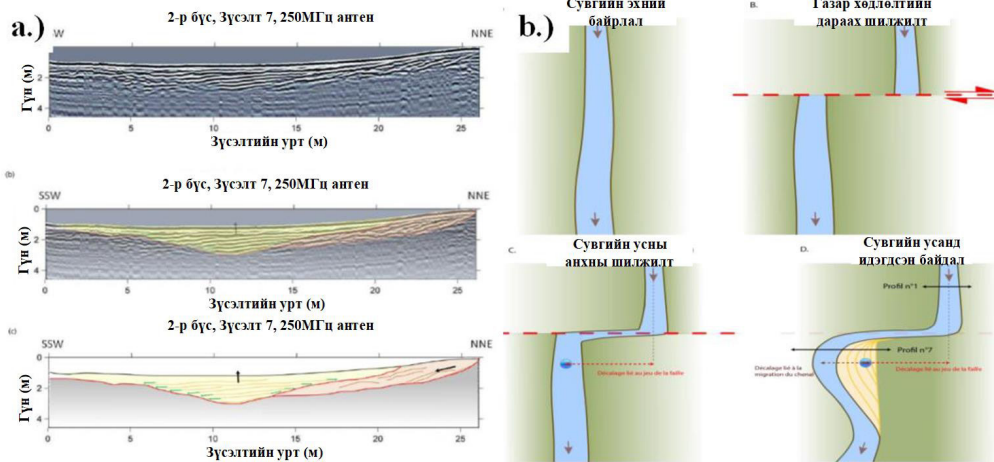
Могод хагарал дээр 2012 онд баруун гарын шилжил хагарлаар шилжсэн палео-суваг дээр 2D хэмжилт гүйцэтгэсэн бөгөөд үр дүн нь уг сүвгийн шижилт, гольдролын хувирлыг тод харуулсан болно (Зураг 7). Палео-сүвгийн хана дагаж үелсэн олон давхрага нь сүвгийн шилжилт хөдөлгөөнийг дагаж үүссэн хурдас хуримтлалууд болно (Зураг 7а).



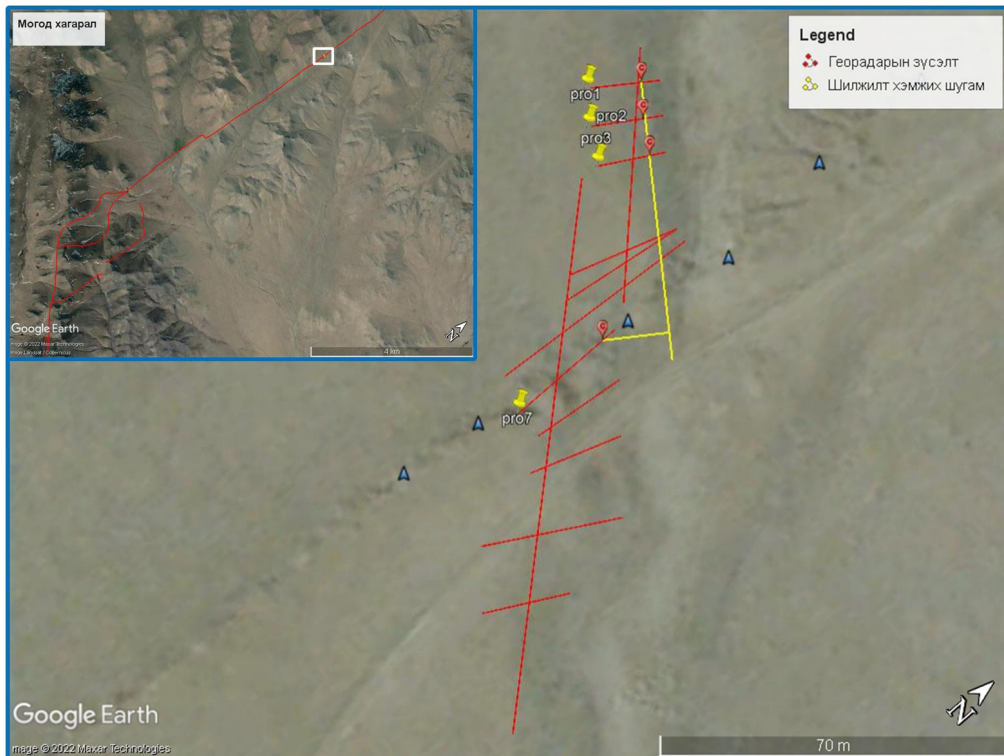
Зураг 5. Эмээлт хагарал дээр хийгдсэн палео-сүвгийн судалгааны үр дүн тайлал. а.) палео-сүвгийн үр дүнгээр сэргээн гаргасан сүвгийн шилжилт 2м байна (улаан шугам болон хар сум) болон RTA 50МГц антений үр дүнгийн зураглал (улаан шугам болон түүн дээр таслаж харуулсан), ягаан од нь хагарлын хавтгайн байрлал. б.) тренчийн ханан дахь хагарлын фото. с.) палео-сүвгийн эвдрэлийн тайлал. (Jean-Remi, 2014)



Зураг 6. Сонгино идэвхитэй хагарлын үр дүнгийн тайлал зураг. Энэ 2 нь 2013 онд георадарын 250МГц антенаар хийгдсэн хэмжилт бөгөөд эхний зураг нь хагарлыг перпендикуляр огтолж хийгдсэн, хоёр дахь нь хагарлын мөргөцөг дээгүүр параллель хийгдсэн хэмжилтүүд болно.



Зураг 7. Могод хагарлын палео-сувгийн судалгааны үр дүн. а.) георадарын 500МГц антений үр дүнгийн зураглал ба түүний тайллыг харьцуулсан байдал. б.) палео-сувгийн шилжилт болон түүний гольдролын хувьсал өөрчлөлтийг загварчилж тайлал хийсэн байдал (Judith, 2013).



Зураг 8. Могод хагарлын палео-сувгийн судалгааны үр дүн тайлалаар сувгийн бодит байрлалыг тодорхойлсон зураг. Улаан шугамаар зүсэлтүүдийн байрлалыг, шар цэгээр хэмжилтийн эхлэл, улаан цэгээр палео-сувгийн далдлагдсан байрлалыг сэргээн зурсан ба шар шугам нь шилжилтийг тогтоох хэмжилтийн шугам юм. Хөх цэгүүд нь хагарлын байрлалыг заана.

Георадарын үр дүнгийн зураглал дээр хийгдсэн анализаар гольдролын хувирлыг загварчилснаар газар хөдлөлтөөр шилжсэн сувгийн анхны байрлалыг сэргээн тогтоож түүн дээр тодорхойлсон шилжилтийн утга нь (15.5м) бол палеосейсмологийн уламжлалт аргаар газрын гадаргуу дээр (12м) тодорхойлсон шилжилтийн утгаас ойролцоогоор 3.5м-ээр зөрөөтэй байна гэж тодорхойлсон байдаг.

Момент магнитудын хэмжээс нь газар хөдлөлтийн хүчийг тооцох хамгийн сүүлийн үеийн хэмжээс юм (Kanamori, 1977), (Hanks & Kanamori, 1979). Газар хөдлөлтийн сейсмик моментийг дараах байдлаар тодорхойлно:

$$M_0 = DA\mu \quad \text{Томьёо 3}$$

Үүнд D нь хагарлын гадаргуу дээрх дундаж шилжилт, A нь хагарлын гадаргуугийн талбай ба μ нь эвдэрсэн чулуулгийн дундаж хатуулаг юм (Aki, 1966), (dePolo & Slemmons, 1990). Момент магнитудын хэмжээг газар хөдлөлтийн сейсмик моментын хамаарлаар тооцдог .

$$M_w = 2/3 \log M_0 - 10.7 \quad \text{Томьёо 4}$$

Үүнд M_w момент магнитуд, M_0 сейсмик магнитуд

Дээлхи томьёоноос харахад газар хөдлөлтийн хүчийг тооцоход хагарлын сунал, шилжилт зэрэг параметрууд нь шууд хамааралтай байгаа нь харагдаж байна.

ДҮГНЭЛТ

Хүчтэй газар хөдлөлтийн дараах элэгдэл, хувирлын явцад хагарлын ул мөр, эвдрэл цуурлууд нь аажмаар хувирч ялгаж танихад хэцүү болсон байдагч ийм бүтцийг илрүүлж тодруулах, нарийвчлан судлаж зураглахад орчин үеийн өндөр, дэвшилтэт техник технологийн хөгжил дэвшил нь бидэнд санаанд оромгүй шинэ боломж бололцоонуудыг нээн гаргаж өгсөөр байгаа билээ. Үүний нэг жишээ бол идэвхитэй хагарлуудын судалгаан дээр орчин

үеийн геологи, геофизикийн судалгааны дэвшилтэт технологи болох георадарын 2D, 3D зураглал, мөн дифференциал GPS систем, компьютерт суурилсан тоон боловсруулалт зэрэг олон дэвшилтэт технологиудыг энэ судалгаанд хослуулсан явдал юм.

Энэхүү судалгааны ажлын үр дүнд георадарын тандалт судалгаа нь идэвхтэй хагарлын параметруудийг болон түүний төрлийг тодорхойлоход өндөр үр дүнтэй, зардал бага, ашиглахад хялбар судалгааны арга болох нь батлагдаж байна.

Мөн түүнчлэн геологийн нас тогтоох судалгааны тренч ухах оновчтой байрлалыг олж, ажлаа нарийн төлөвлөж гүйцэтгэхэд өндөр үр ашигтай болох нь харагдаж байгаа юм.

Түүнчлэн георадарын судалгааны аргачлал нь палеосейсмологийн шинжилгээ судалгаанд илүү өргөн дэлгэр хэрэглэгдэж, палеосейсмологийн процессийг сэргээн зураглах бололцоотойг нотлон харуулсан. Палеосейсмологийн уламжлалт аргаар тодорхойлсон шилжилтийн утга нь бидний георадарын 250 МГц болон 500 МГц антений нарийвчилсан хэмжилтүүдийн утгаас ялгаатай байгаа бөгөөд Сонгино хагарлын босоо шилжилт нь 0.3м, Могод хагарлын хэвтээ шилжилт нь 3.5м зөрөөтэй байгаа нь газар хөдлөлтийн хүчний тооцоог нарийвчлахад өндөр ач холбогдолтой гэдэг нь харагдаж байна.

Монгол Улсын Засгийн газар “Газар хөдлөлийн гамшгийн эрсдэлийг бууруулах үндэсний хөтөлбөр”-ийн хүрээнд хийгдсэн идэвхитэй хагарлуудын судалгаан дээр георадарын тандан судалгааны шинэ дэвшилтэд технологийг ашиглаж байгаа нь судалгааны ажлын нарийвчлалыг дээшлүүлэхэд өндөр ач холбогдолтой болох нь харагдаж байна.

АШИГЛАСАН ХЭВЛЭЛ

Aki, K. (1966). Generation and propagation of G waves from the Niigata earthquake of June 16, 1964. Part 2. Estimation of earthquake moment, released energy,

- and stress-strain drop from the G wave spectrum. *Bulleting Earthquake Research Institute*, хуудсд. 44: 73-88.
- Al Ashkar, A. (2015). *Tectonique active de la rйgion d'Oulan Bator, Mongolie: Analyse morpho-tectonique et palйoisismologique des failles actives de Sharkhai et Avdar*. Strasbourg, France: ED413, UM7516, University of Strasbourg.
- Antoine, S., Matthieu, F., Ulziibat, M., Baatarsuren, G., Munkhsaikhan, A., Maksim, B., . . . Demberel, S. (2012). Investigation of active faults near Ulaanbaatar. Implication for seismic hazard assesment. *The 9th General Assembly of Asian Seismological Commission* (хуудсд. 265-267). Ulaanbaatar, Mongolia: International scientific cooperation for prevention and mitigation seismic disaster.
- Bayasgalan, A., & Jackson, J. (1999b). A re-assessment of the faulting in the 1967 Mogod earthquake in Mongolia. *Geophysical Journal International*, 138: 784-800.
- Beauprktre, S., Garambois, S., Manighetti, I., Malavieille, J., Сйнйchal, G., Chatton, M., . . . Romano, C. (2012). Finding the buried record of past earthquakes with GPR based palaeoseismology: a case study on the Hope fault, New Zealand. *Geophysical Journal International*, 189: 73-100.
- Calais, E., Dong, L., Wang, M., Shen, Z., & Vergnolle, M. (2006). Continental deformation in Asia from a combined GPS solution. *Geophysical Research Letter*, 33(24).
- Calais, E., Vergnolle, M., Sankov, V., Likhney, A., Miroshnitchenko, A., Amarjargal, S., & Дйverchire, J. (2003). GPS measurements of crustal deformation in the Bankal-Mongolia area (1994-2002): Implication for current kinematics of Asia. *Journal of Geophysical Research*, 108: 2051.
- Cassidy, N. (2009). Theory and Applications, chapter Ground Penetrating Radar data processing, modelling, and analysis. H. Jol-Δ, *Ground Penetrating Radar Theory and Applications* (хуудсд. 141-176). Amsterdam, Netherland: Elsevier.
- Davis, J. L., & Annan, A. P. (1989). Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, 37: 531-551.
- Dentith, M., O'Neill, A., & Clark, D. (2010). Ground penetrating radar as a means of studying palaeofault scarps in a deeply weathered terrain, southwestern Western Australia. *Journal Applied Geophysics*, 72: 92-101.
- dePolo, C. M., & Slemmons, D. B. (1990). Estimation of earthquake size for seismic hazards. E. L. Krinitsky, & D. B. Slemmons-Δ, *Neotectonics in Earthquake Evaluation* (хуудсд. 8: 1-28). Boulder, Colorado: Geological Society of America.
- Ferry, M., Meghraoui, M., Girard, J. F., Rockwell, T. K., Kozaci, O., Akyuz, S., & Barka, A. (2004). Ground-penetrating radar investigations along the North Anatolian fault near Izmit, Turkey. *Geological Society of America*, 32: 85-88.
- Ferry, M., Schlupp, A., Ulziibat, M., Munschy, M., Fleury, S., Baatarsuren, G., . . . Ankhtsetseg, D. (2010). Tectonic Morphology of the Hustai Fault (Northern Mongolia), A Source of Seismic Hazard for the city of Ulaanbaatar. *EGU General Assembly*. Vienna, Austria.
- Girard, J. F. (2002). *Imagerie гйoradar et modйlisation des diffractions multiples*. Strasbourg: Universitй Louis Pasteur.
- Hanks, T. C., & Kanamori, H. (1979). A moment magnitude scale. *Journal Geophysical Research*, 84: 2348-2350.
- Heincke, B., Green, A. G., van der Kruk, J., & Horstmeyer, H. (2005). Acquisition and processing strategies for 3D georadar surveying a region characterized by rugged topography. *Geophysics*, 70: K53-K61.
- Jean-Remi, D. (2014). *Imagerie гйoradar (GPR) en milieu hйtйrogйne Application aux failles actives en Mongolie et aux дйрфts pyroclastiques du Tungurahua (Equateur)*. Strasbourg, France: IPGS,

- UMR7516, University of Strasbourg.
- Jol, H. M. (1995). Ground-penetrating radar antennae frequencies and transmitter powers compared for penetration depth, resolution and reflection continuity. *Geophysical Prospecting*, 43: 693-709.
- Jol, H. M. (2009). *Ground Penetrating Radar Theory and Applications*. Elsevier.
- Judith, M. (2013). *Analyse géomorphologique (GPS) et GPR pour l'étude des failles actives en Mongolie*. Strasbourg, France: IPGS, EOST, University of Strasbourg.
- Kanamori, H. (1977). The energy release in great earthquakes. *Journal Geophysical Research*, 82: 2981-2987.
- Lehmann, F., & Green, A. G. (2000). Topographic migration of georadar data: implications for acquisition and processing. *Geophysics*, 65(3): 836-848.
- McClymont, A. F., Green, A. G., Kaiser, A., Horstmeyer, H., & Langridge, R. M. (2010). Shallow fault segmentation of the Alpine fault zone, New Zealand, revealed from 2- and 3-D GPR surveying. *Journal Applied Geophysics*, 70(4): 343-354.
- McClymont, F. A., Green, G. A., Streich, R., Horstmeyer, H., Tronicke, J., Nobes, C. D., . . . Langridge, R. (2008). Visualization of active faults using geometric attributes of 3D GPR data: An example from the Alpine Fault Zone, New Zealand. *GEOPHYSICS*, 73(2): 1MA-Z29.
- Munkhsaikhan, A. (2016). *Seismic activity near Ulaanbaatar: Implication for seismic hazard assessment*. Strasbourg: IPGS, UMR-716, Doctoral School of Earth and Environmental Sciences - ED 413.
- Дугармаа, Т., Antoine, S., Баясгалан, А., Өлзийбат, М., Одонбаатар, Ч., Анхцэцэг, Д., . . . Баярсайхан, Ч. (2006). *Монгол улсын нийслэл Улаанбаатар хотын газар хөдлөлийн аюулын үнэлгээ. Газар хөдлөлийн бичил мужлалын зураг*. Улаанбаатар хот: Одон Орон Геофизикийн Судалгааны Төв.
- Нямбаяр, Ц., Maksim, B., Antoine, S., Өлзийбат, М., & Цээдулам, Х. (2018). Идэвхитэй хагарлын төрлийг Георадарын (GPR)-ийн тандан судалгаагаар тодорхойлсон ажлын үр дүн. *Геофизик ба Одон орон судлал*, 5: 65.