

AL31, DM31 болон ER31 Станцуудын Доорх

Царцдас Мандлын Тогтцын Судалгаа

Ц.Баасанбат

ШУА, Одон Орон, Геофизикийн Хүрээлэнгийн Газар хөдлөл судлах сектор

AL31, DM31 ба ER31 өргөн зурвасын станцуудын доорх царцдас болон дээд цаваг мандлын сейсмик хурдны тогтцыг хүлээн авагчийн функцийн аргаар судлав. Станц тус бүрд бүртгэгдсэн 400-аад холын газар хөдлөлтийн долгионыг ашиглан хүлээн авагчийн функцүүдыг тодорхойлов. Дундаж хүлээн авагчийн функцүүдийг генетик алгоритм хэрэглэн инверси хийж станц тус бүрийн доорх S-хөндлөн долгионы нэг хэмжээст хурдны тогтцыг гарган авав. Судалгааны үр дүнд эдгээр станцуудын доорх царцдас мандлын зузааныг 53.6 км, 35.7 км ба 39.3 км гэж тогтоов. Эдгээр царцдас мандлын зузааны ялгаа нь изостатик тэнцлийн хуулиар тайлбарлагдаж болно. Сейсмик хурдны тогтцод хурдны бага үе ажиглагдаагүй.

PACS number: 91.35.Gf

I. СУДАЛГААНЫ ҮНДЭСЛЭЛ

Одон Орон, Геофизикийн Судалгааны Төв нь Монгол оронд сейсмологийн судалгаа хийдэг цорын ганц байгууллага юм. Сүүлийн жилүүдэд тус төвийн гадаад хамтын ажиллагаа нь судалгаа шинжилгээ болон техникийн түвшинд өргөжин хөгжиж байна. Тус төв болон АНУ-ын Агаарын Хүчний Техник Хэрэглээний Төв (AFTAC)-ийн хамтын ажиллагааны хүрээнд Монгол орны баруун болон зүүн бүс нутагт орчин үеийн тоон бичлэгтэй өндөр мэдрэмж бүхий газар хөдлөлт бүртгэх ALMAR, DOMAR болон ERMAR сүлжээ станцууд байгуулагдаж өнөөг хүртэл тасралтгүй ажиллаж байна.

Сүлжээ станц бүр 10 газар хөдлөлт бүртгэх станцуудаас бүрдэх бөгөөд тэдгээрийн нэг нь өргөн зурвасын төрлийн станц юм. Тус станцуудын ажиллах хугацаанд цугларсан өндөр чанар бүхий газар хөдлөлтийн мэдээлэл нь төрөл бүрийн сейсмологийн судалгаа хийх боломжийг олгож байна. Энэхүү судалгааны ажлын зорилго нь тус сүлжээ станц бүрийн гурван байгуулагч бүхий өргөн зурвасын AL31, DM31 болон ER31 станцуудад бүртгэгдсэн холын газар хөдлөлтийн мэдээллээр станц бүрийн доорх царцдас мандал болон дээд цаваг мандлын сейсмик хурдны тогтцыг хүлээн авагчийн функцийн аргаар судлах явдал юм.

II. СУДАЛГААНД АШИГЛАСАН МЭДЭЭЛЭЛ

Хүлээн авагчийн функцийн судалгаанд гурван байгуулагч бүхий холын газар хөдлөлтийн сейсмограммыг ашигладаг. Энэхүү

судалгаанд 2009-өөс 2014 онуудад AL31, DM31 болон ER31 станцуудад бүртгэгдсэн холын газар хөдлөлтийн мэдээллийг ашигласан болно. Хүлээн авагчийн функцийн судалгаанд хэрэглэгдэх мэдээллийг дараах шалгууруудыг ашиглан урьдчилан сонгосон болно.

(i) Холын газар хөдлөлтийн эпицентрийн зай нь $30^\circ < \Delta < 90^\circ$ хооронд байх. (Зураг 1)

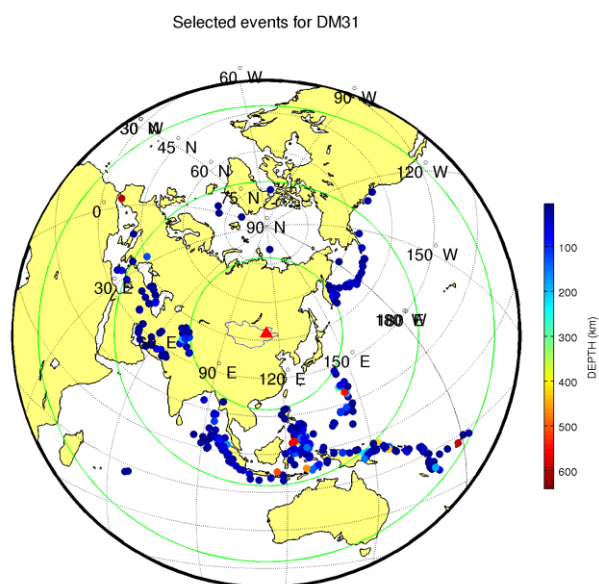
(ii) Газар хөдлөлтийн магнитуд нь 5.5 болон түүнээс дээш байх.

(iii) Газар хөдлөлтийн сигналын шуугианы түвшин бага байх.

Хүснэгт 1. Судалгаанд ашигласан өргөн зурвасын станцуудын байрлал

Стан- цын нэр	ϕ ($^\circ$)	λ ($^\circ$)	Өндөр -шил (м)	Газар хөдлөл -тийн тоо
AL31	46.58	96.41	1862	420
DM31	47.69	113.06	1000	408
ER31	44.06	110.87	1202	379

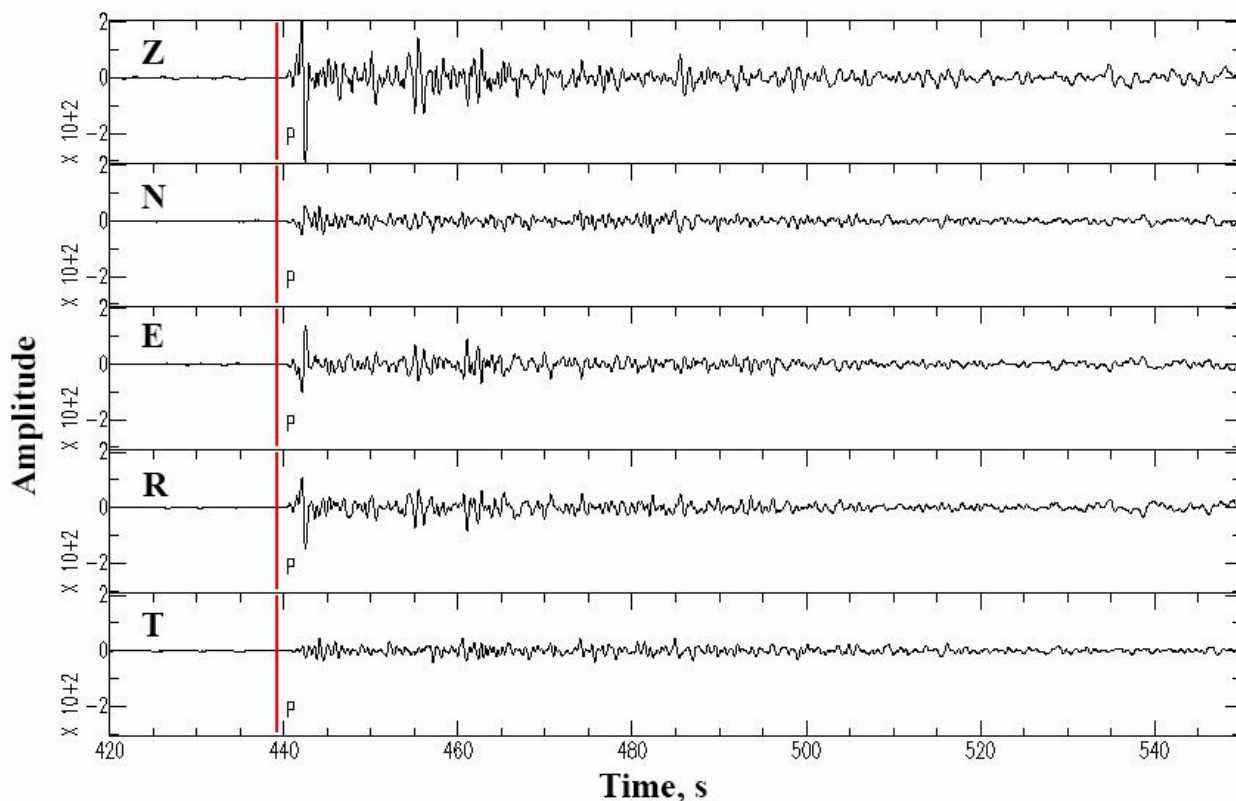
Судалгаанд урьдчилан сонгогдсон газар хөдлөлтүүдийн долгионыг, P фазаас урагшаа 180 сек, хойшоо 180 сек, нийт 360 сек байхаар олон улсын газар хөдлөлтийн 2009-2014 оны каталогийг ашиглан таслав. Долгионы анализ хийхэд шаардлагатай тухайн газар хөдлөлтийн цаг хугацаа, орон зайны мэдээллийг сейсмологийн TauP [3] болон SAC [4] програмуудыг ашиглан таслагдсан долгион бүрийн мэдээлэл болгон оруулав.



Зураг 1. DM31 станцын хувьд сонгогдсон холын газар хөдлөлтүүдийн тархалт. Улаан гурвалжингаар газар хөдлөлт бүртгэх DM31 станцыг, хөхөөс улаан руу шилжсэн өнгөтэй цэгүүдээр холын газар хөдлөлтийн эпицентрүүдийг, ногоон тойргуудаар 30, 60 болон 90 градусын зайг үзүүлэв.

Мөн түүнчлэн хүлээн авагчийн функцийн долгионы анализ хийхэд шаардлагагүй урт үетэй болон өндөр давтамжтай долгионуудыг таслагдсан долгионуудаас 0.05-5.0 Гц филтер ашиглан авч хаялаа.

Хүлээн авагчийн функцийн анализыг хийхийн тулд Z, N, E (босоо, хойд-урд ба баруун-зүүн) гурван байгуулагч бүхий сейсмограммыг Z, R, T (босоо, радиал ба тангенциал) тооллын систем рүү эргүүлдэг (Зураг 2). Газар хөдлөлтийн эпицентр ба газар хөдлөлт бүртгэх станц хоёрыг дэлхийн бөмбөрцгийн дагуу холбосон шулуунтай зэрэгцээ орших байгуулагчийг радиал гэх ба перпендикуляр орших байгуулагчийг тангенциал байгуулагч гэнэ. Энэ дагуу сонгож авсан газар хөдлөлтүүдийн таслагдсан сейсмограммуудыг Z, R, T тооллын систем рүү эргүүлэв. Энэ процессын дараа сонгогдсон холын газар хөдлөлтүүдийн сейсмограммуудыг хүлээн авагчийн функцийн анализад хэрэглэхэд бэлэн болох юм.



Зураг 2. Холын газар хөдлөлтийн долгионыг хүлээн авагчийн функцийн анализад бэлтгэх жишээ. Зурагт DM31 станцад бичигдсэн, 2012 оны 12 сарын 15-ны 04:49:29 цагт Аляскийн Алеутын арлын орчим болсон магнитуд нь 5.7-той газар хөдлөлтийн гурван байгуулагч бүхий сейсмограммыг үзүүлэв. Энэ газар хөдлөлтийн азимут нь 59.7 градус, зай нь 38.4 градус. Зургийн эхний гурван Z, N, E сигнал нь сейсмометрийн босоо, хойд-урд, баруун-зүүн байгуулагчдад бичигдсэн сейсмограмм, R ба T сигнал нь сейсмограммыг эргүүлсний дараах радиал ба тангенциал сейсмограммууд юм. Улаан зураасаар холын газар хөдлөлтийн P фазыг тэмдэглэв.

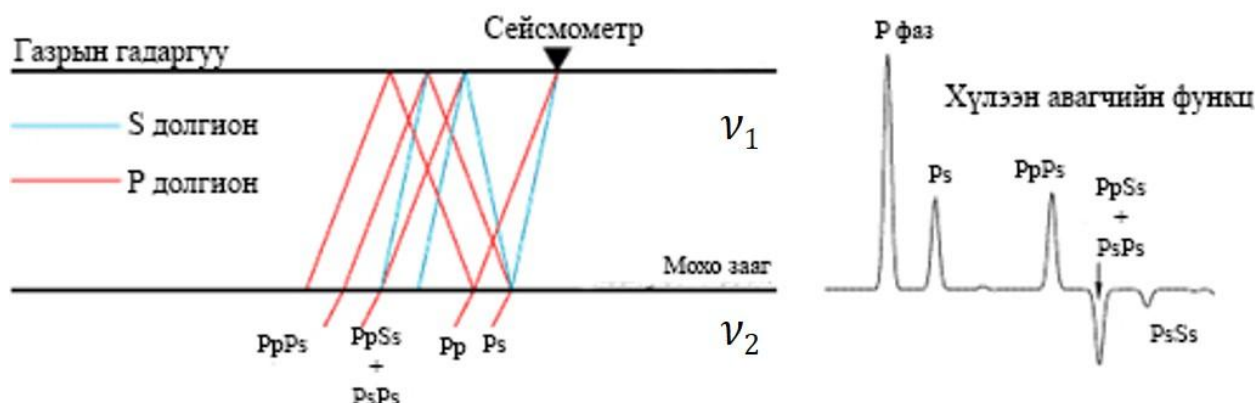
III. СУДАЛГААНЫ АРГА ЗҮЙ

Зөвхөн газар хөдлөлтийн долгион нь дэлхийгээр, дэлхийн гүнээр тархах чадвартай бөгөөд сейсмик долгионы энэхүү онцлог шинж чанарыг нь ашиглан дэлхийн гүний тогтцыг сейсмик томограф, гадаргуугийн долгионы дисперсийн анализ, сейсмик долгионы замхрал гэх мэт сейсмологийн аргуудыг хэрэглэн судалдаг.

Холын газар хөдлөлтийн хүлээн авагчийн функцийн арга нь дэлхийн царцдас мандлын сейсмик хурдны тогтцыг судлах үндсэн аргуудын нэг юм [6, 7, 1]. Хүлээн авагчийн функц гэдэг нь өргөн гурван байгуулагч бүхий сейсмограммаас гаргаж авсан хугацаат цуваа бөгөөд холын газар хөдлөлтийн Р долгионд хүлээн авагч буюу тухайн газар хөдлөлт бүртгэх станцын доорх дэлхийн царцдас мандлын үзүүлэх үйлчлэлийг илэрхийлнэ. Хүлээн авагчийн функц нь хурдны ялгаатай үеүүдэд их өөрчлөмтгий учраас дэлхийн дотоод гүний бүтэц, ялангуяа царцдас мандлын зузааныг тодорхойлох судалгаанд түлхүү ашиглагддаг. Иймд AL31,

DM31 ба ER31 станцуудын доорх царцдас мандлын судалгаанд хүлээн авагчийн функцийн аргыг хэрэглэхээр сонгосон болно.

Дэлхийн дотоод гүний бүтэц нь нэгэн төрлийн бус, ялангуяа царцдас мандал болон дээд цаваг мандал нь үелсэн, анизотроп, нэгэн төрлийн бус орчин юм. Холын газар хөдлөлийн долгион дэлхийн дотоод биетээр тархахдаа энэхүү давхарлаж тавьсан мэт нэгэн төрлийн бус орчныг туулан ирж хүлээн авагч буюу сейсмометрт бичигддэг. Иймд холын газар хөдлөлтийн Р долгион нь газар хөдлөлийн үүсгүүр, газар хөдлөлийн үүсгүүрийн орчны эффект, цаваг мандал болон хүлээн авагчийн доорх царцдас мандлыг туулж ирж буй замын эффектийн бүхий л мэдээллийг өөртөө шингээсэн гэж үздэг [1]. Үүнээс гадна холын газар хөдлөлтийн долгион нь шууд ирж буй долгион, хүлээн авагчийн доорх хурдны ялгаатай үеүүдэд ойсон, хугарсан, туйлшралаа өөрчилсөн бүхий л төрлийн долгионы фазуудаас бүрддэг (Зураг 3).



Зураг 3. Нэг ба хагас үет хурдны загвараар тархаж байгаа сейсмик долгионы цацраг ба түүний хүлээн авагчийн функцийг үзүүлсэн график. Зургийн зүүн талд Р болон S фазууд, тэдгээрийн Р-S фазын хувирлуудыг үзүүлэв. Зургийн баруун талд энэ нэг хэмжээст загварын синтетик хүлээн авагчийн функцийг үзүүлэв. [1]

III.A Хүлээн авагчийн функцийг бодох

Дэлхийн гүнээр тархан, хүлээн авагч буюу сейсмометрийн доороос ирж буй сейсмик долгионд хүлээн авагчийн доорх царцдас мандлын үзүүлэх үйлчлэл, нөлөөллийг үнэлэх нь хүлээн авагчийн функцийг бодох чухал хэсэг бөгөөд энэ асуудал нь деконволюцийн бодлоготой холбогддог. Өргөн зурвасын гурван бай-гуулагч бүхий сейсмограммаас царцдас мандлын үзүүлэх үйлчлэлийн нөлөөг тооцоолох хэд хэдэн процедур, арга техникүүд байдгаас давтамжийн мужид тодорхой шалгууртайгаар

деконволюци хийх нь сейсмологийн судалгаанд түгээмэл хэрэглэгддэг [2, 6, 7, 1]. Нөгөө нэг түгээмэл арга нь хугацааны мужид хамгийн бага квадратын аргаар деконволюци хийх явдал юм.

Өргөн зурвасын, гурван байгуулагч бүхий сейсмограммыг доорх байдлаар [1] илэрхийлж болно:

$$D_{V,R,T}(t) = I(t) * S(t) * E_{V,R,T}(t) \quad (1)$$

үүнд $*$ - конволюци, $S(t)$ - үүсгүүрийн орчны эффектгүйг агуулсан газар хөдлөлийн үүсгүүрийн хугацааны функц, $I(t)$ - сейсмометрийн характеристик, $E(t)$ - станцын доорх дэлхийн гүний тогтцын (царцдас мандал) үзүүлэх үйлчлэлийг, V , R ба T индексүүд нь босоо, радиал болон тангенциал байгуулагчуудыг илэрхийлнэ.

Дэлхийн гүнээр тархан, тухайн авч үзэж буй структурын (газар хөдлөлт бүртгэх станц сууж буй) доороос ирж буй холын газар хөдлөлтийн P долгионы тусгалын өнцөг нь маш бага байдаг учраас хоёр өөр орчны зааг дахь P долгионоос хувирсан SV долгион нь голчлон радиал чиглэлийн дагуу хэлбэлздэг. Иймд босоо байгуулагчийн сейсмограммыг холын газар хөдлөлтийн шууд ирж тусаж буй P долгион гэж авч үздэг бөгөөд дэлхийн царцдас мандлын үйлчлэл $E_V(t)$ -ийг Диракийн дельта функц $\delta(t)$ -ээр ойролцоолж болно [1]. Иймд тэгшитгэл 1-ийн босоо байгуулагчийг доорх байдлаар илэрхийлж болно:

$$D_V(t) \approx I(t) * S(t) \quad (2)$$

Хэрвээ багажийн байгуулагч бүрийн характеристик өөр хоорондоо ижил бол дэлхийн царцдас мандлын радиал чиглэлийн дагуух үйлчлэлийг сейсмограммын радиал байгуулагч $D_R(t)$ -ээс босоо байгуулагч $D_V(t)$ -ийг деконволюци хийж гарган авна. Тэгшитгэл 1 болон 2 -оос деконволюцийг давтамжийн мужид доорх байдлаар тодорхойлно:

$$E_R(\omega) = \frac{D_R(\omega)}{I(\omega)S(\omega)} \approx \frac{D_R(\omega)}{D_V(\omega)} \quad (3)$$

энд ω – өнцөг давтамж. Энэ тэгшитгэл 3 нь тангенциал байгуулагчид мөн хүчин төгөлдөр үйлчилнэ. $E_R(\omega)$ болон $E_T(\omega)$ -ийг хугацааны мужид шилжүүлснээр Зураг 3-т үзүүлсэн шиг радиал болон тангенциал хүлээн авагчийн функцүүдыг гаргаж авна.

Сейсмик долгионы спектрийг нарийн зөв тодорхойлох нь хүлээн авагчийн функцийн далайцыг тодорхойлоход маш чухал үүрэгтэй юм. Долгионы спектрийг тодорхойлохын тулд тодорхой урттайгаар тасалж авсан сигналын хэсэгт Фурье хувиргалт хийдэг. Долгионы спектр анализ хийх үед гардаг спектрийн алдагдал, түүнээс үүдэх спектр дэх хоосон зай, нүхнүүдийг багасгах болон спектр хуваалтыг тогтворжуулахын тулд хүлээн авагчийн функцийн анализад [9] олон конус хэлбэрийн цонхоор авсан спектр анализын аргыг хэрэглэдэг [8]. Өөрөөр хэлбэл сигналыг хэд

хэдэн конус хэлбэрийн цонхоор хэсэгчлэн үржсэний дараа Фурье хувиргалт хийх нь спектрийн алдагдлыг бууруулж хүлээн авагчийн функцийн далайцыг зөвөөр үнэлэх ач холбогдолтой юм. Цонх тус бүрээр үржиж авсан Фурье хувиргалтын нийлбэрээр тухайн сигналын Фурье хувиргалт тодорхойлогдоно. Иймд радиал хүлээн авагчийн функцийг давтамжийн мужид дараах байдлаар илэрхийлнэ:

$$H_R(f) = \frac{\sum_{k=0}^{K-1} (\bar{Y}_Z^{(k)}(f) Y_R^{(k)}(f))}{((\sum_{k=0}^{K-1} (\bar{Y}_Z^{(k)} Y_Z^{(k)})) + S_0(f))} \quad (5)$$

энд $Y_{Z,R}^{(k)}$ –үүд нь k -дахь Слeпийн (Slepian) цонхоор үржиж авсан босоо (Z) эсвэл радиал (R) байгуулагчийн Фурье спектр, $S_0(f)$ нь газар хөдлөлтийн P долгионы фаз ирэхээс өмнөх босоо байгуулагчийн дээрх шуугианы сигналын спектр, “ - ” нь комплекс хосмогийг илэрхийлнэ.

III.Б Генетик алгоритмыг хүлээн авагчийн функцийн инверсид хэрэглэх нь.

Ажиглагдсан хүлээн авагчийн функцийг ашиглан инверси хийж сейсмик S долгионы хурдны тогтцыг гаргаж авах нь энэ судалгааны үндсэн зорилго юм. Инверсийн асуудал нь ажиглагдсан болон онолын утгын хоорондох ялгааг багасгах замаар дэлхийн царцдас мандлын загварыг олж байгаа математик загварчлал юм. Геофизикийн асуудлуудын адилаар хүлээн авагчийн функцийн инверси нь шугаман бус бодлого бөгөөд анализыг хялбаршуулж бодлогыг шугамчлах үүднээс хурдны анхны загварыг инверсид оруулдаг. Энэхүү хурдны анхны загварыг авч үзэж буй судалгааны талбайд хийгдсэн геологи болон геофизикийн судалгааны үр дүнг ашиглан зохиох боломжтой. Нөгөө талаар тухайн талбайд геологи болон геофизикийн судалгаанууд хийгдээгүй бол сейсмик хурдны дэлхийн стандарт загваруудаас (IASP91, PREM гэх мэт) хурдны анхны загварыг зохиож болно.

Аммон нарын [1] хүлээн авагчийн функцийн инверсид хийсэн тоон анализаас үзэхэд инверсийн эцсийн үр дүн болох хурдны загварууд нь хурдны анхны загвараас хамааралтай болох нь тогтоогджээ. Өөрөөр хэлбэл инверсид дэлхийн гүний тогтцод хэдий чинээ ойролцоо хурдны анхны загвар өгнө, төдий чинээ үнэнд ойр хурдны загвар инверсийн үр дүн болон гарна. Мөн түүнчлэн

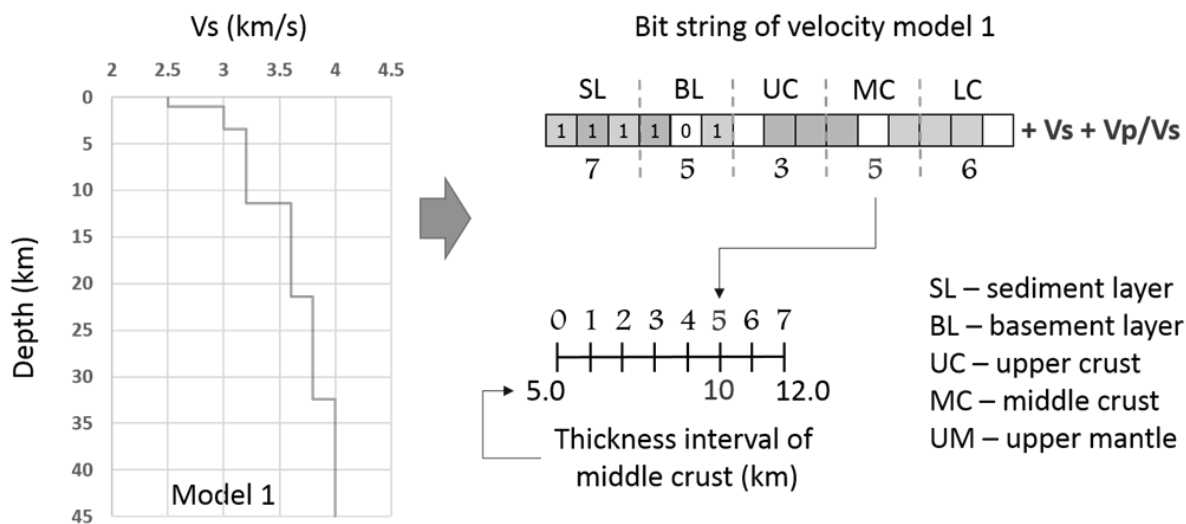
хүлээн авагчийн функцийн инверси нь хоёрдмол шинж чанартай, өөрөөр хэлбэл хурдны ялгаатай үеүүд болон тэдгээрийн дундаж хурдны хооронд харилцан хамаарал байгааг Аммон дурджээ.

Хүлээн авагчийн функцийн инверсийн энэхүү сейсмик хурдны анхны загвараас хамаардаг хамаарлыг бууруулах шинэ процедурыг Shibutani [11] нар гаргажээ. Тэд генетик алгоритмыг хүлээн авагчийн функцийн инверсид ашиглан царцдас мандал болон дээд цаваг мандал дахь сейсмик хурдны тогтцыг загварчлахад ашигласан байна. Генетик алгоритм нь Дарвины эволюцын онолд тулгуурласан шугаман бус оптимизацийн арга юм бөгөөд бид судалгаандаа энэхүү аргыг сонгож авсан болно.

Энэ аргын чухал хэсэг нь хурдны загварыг параметржүүлэх болон параметржүүлсэн хурдны загвараа хоёртын тооллын системд шилжүүлэх явдал юм (Зураг

4). Генетик алгоритм ёсоор сейсмик хурдны загварын параметрууд нь: эхний 1 ба 2 дугаар үеийн зузаан, нягт, үе болгоны S долгионы хурдны утгууд, P болон S долгионы хурдны харьцаа V_p/V_s ; дээд, дунд, доод царцдас мандал дахь S долгионы хурд V_s ; дээд цаваг мандал дахь S долгионы хурд V_s болно.

Энэхүү судалгаанд хурдны анхны загварыг генетик алгоритмд оруулахаар Хүснэгт 2-т үзүүлснээр зохиосон бөгөөд загварын параметрийн тоо нь $2^{52} - 4.5 \times 10^{15}$ болно. Хурдны загварт, загварын үе бүрийн зузааны дээд доод хязгаарууд болон S долгионы хурдыг, мөн параметр бүрийн бит n -ийн уртыг тодорхойлов. Царцдас мандал болон дээд цаваг мандал дахь хурдны V_p/V_s харьцааг 1.73 гэж тогтмол авсан бөгөөд үеүүдийн нягт (ρ)-ийг $\rho = 2.35 + 0.036(V_p - 3.0)^2$ гэсэн эмпирик томъёо [5] ашиглан тодорхойлов.



Зураг 4. Хурдны загварыг хоёртын тоолол руу хөрвүүлж буй жишээ

Хүснэгт 2. Генетик алгоритмын инверсид оруулж буй хурдны загварын параметрууд

	Үеийн зузаан			Vs (км/сек)			Vp/Vs харьцаа		
	доод хяз.	дээд хяз.	n	доод хяз.	дээд хяз.	n	доод хяз.	дээд хяз.	n
Тунамал хөрс	0.0	1.0	3	1.0	2.5	4	1.80	2.50	3
Суурь чулуулаг	1.0	3.0	3	2.5	3.2	3	1.60	2.30	3
Дээд царцдас мандал	5.0	12.0	3	3.0	3.7	3	1.73	1.73	0
	5.0	12.0	3	3.0	3.7	3	1.73	1.73	0
Дунд царцдас мандал	5.0	12.0	3	3.3	4.0	3	1.73	1.73	0
	5.0	12.0	3	3.3	4.0	3	1.73	1.73	0
Доод царцдас мандал	5.0	12.0	3	3.6	4.3	3	1.73	1.73	0
Дээд цаваг мандал	хагас үе		0	3.9	4.6	3	1.73	1.73	0

Генетик алгоритмын инверсийн үед эхний удаад дээр тодорхойлсон параметруудээс тогтсон хэдэн зуун хурдны загварууд, өөрөөр хэлбэл Q гэсэн хурдны загварын анхны популяци санамсаргүйгээр үүсэх юм. Энэ судалгаанд анхны популяцийн тоог 1000 гэж авсан болно. Хоёрдугаарт, Q популяци дахь хурдны загваруудыг ашиглан синтетик радиал хүлээн авагчийн функцүүд бодогдон гарна. Үүний хамт хурдны загвар бүрийн хувьд ажиглагдсан болон синтетик хүлээн авагчийн функцүүдийн алдаа ялгаа нь $L2$ норчмлол буюу тэдгээрийн ялгааны квадратаар бодогдон гардаг. Гуравдугаарт, дараа дараачийн популяцийг үүсгэх сонгон шалгаруулалт, эрлийзжүүлэлт, мутаци гэсэн процессууд явагдана [10]. Эдгээр гурван процессыг доор тоймлов.

(i) *Сонгон шалгаруулалт.* Энэ шатны гол зорилго нь одоогийн байгаа популяцаас завсрын үеийн Q гэсэн хурдны загварын популяцийг үүсгэх явдал юм. Уралдаант шалгаруулалт буюу одоогийн байгаа популяцаас санамсаргүйгээр сонгогдсон хоёр хурдны загварын аль бага алдаатайг нь харьцуулах замаар завсрын популяцид орох хурдны загваруудыг сонгоно. Энэ шатанд P_s гэсэн сонгон шалгаруулалтын магадлалтайгаар алдаа багатай хурдны загварууд завсрын популяцид сонгогдох бөгөөд энэ процесс завсрын популяци Q бүрдтэл давтагдана. Энэ судалгаанд уралдаант шалгаруулалтын магадлал P_s –ийг 0.75 гэж авсан бөгөөд нийт итерацийн тоог 200-аар тогтсон болно.

(ii) *Эрлийзжүүлэлт.* Энэ шатанд одоогийн популяцид байгаа бодгалиудаас хос үүсгэх, тэдгээрийн бит хромсом буюу хурдны загварын мэдээллийг зарим хэсгийг хооронд нь солих замаар дараа дараачийн үр төлүүдийг үүсгэх юм. Эхлээд одоогийн популяцаас эцэг эх болох хурдны хоёр загвар санамсаргүйгээр сонгогдоно. Дараа нь тэдгээрийн бит буюу хромсомуудын хэсгүүд нь P_s гэсэн эрлийзжүүлэлтийн магадлалтайгаар өөр хоорондоо солигдоно. Нөгөө талаар $1-P_s$ гэсэн магадлалтайгаар зарим сонгогдсон хосууд дараагийн популяцид шууд ордог. Энэ эрлийзжүүлэх процесс мөн Q популяци бүрдтэл үргэлжилнэ. Бидний тохиолдолд эрлийзжүүлэх магадлал P_s –ийг 0.85 гэж авсан болно.

(iii) *Мутаци.* Уралдаант сонгон шалгаруулалт болон эрлийзжүүлэлтийн дараа зарим хурдны загварууд Q популяцид шууд хуулагдсан байх ба зарим нь эрлийзжүүлэлтээр өөрчлөгдсөн байна. Энэ шатны гол зорилго нь

зарим бодгалиудад хэлбэр дүрсээ өөрчлөх боломжийг маш бага магадлалтайгаар өгдөг болно. Мутацид орох магадлалыг маш багаар тогтоох бөгөөд ихэвчлэн $P_M \leq 1/2\ell$ [10] байдлаар тогтоодог. Энд ℓ нь хурдны загварын бит буюу хромсомын урт юм. Санамсаргүйгээр сонгогдсон хурдны загварын нэг бит нь мутацид орох P_M магадлалтайгаар өөрчлөгдөх юм. Энэ процесс мөн Q популяци бүрдтэл явагдах юм. Энэ судалгаанд мутацид орох магадлал P_M –ийг 0.01 гэж сонгов.

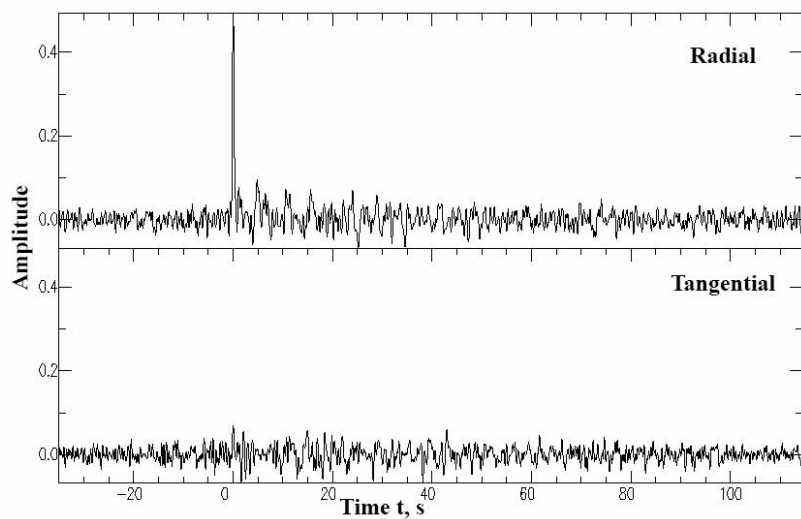
IV. СУДАЛГААНЫ ҮР ДҮН

IV.A Ажиглагдсан хүлээн авагчийн функцүүд

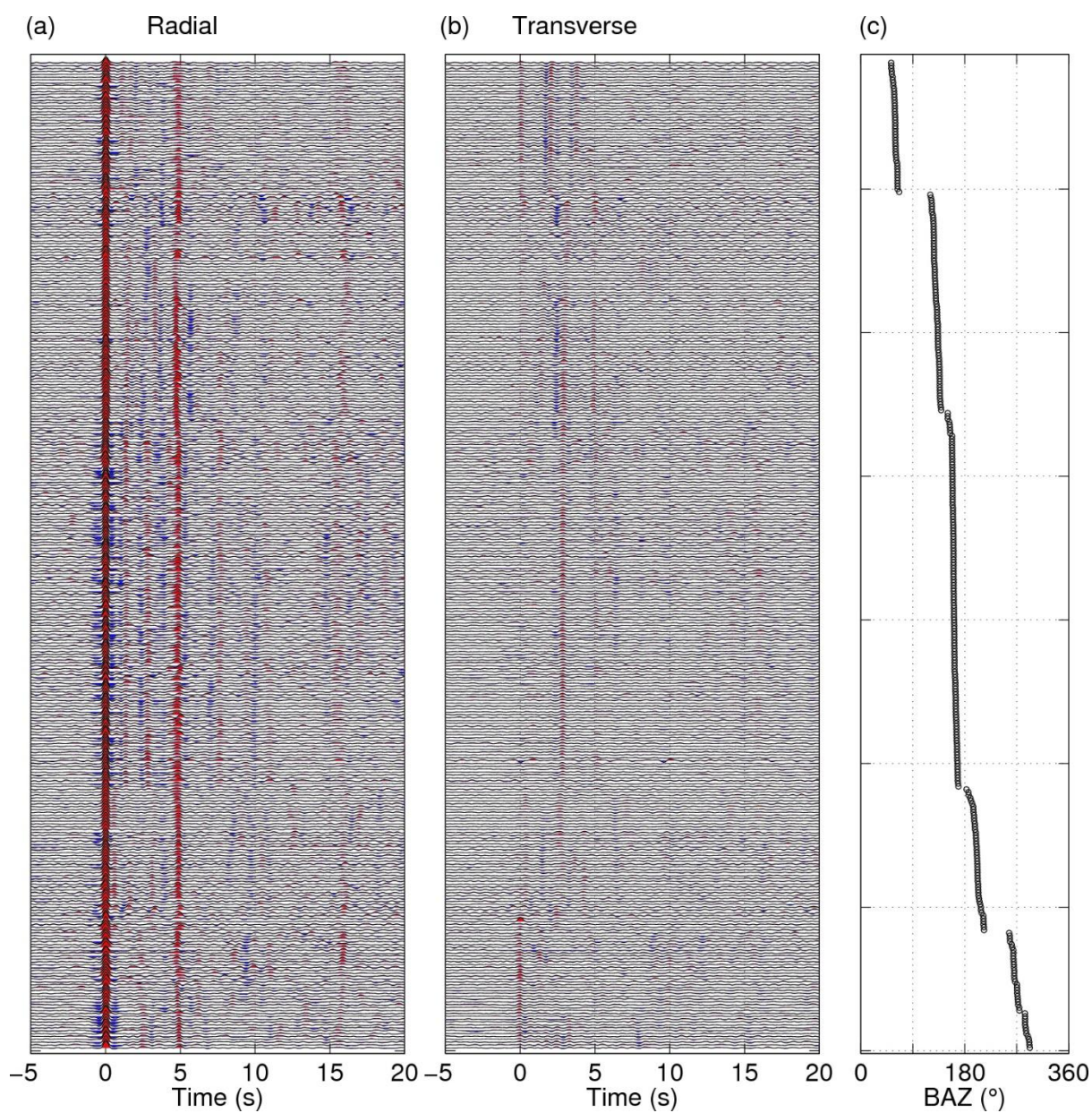
AL31, DM31 болон ER31 станцуудад бүртгэгдсэн холын газар хөдлөлтүүдийн сейсмограммыг ашиглан радиал байгуулагчаас босоо байгуулагчийг деконволюци хийх замаар радиал хүлээн авагчийн функцүүдийг станц тус бүрээр бодон гаргав.

Холын газар хөдлөлтүүдийн сейсмограммыг хүлээн авагчийн функцийн анализад бэлтгэсний дараа сайжруулсан, спектр анализ хийх цонхыг сунгасан, олон конус хэлбэрийн цонхоор авсан спектр анализын аргыг [12] хүлээн авагчийн функцүүдийг бодоход ашиглав. Жишээ болгож DM31 станцын хувьд бодогдсон хүлээн авагчийн функцүүдийг Зураг 5 болон 6-д үзүүлэв. Бусад 2 станцын хүлээн авагчийн функцүүдийг Хавсралт А-д үзүүлэв. Зураг 5-аас үзэхэд, холын газар хөдлөлтийн долгионы шууд ирж буй P фаз болон түүний Мохо заагт хугарч үүссэн $P-S$ фаз радиал хүлээн авагчийн функцийн хугацааны тэнхлэгийн 0 болон ~5 сек орчимд тодорхой харагдаж байна. Мөн тангенциал хүлээн авагчийн функцийн далайц нь радиал байгуулагчийн шуугианы түвшинтэй ойролцоо байна.

Зураг 6-д DM31 станцын радиал болон тангенциал хүлээн авагчийн функцүүдийг азимутийн дарааллаар зурж үзүүлэв. Эндээс үзэхэд P долгионы Мохо заагт хугарч үүссэн долгионы $P-S$ фаз нь тангенциал байгуулагчаас илүү радиал байгуулагч дээр 5 сек-ийн орчим илүү тод ажиглагдаж байна. Тангенциал хүлээн авагчийн функцийн далайц буюу энергийн хэмжээ харьцангуй бага байгаа учраас царцдас мандлын тогтцыг хэвтээ чиглэлд үелж тогтсон гэж авч үзээд радиал хүлээн авагчийн функцүүдийг инверсид оруулав.



Зураг 5. Зураг 2-т үзүүлсэн холын газар хөдлөлтийн радиал болон тангенциал хүлээн авагчийн функцүүд



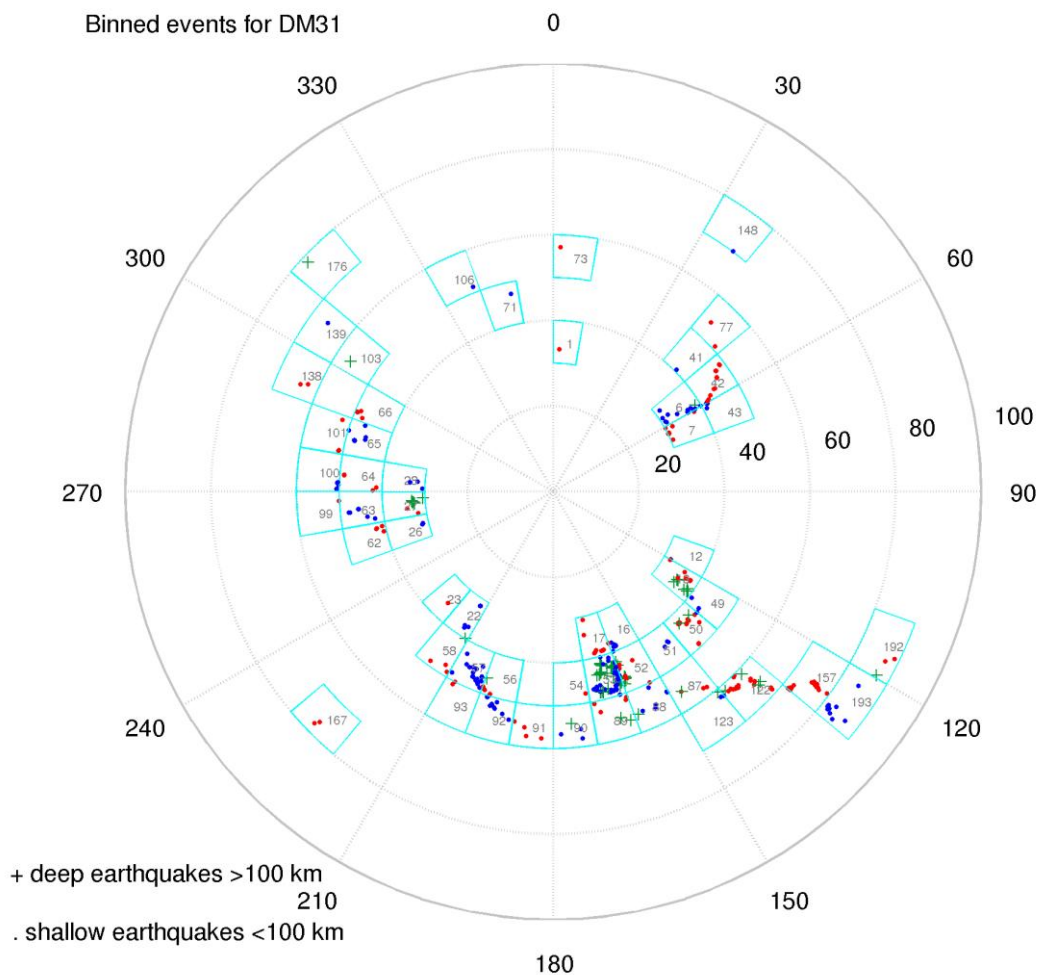
Зураг 6. DM31 станцад ажиглагдсан радиал (a) болон тангенциал (b) хүлээн авагчийн функцүүд. Дугуй тойргуудаар (c) хүлээн авагчийн функц тус бүрийн азимутыг үзүүлэв.

Ажиглагдсан хүлээн авагчийн функц болгоныг инверсид оруулах боломжгүй учраас тэдгээрийг шинж чанараар нь бүлэглэн хуваах нь анализын бас нэг чухал хэсэг юм. Ямар нэгэн цэгт болж байгаа холын газар хөдлөлтүүдийн долгионууд нь голомтоос тархаж газар хөдлөлт бүртгэх станцад бүртгэгдэх хүртлээ нэг ижил төрлийн структурыг туулна. Иймд эдгээр холын газар хөдлөлтүүдийн ажиглагдсан хүлээн авагчийн функцүүд нь хэлбэр дүрс, давтамжийн бүтцийн хувьд өөр хоорондоо адилхан байдаг учраас холын газар хөдлөлтүүдийг азумит болон зайгаар нь бүлэглэн хуваадаг.

Энэ судалгаанд авсан холын газар хөдлөлтүүдийн тархалт нь нэгэн жигд биш, азимутын хүрээ нь хангалттай биш байсан болно. Сонгож авсан станцуудын хувьд холын газар хөдлөлтийн сигналуудын ихэнх нь зүүн хойд, зүүн болон зүүн өмнөд зүгээс ирсэн байна. Бусад азимутаас ирж буй газар хөдлөлтүүдийн тоо цөөхөн бөгөөд тархалт нь маш сийрэг байна. Иймд жигд бус тархалтыг нь харгалзан үзэж сонгосон газар хөдлөлтүүдийг

туйлын координатын системд $10^\circ \times 10^\circ$ хэмжээтэй үүрүүдэд хуваасан болно (Зураг 7). Хуваалтын эхлэлийн азимут нь 0° бөгөөд эхлэлийн зай нь 30° болно. Мөн түүнчлэн сонгосон холын газар хөдлөлтүүдийг тэдгээрийн голомтын гүнээр нь 100 км хүртэл ба 100 км-ээс дээш гэж ангилав.

Ийнхүү холын газар хөдлөлтүүдийг азимут, зай болон гүнээр нь бүлэглэн хуваасны дараа үүр тус бүр дэх ажиглагдсан хүлээн авагчийн функцүүдийг хугацааны мужид нэмж дундажлан тухайн үүрийг төлөөлөх нэг хүлээн авагчийн функцүүдийг тодорхойлов. Ингэж нэмж дундажлах нь дундаж хүлээн авагчийн функцийг сигнал-шуугианы харьцааг өсгөхөд тустай юм. Тухайн нэг үүрт байгаа ажиглагдсан хүлээн авагчийн функцүүдийн азимут болон зай нь бараг ижил тул нэмж дундажлахдаа нормчлоогүй болно. Төгсгөлд нь дундаж хүлээн авагчийн функцүүдийг инверсид оруулж сейсмик S долгионы хурдны загваруудыг тооцоолов.



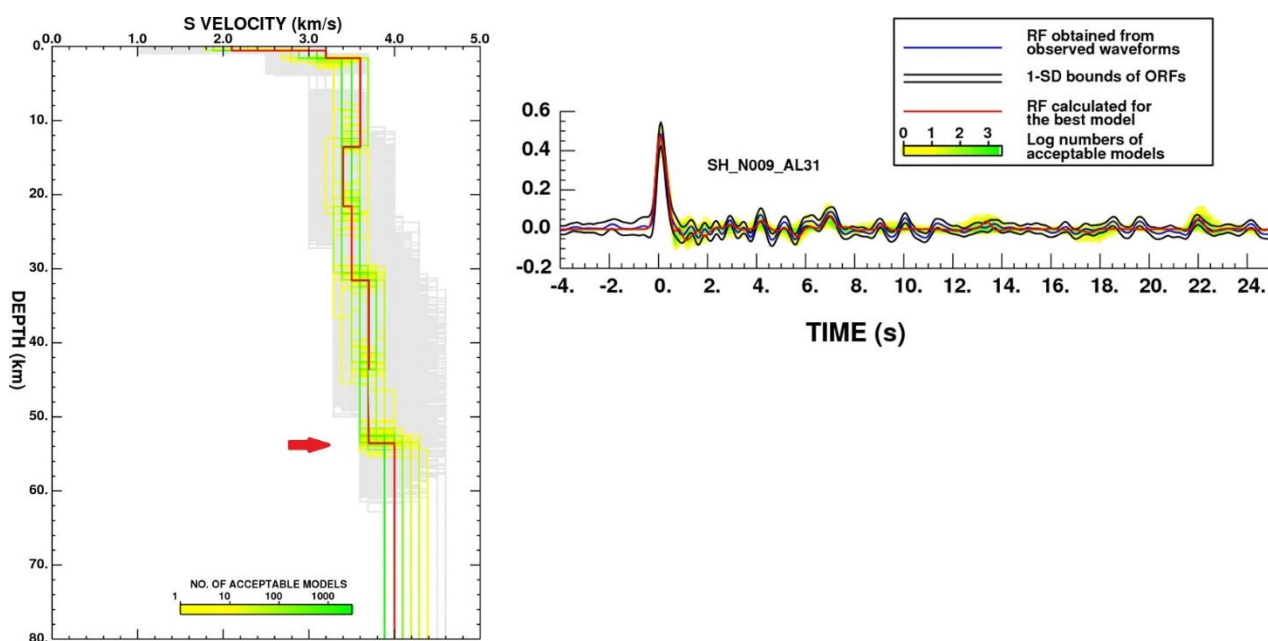
Зураг 7. DM31 станцын холын газар хөдлөлтүүдийн тархалтыг туйлын координатын систем дээр үзүүлэв. Нэг үүрийн хэмжээ нь $10^\circ \times 10^\circ$ бөгөөд үүрүүдийн дугаарыг тархалтын зурагт үзүүлэв. Улаан болон хөх цэгээр 100 км хүртэлх гүнтэй газар хөдлөлтийг, ногоон цэгээр 100 км-ээс илүү гүнтэй газар хөдлөлтийг төлөөлүүлэв.

IV.Б Генетик алгоритмын инверсийн үр дүн

AL31 станц

AL31 өргөн зурвасын станц нь Монгол орны баруун хэсэгт, Алтайн нуруунд 1861 метрийн өндөрт байрлана (Зураг 13). Тус станцын хувьд сонгогдсон 420 холын газар хөдлөлтүүдийн ажиглагдсан хүлээн авагчийн функцүүдийн графикаас (Зураг А-1) үзэхэд радиал хүлээн авагчийн функцүүд нь нэлээд төвөгтэй, хэлбэлзэл ихтэй байна. Р долгионы Мохо зааг дахь хувирал Р-S фазын далайц бага, түүнээс гадна царцдас мандалд ойсон хугарсан болон шинээр үүссэн долгионы фазууд шууд ирж буй Р долгион болон Р-S фазын хооронд, мөн Р-S фазын дараа харьцангуй өндөр далайцтай

ажиглагдаж байна. Энэхүү хүлээн авагчийн функцийн түвэгтэй байдал нь инверсийн үр дүнд муугаар нөлөөлж байна. Инверсийн үр дүнгээс үзэхэд AL31 станцын зөвхөн N009 үүрийн үр дүнд тайлал хийх бололцоотой байна. N009 үүрийн инверсийн үр дүнгээс үзэхэд царцдас мандлын зузаан буюу Мохо зааг 53.6 км-т оршиж байна (Зураг 8). Мөн түүнчлэн S долгионы хурдны тогтоц газрын гадаргуугаас доошоо аажмаар нэмэгдэж 53.6 км-ийн орчимд S долгионы хурд огцом өөрчлөгдөж дээд цаваг мандлын утга руу ойртож байна.



Зураг 8. AL31 станцын N009 үүрийн дундаж хүлээн авагчийн функцийн инверсийн үр дүн болох S долгионы хурдны тогтоц. Зургийн баруун талд ажиглагдсан болон синтетик хүлээн авагчийн функцүүдийн давхцалыг үзүүлэв. Хөх шугамаар ажиглагдсан дундаж хүлээн авагчийн функцийг, хар шугамаар дундаж хүлээн авагчаас нэг стандарт хазайлтад байгаа хүлээн авагчийн функцүүдийг, шараас ногоон руу хувирсан шугамаар нэг стандарт хазайлт дотор байгаа синтетик хүлээн авагчийн функцүүдийг, улаан шугамаар хамгийн бага алдаа бүхий сейсмик хурдны загварын синтетик хүлээн авагчийн функцийг үзүүлэв. Мохо заагийг улаан сумаар заав.

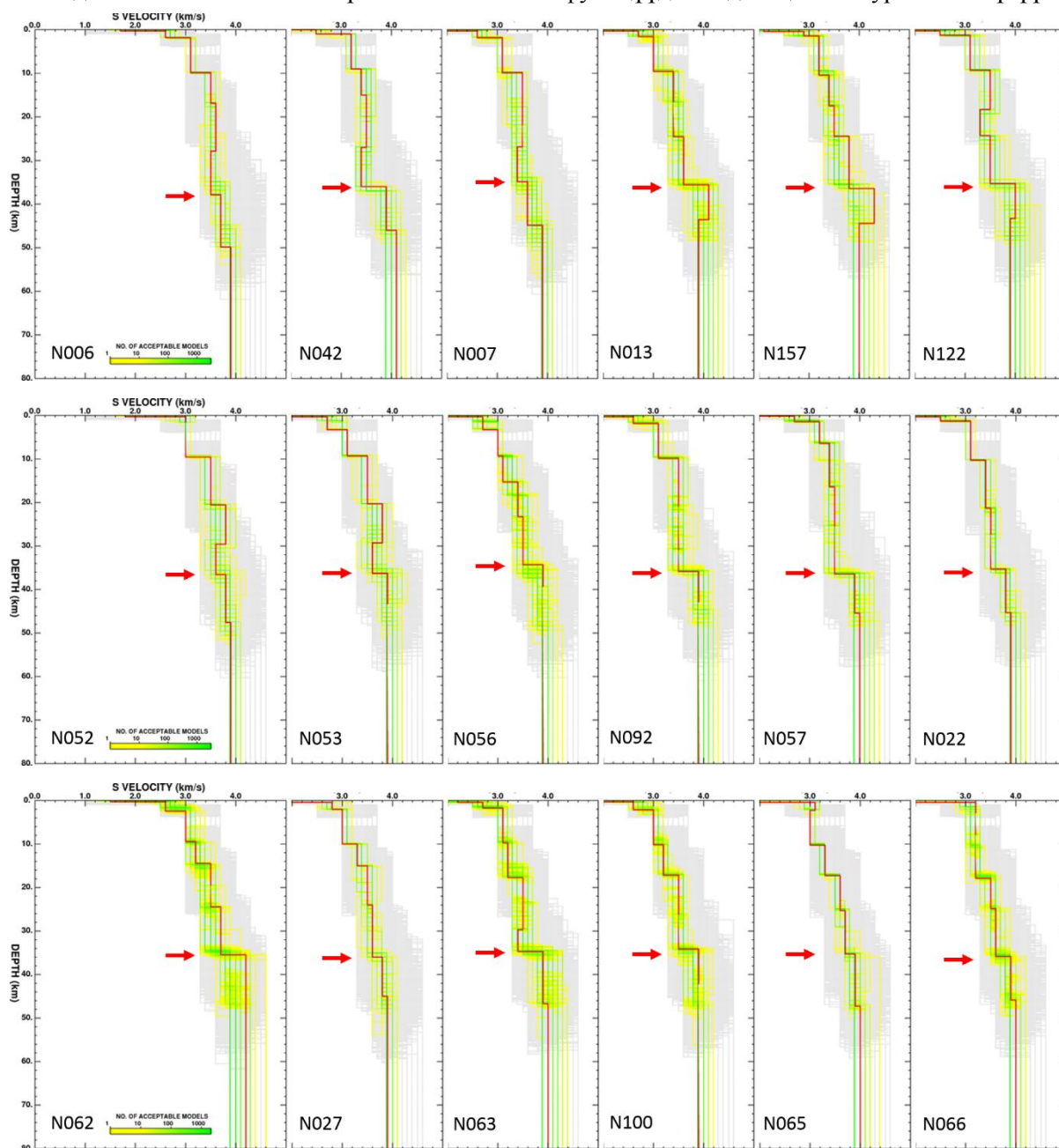
DM31 станц

DM31 станц нь Монгол орны зүүн хязгаарт нам дор газар оршино. Газрын өндөршил нь 1000 метр. Энэ станцын хувьд 408 тооны холын газар хөдлөлтүүд сонгогдсон бөгөөд тэдгээрийн ажиглагдсан радиал хүлээн авагчийн функцүүдийн графикаас (Зураг 6) үзэхэд Р долгионы Мохо зааг дээрх хувирал болох долгионы Р-S фаз бүх азимутаар тодорхой харагдаж байна. Мөн түүнчлэн царцдас мандалд ойсон хугарсан болон сүүлд шинээр

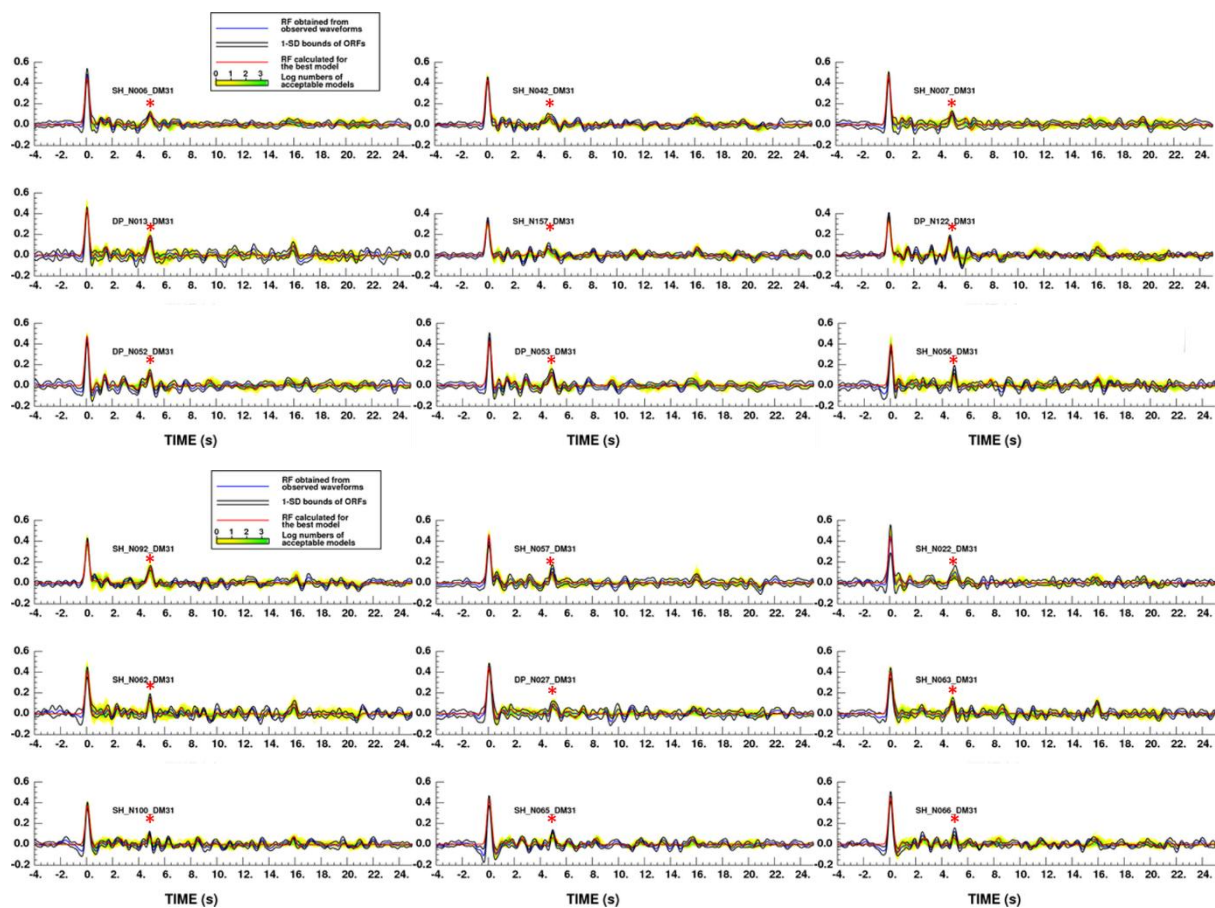
үүссэн фазууд радиал байгуулагч дээр шууд ирж буй Р болон Р-S фазуудын хооронд ажиглагдаж байна.

Инверсийн үр дүнг нарийвчлан шалгасны дараа DM31 станцын 18 тооны үүрийн инверсийн үр дүнд тайлал хийж (Зураг Б-2) Мохо заагийг 35.7 ± 0.9 км гүнд байна гэж тодорхойлов. Сонгож авсан азимутуудын сейсмик S долгионы хурд гүн лүү аажмаар өсөж байгааг Зураг 9-д,

ажиглагдсан болон синтетик хүлээн авагчийн функцүүдийн давхцалыг Зураг 10-г үзүүлээ.



Зураг 9. DM31 станцын хүлээн авагчийн функцүүдийн инверсийн үр дүн болох сейсмик S долгионы хурдны тогтцууд. N индексүүд (N052 г.м) нь Зураг Б-2 дээрх үүрийн дугаарыг илэрхийлнэ. Саарлаар будагдсан талбай нь генетик алгоритмын үед бий болсон 200,000 сейсмик хурдны загварыг илэрхийлнэ. Нэг стандарт хазайлт доторх синтетик хүлээн авагчийн функцүүдэд хамаарах хурдны загваруудыг шараас ногоон руу хувьссан өнгөөр тэмдэглэв. Хамгийн бага алдаа бүхий хурдны загварыг улаанаар үзүүлэв. Улаан сумуудаар азимут бүрийн Мохо заагийг тэмдэглэв.

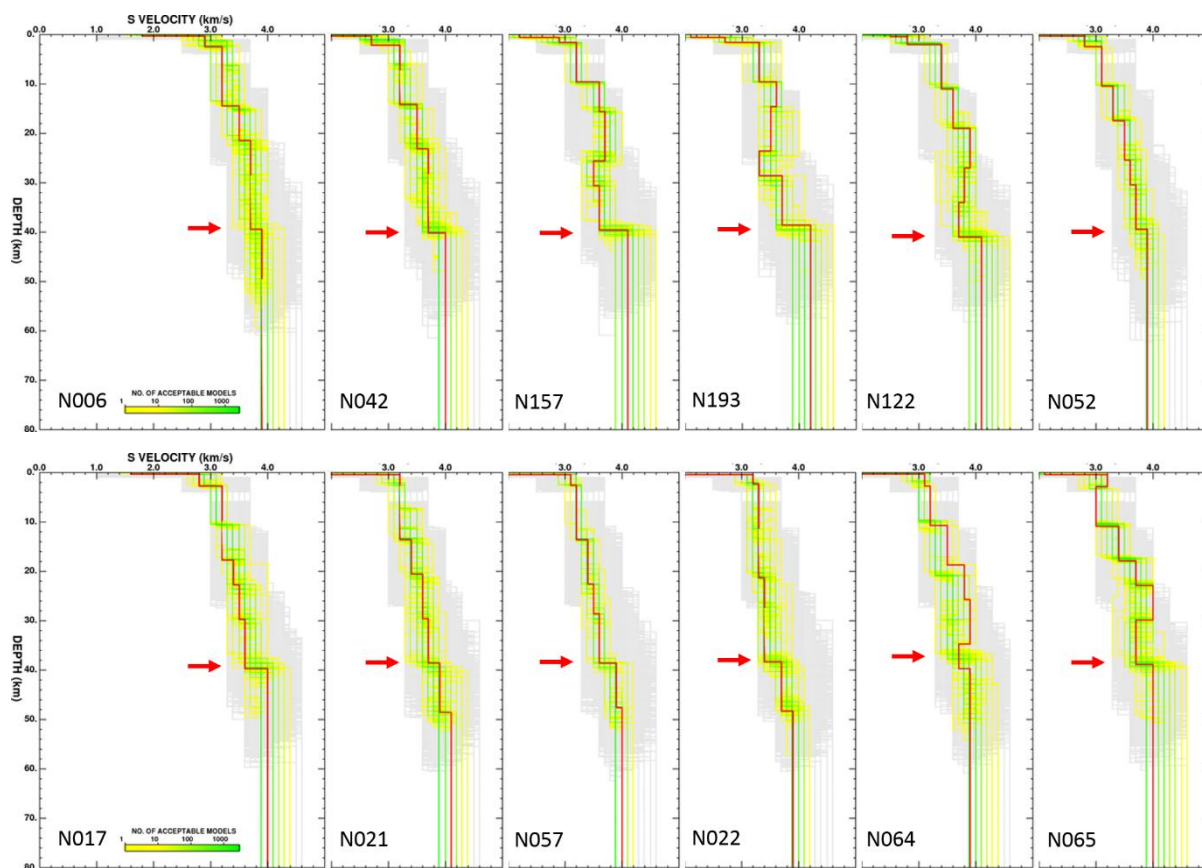


Зураг 10. DM31 станцын ажиглагдсан болон синтетик хүлээн авагчийн функцүүдийн давхцлын график. Хөх шугамаар ажиглагдсан дундаж хүлээн авагчийн функцийг, хар шугамаар дундаж хүлээн авагчаас нэг стандарт хазайлтанд байгаа хүлээн авагчийн функцүүдийг, шараас ногоон руу хувирсан шугамаар нэг стандарт хазайлт дотор байгаа синтетик хүлээн авагчийн функцүүдийг, улаан шугамаар хамгийн бага алдаа бүхий сейсмик хурдны загварын синтетик хүлээн авагчийн функцийг үзүүлэв. Улаан одоор P долгионы Мохо зааг дахь хувирал болох P-S фазыг тэмдэглэв.

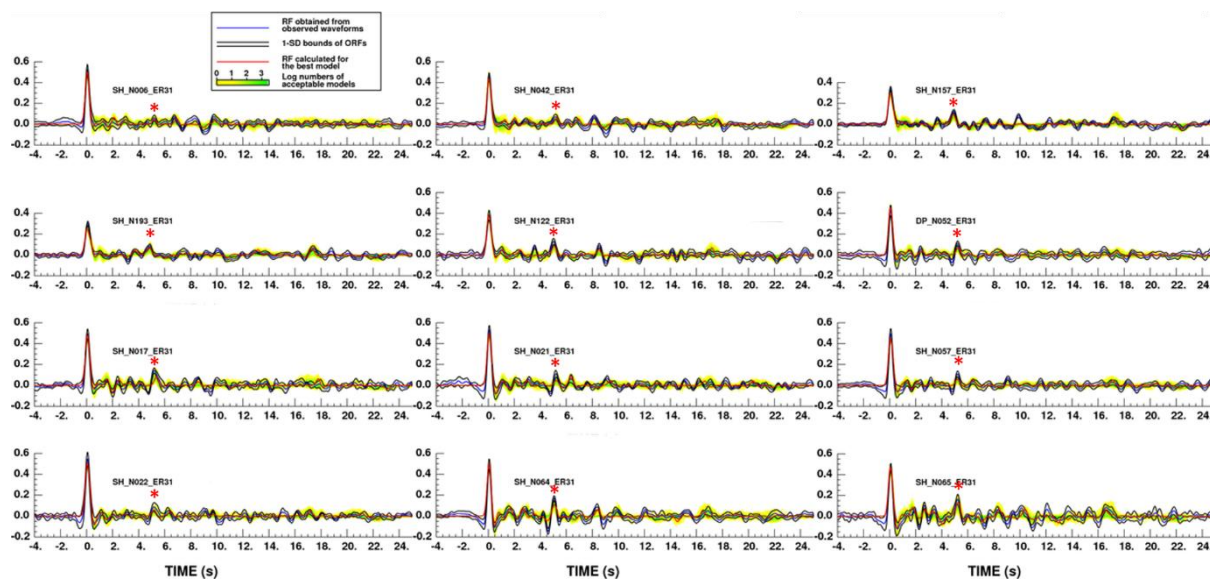
ER31 станц

ER31 өргөн зурвасын станц нь Монгол орны зүүн өмнөдөд өндөршил нь 1200 метр нам дор газар оршино. 379 ширхэг холын газар хөдлөлтийг анализ хийхээр сонгож авсан болно. Тус станцын ажиглагдсан радиал хүлээн авагчийн функцийн графикаас (Зураг А-2) үзэхэд, долгионы P-S фаз азимут бүрд тодорхой харагдаж байна. Мөн DM31 станцын адилаар царцдас мандалд ойсон хугарсан болон сүүлд шинээр үүссэн фазууд радиал байгуулагч дээр шууд ирж буй P болон P-S фазуудын хооронд ажиглагдаж байна.

Тайлалд сонгож авсан 12 үүрийн (Зураг Б-3) инверсийн үр дүнгээс үзэхэд ER31 станцын доорх Мохо заагийг 39.3 ± 0.7 км-т (Зураг 11) байна гэж тодорхойлов. Сонгож авсан азимутуудын сейсмик S долгионы хурд гүн лүү аажмаар өсөж байна (Зураг 11). Царцдас мандлын зузааны азимутаас хамаарсан өөрчлөлт ажиглагдаагүй болно. Ажиглагдсан болон синтетик хүлээн авагчийн функцүүдийн давхцалыг Зураг 12-т үзүүллээ.



Зураг 11. ER31 станцын хүлээн авагчийн функцүүдийн инверсийн үр дүн болох сейсмик S долгионы хурдны тогтцууд. N индексүүд (N017 г.м) нь Зураг Б-3 дээрх үүрийн дугаарыг илэрхийлнэ. Саарлаар будагдсан талбай нь генетик алгоритмын үед бий болсон 200,000 сейсмик хурдны загварыг илэрхийлнэ. Нэг стандарт хазайлт доторх синтетик хүлээн авагчийн функцүүдэд хамаарах хурдны загваруудыг шараас ногоон руу хувьссан өнгөөр тэмдэглэв. Хамгийн бага алдаа бүхий хурдны загварыг улаанаар үзүүлэв. Улаан сумуудаар азимут бүрийн Мохо заагийг тэмдэглэв.



Зураг 12. ER31 станцын ажиглагдсан болон синтетик хүлээн авагчийн функцүүдийн давхцалын график. Хөх шугамаар ажиглагдсан дундаж хүлээн авагчийн функцийг, хар шугамаар дундаж хүлээн авагчаас нэг стандарт хазайлтад байгаа хүлээн авагчийн функцүүдийг, шараас ногоон руу хувирсан шугамаар нэг стандарт хазайлт дотор байгаа синтетик хүлээн авагчийн функцүүдийг, улаан шугамаар хамгийн бага алдаа бүхий сейсмик хурдны загварын синтетик хүлээн авагчийн функцийг үзүүлэв. Улаан одоор P долгионы Мохо зааг дахь хувирал болох P-S фазыг тэмдэглэв.

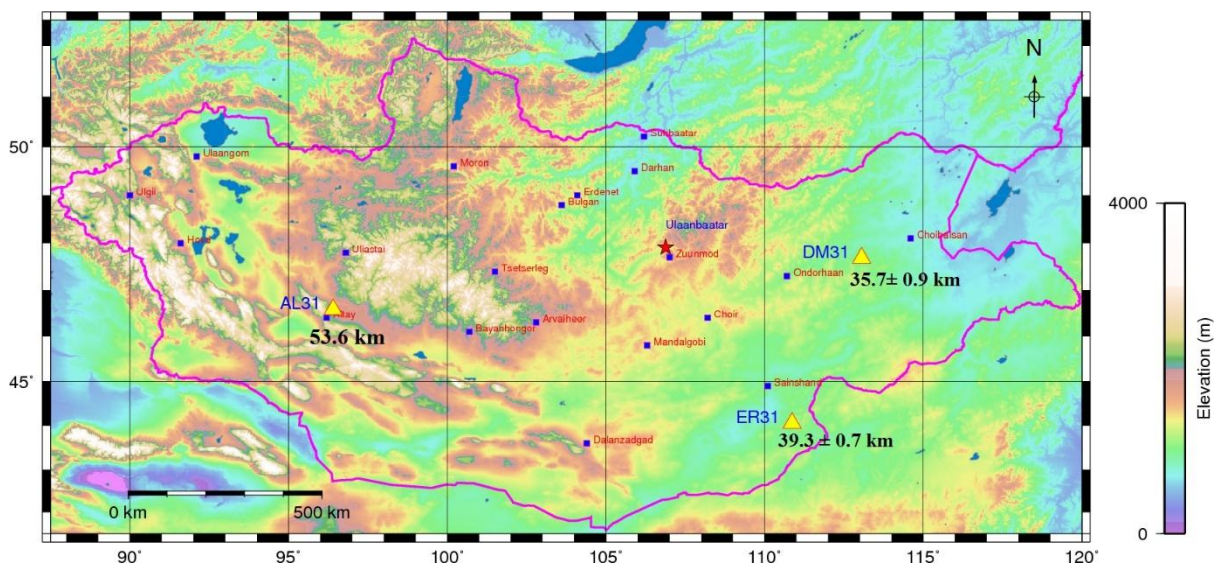
ДҮГНЭЛТ

AL31, DM31 болон ER31 өргөн зурвасын гурван байгуулагч бүхий станцуудын доорх царцдас мандлын сейсмик хурдны тогтцыг хүлээн авагчийн функцийн арга болон генетик алгоритм ашиглан судлав. AL31 станцын ажиглагдсан хүлээн авагчийн функцүүд нь (Зураг А-1) бусад хоёр станцыгаа бодвол нэлээд түвэгтэй, долгиолсон, далайц ихтэй ойсон хугарсан фазуудыг илүү агуулсан учир N009 үүрийн үр дүнгээс бусад инверсийн үр дүнгээр тус станцын доорх царцдас мандлын сейсмик хурдны тогтцыг тодорхойлох боломжгүй байв.

Инверсийн үр дүнгээс AL31, DM31 болон ER31 станцуудын доорх царцдас мандлын дундаж зузааныг 53.6 км , $35.7 \pm 0.9 \text{ км}$ болон $39.3 \pm 0.7 \text{ км}$ гэж тус бүрд нь тодорхойлов (Зураг 13). AL31 станц нь

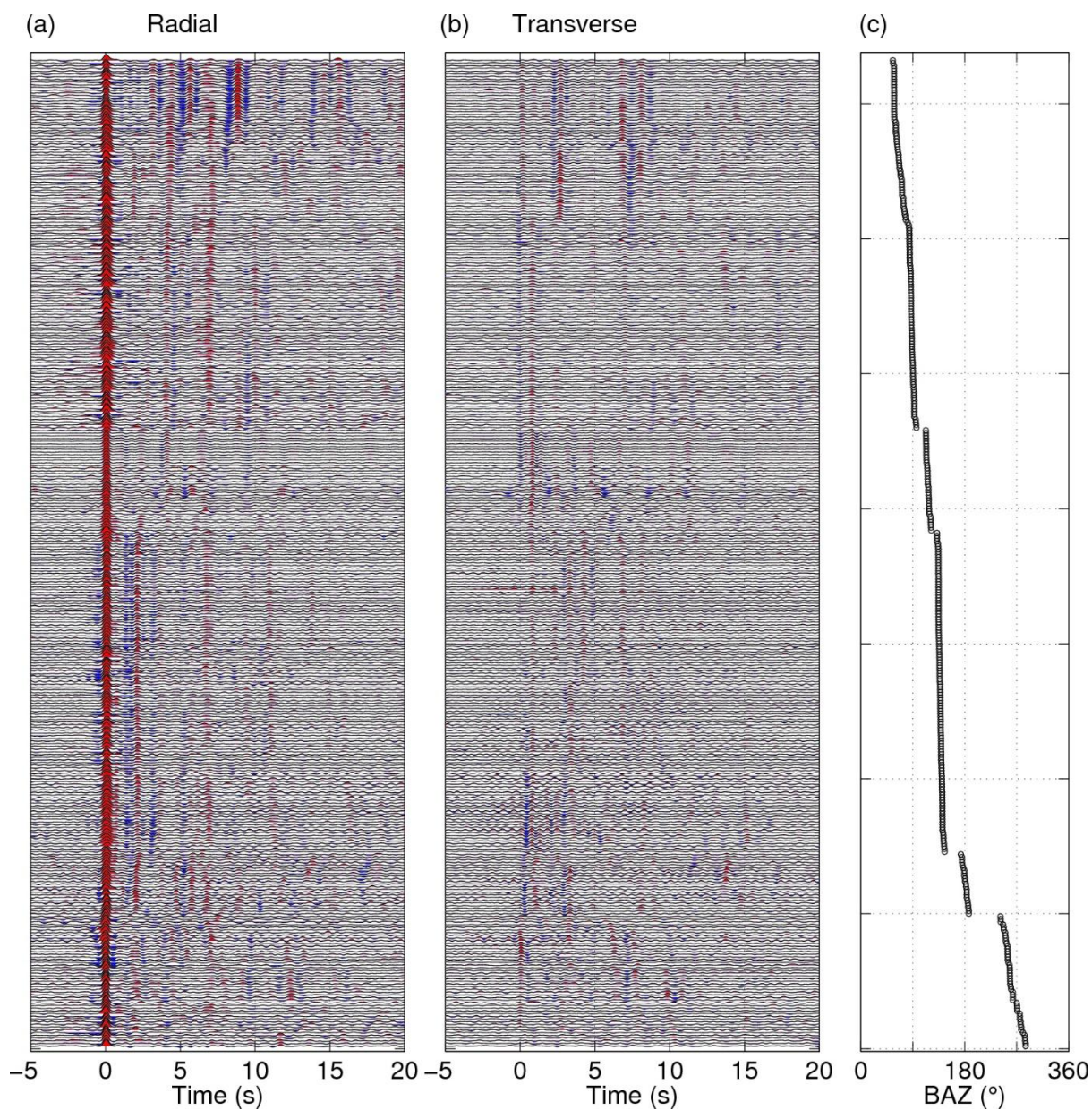
уулархаг, өндөрлөг газар байрладаг бол DM31, ER31 станцууд нь Монгол орны зүүн хэсэгт нам дор газар оршино. Иймд эдгээр станцуудын доорх царцдас мандлын зузааны ялгаа нь изостатик тэнцлийн хуулиар [13] тайлбарлагдаж болох юм. Мөн түүнчлэн станц бүрийн доорх сейсмик S долгионы хурдны тогтоц нь гүн лүүгээ аажмаар өсөж байна. Хурдны загварт хурдны бага үе ажиглагдсангүй.

Цаашид AL31 станцын доорх царцдас мандлын судалгааг өөр аргаар, тухайлбал хүлээн авагчийн функцийн H-k анализын аргаар судлах хэрэгтэй. Мөн судалгааны үр дүнг тухайн бүс нутагт хийгдсэн геологи болон геофизикийн судалгааны үр дүнтэй харьцуулан үзэх хэрэгтэй.

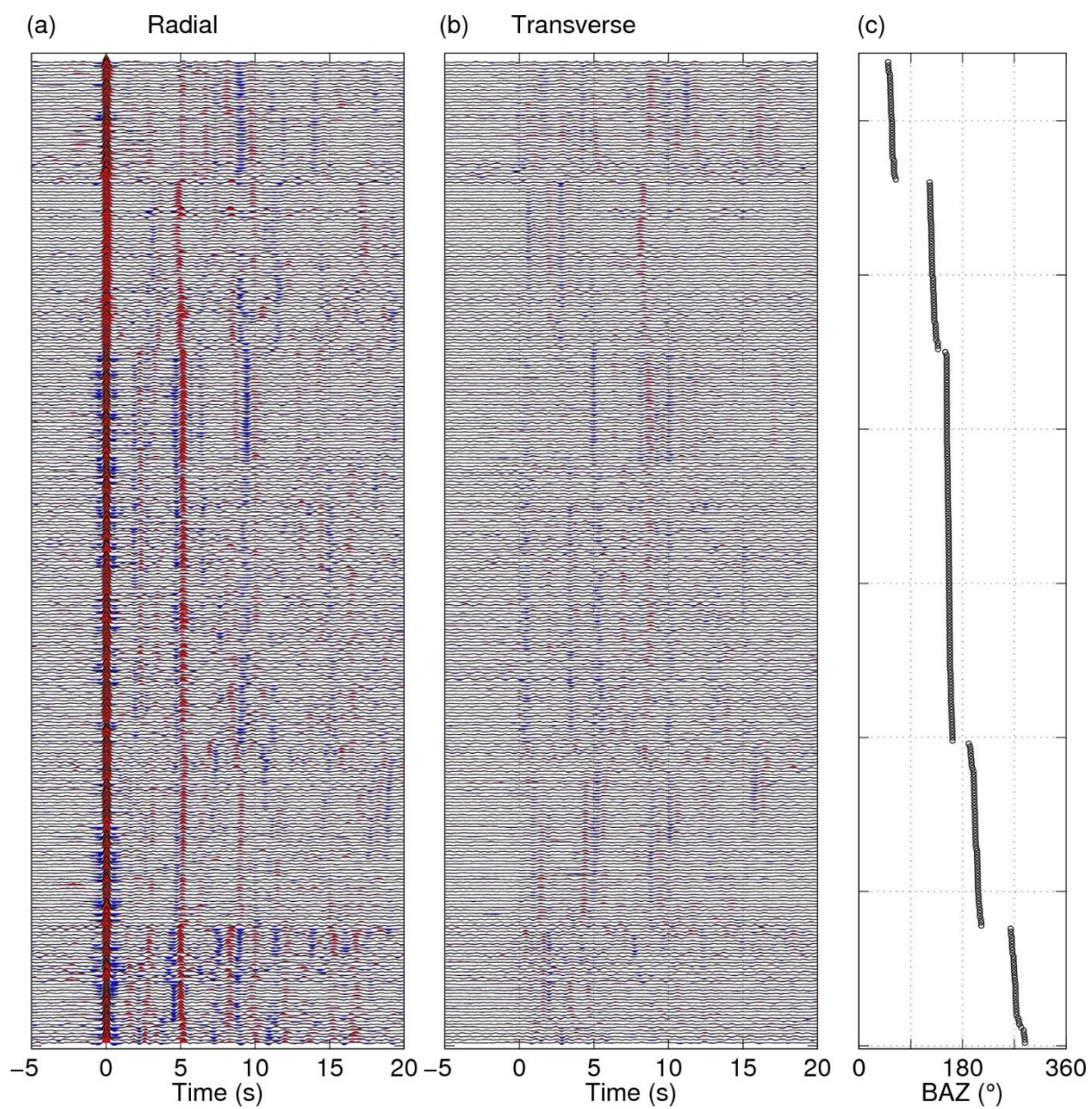


Зураг 13. Хүлээн авагчийн функцийн анализаар тодорхойлсон AL31, DM31 болон ER31 станцуудын доорх царцдас мандлын зузаан. Шар өнгөтэй гурвалжингаар газар хөдлөлт бүртгэх станцуудыг тэмдэглэв. Станц бүрийн доорх царцдас мандлын зузааныг тоогоор үзүүлэв.

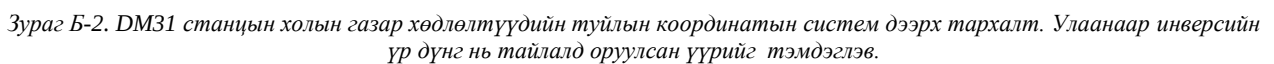
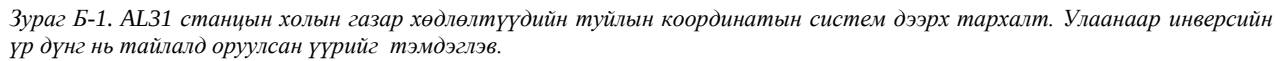
ХАВСРАЛТ-А: AL31 болон ER31 станцуудын ажиглагдсан хүлээн авагчийн функцүүд

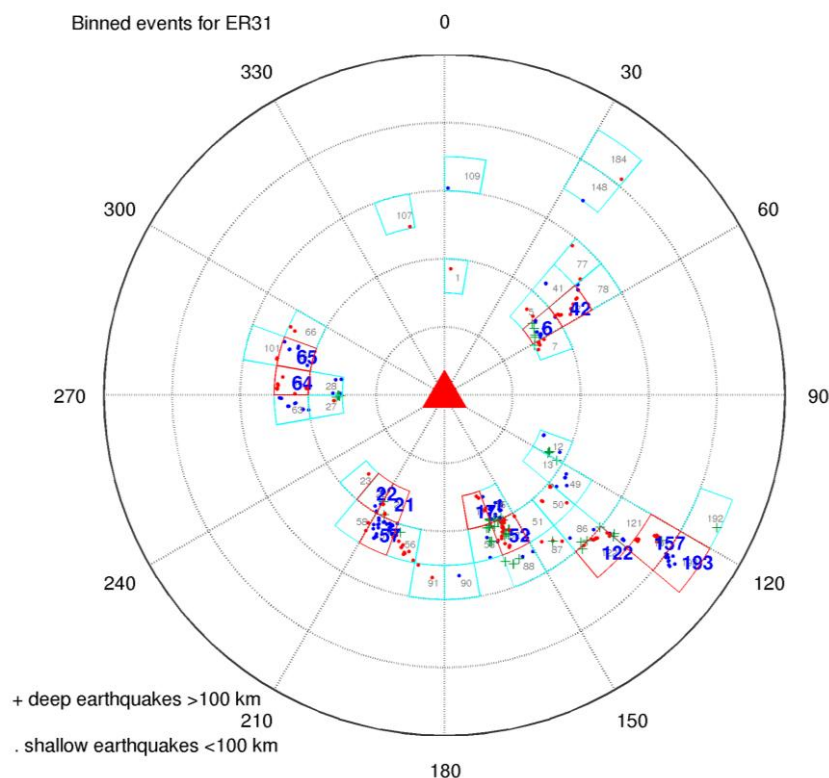


Зураг А-1. AL31 станцад ажиглагдсан радиал (а) болон тангенциал (b) хүлээн авагчийн функцүүд. Дугуй тойргуудаар (c) хүлээн авагчийн функц тус бүрийн азимутыг үзүүлэв.



Зураг А-2. ER31 станцад ажиглагдсан радиал (а) болон тангенциал (b) хүлээн авагчийн функцүүд. Дугуй тойргуудаар (c) хүлээн авагчийн функц тус бүрийн азимутыг үзүүлэв.





Зураг Б-3. ER31 станцын холын газар хөдлөлтүүдийн туйлын координатын систем дээрх тархалт. Улаанаар инверсийн үр дүнг нь тайлалд оруулсан үүрийг тэмдэглэв.

1. Ammon, C. J., Randall, G. E., and Zandth, G., 1990, On the non-uniqueness of receiver function inversions, J. Geophys. Res., 95, 15303-15318.
2. Clayton, R.W., Wiggins, R. A., 1976, Source shape estimation and deconvolution of teleseismic body waves, Geophys. J. R. astr. Soc., 47, 151-177.
3. Crotwell, H. P., Owens, T., and Ritsema, J., 1999, The TauP Toolkit: Flexible seismic travel-time and ray-path utilities, Seismological Research Letters 70, 154-160
4. Goldstein, P., A. Snoke, 2005, "SAC Availability for the IRIS Community", Incorporated Institutions for Seismology Data Management Center Electronic Newsletter.
5. Kurita, T., 1973, Regional variations in the structure of the crust in the central United States from P-wave spectra, Bull. Seism. Soc. Am., 63, 1663-1687
6. Langston, C. A., 1979, Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic body waves, J. Geophys. Res., 84, 4749-4762.
7. Owens, T. J., Zandt, G., and Taylor, S. R., 1984, Seismic evidence for an ancient rift beneath the Cumberland Plateau, Tennessee: A detailed analysis of broadband teleseismic P waveforms, J. Geophys. Res., 89, 7783-7795.
8. Park, J., Lindberg, CR., Vernon, FL., 1987, Multitaper Spectral-Analysis of High-Frequency Seismograms. Journal of Geophysical Research-Solid Earth and Planets. 92:12675-12684.
9. Park, J., and Levin, V., 2000, Receiver functions from multiple-taper spectral correlation estimates, Bull. Seismo. Soc. Am., 90, 1507-1520.
10. Sambridge, Malcolm., and Drijkoningen, Guy., 1992, Genetic algorithms in seismic waveform inversion, Geophys. J. Int., 109, 323-342.
11. Shibutani, T., Sambridge, M., and Kenneth, B., 1996, Genetic algorithm inversion for receiver functions with application to crust and uppermost mantle structure beneath Eastern Australia, Geophys. Res. Lett., 23, 1829-1832.
12. Shibutani, T., Ueno, T., and Hirahara, K., 2008, Improvement in the extended-time multitaper receiver function estimation technique, Bull. Seism. Soc. Am., 98, 812-816, 2008, doi:10.1785/0120070226.
13. Turcotte, D. L., and Schubert, G., 2002, Geodynamics, 219 p.

Abstract

Crustal and upper mantle shear wave velocity structure beneath AL31, DM31 and ER31 broadband stations was estimated using receiver function technique. Receiver functions were calculated from about 400 teleseismic event for every station, respectively. Stacked receiver functions were inverted for 1D shear wave velocity model with genetic algorithm. Crustal thickness under stations estimated as 53.6 km, 35.7 km and 39.3 km. Difference in crustal thickness can be explained by isostatic compensation. There is no low velocity layer in velocity structure.