

Н.Т.Азиева, Ж.О.Оралбекова

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
E-mail: oralbekova@bk.ru

ГЕОБАРЛАУДЫҢ ТЕХНИКАЛЫҚ ӘДІСІН КОМПЬЮТЕРЛІК МОДЕЛЬДЕУМЕН ЗЕРТТЕУ

Аңдатпа. Бұл мақалада уақыт аймағында ақырлы-айырымдық әдісін пайдаланып, геобарлаудың техникалық әдісі болып саналатын геофизикалық кешеннің жұмысын компьютерлік модельдеу арқылы зерттеу ұсынылады. Бұл әдісті Python программалау тілі мен grfMAX пакеті арқылы программалық қамтамасыз етуді жүзеге асыруға басты назар аударылады. Георадар бұзылмайтын сынақтар, жер асты объектілерін анықтау және геологиялық барлау үшін қуатты құрал болып табылады. Зерттеу әдістемесі георадардың виртуалды сценарийлерін құруды, геологиялық параметрлерді енгізуді, сондай-ақ электромагниттік толқындардың әртүрлі жер асты құрылымдарымен әрекеттесуін модельдеуді қамтиды. Компьютерлік модельдеу нәтижелері георадар деректерін шығарудағы уақыт аймағында ақырлы-айырымдық әдісінің тиімділігін визуалды бағалау үшін қолданылып, талданады. Зерттеу нәтижелері георадарды компьютерлік модельдеу контекстінде уақыт аймағында ақырлы-айырымдық әдісінің мүмкіндіктері мен шектеулерін тереңірек түсінуге мүмкіндік береді. Нәтижелерді талқылау дәлдік пен әртүрлі жағдайларға бейімделу сияқты осы әдістеменің негізгі артықшылықтарын көрсетеді. Бұл зерттеу геологиялық құрылымды талдаудың және жер асты объектілерін анықтаудың тиімді әдістерін жасау үшін маңызды.

Түйінді сөздер. Георадар, ақырлы-айырымдық уақыт аймағы, GrgMax, жер асты объектілерін анықтау, компьютерлік модельдеу, бұзбайтын сынақтар.

Кіріспе.

Қазіргі технологиялық жетістіктер әлемінде компьютерлік модельдеу ғылым мен техниканың әртүрлі салаларында жобалау мен зерттеулерде шешуші рөл атқарады. Осындай салалардың бірі геофизика болып табылады, мұнда уақыт аймағында ақырлы-айырымдық әдісімен георадарды модельдеу жерасты құрылымдары мен геологиялық түзілімдерді зерттеу мен талдаудың маңызды құралына айналуға.

Георадар – жер асты объектілерін анықтауда кеңінен қолданылатын технологиялардың бірі [1]. Жер астында көмілген оқшауланған объектілерді анықтау үшін бұзбайтын зерттеулер жүргізудің маңызы зор. Георадар моделі далалық деректерді жинау және өңдеу параметрлерін бағалау және нақтылауда шешуші рөл атқарады. Ол сондай-ақ геологиялық қима деректерін түсінуге едәуір көмек көрсетеді.

Жер қойнауы объектілерінің қауіпсіздігін қамтамасыз ету және пайдалы қазбаларды өндіру сапасын арттыру мәселелерін шешу кезінде тау-кен массасының құрылымын жүйелеу қажеттілігі туындайды. Осы мақсатта нақты тау-кен, геологиялық жағдайларға байланысты таңдалатын геофизикалық әдістердің нақты жинақтары қолданылады. Үңгірлер, құдықтар, шыңыраулар, шатқалдар мен шахталардың түзілуін, шытынаған аймақтарды, сондай-ақ көшкін қаупі бар аймақтарды анықтау үшін геофизикалық әдістер сәтті қолданылады. [2] жұмысының авторлары тау массивінің құрылымы мен жағдайын талдау үшін әртүрлі геофизикалық әдістерді, атап айтқанда георадарлық зондтау, инженерлік сейсмикалық зерттеулер және радонометрия сияқты әдістерді қарастырған. Геологиялық ортада болып жатқан үрдістер туралы соңғы іргелі

білімдерге негізделген кешенді геодинамикалық зерттеулер шеңберінде дәстүрлі және қазіргі заманғы геофизикалық аспаптарды қолдану арқылы тау массивінің құрылымдық және геодинамикалық моделін сенімді анықтауға және жер қойнауы объектілерінің сақталуын қамтамасыз етуге болады деген қорытынды жасауға болады.

Д.Эдемский, А.Попов, И.Прокопович «Туннуг қорғанының шеткі геофизикалық түсірілімі, Тува, Ресей» атты мақаласында қорғанның күрделі архитектурасын зерттеу үшін кешенді геофизикалық тәсілдерді - магнитометрия мен георадарды қолданды. Геофизикалық зерттеулердің жалпы ауданы он екі мың шаршы метрден асты. Зерттеу нәтижелері әртүрлі физикалық үрдістерге негізделген екі геофизикалық әдісті бір уақытта қолдану арқылы көне скиф қорғанының шеті сияқты күрделі жерлеу құрылымының толық көрінісін беретінін көрсетті. Георадарлық және магнитометриялық өлшемдер бір-бірін толықтыра отырып, нашар құрғатылған, батпақты аймақтардағы біркелкі емес еріту тереңдігі бар мәңгі мұз жағдайында күрделі археологиялық объектілерді толыққанды геофизикалық зерттеудің сенімділігін арттыра түсті. Георадар қорғандарды геофизикалық барлаудың ең танымал әдісі болып табылатын магнитометриямен бекітілген жер асты тас құрылымдарының барлық сипаттамаларын көрсете алды. Авторлармен археологиялық объектілердің осы түрі үшін георадарды алғаш рет пайдаланғаны туралы атап өтілді. Геофизикалық жұмыстардың нәтижелері қорғанның шетіндегі археологиялық объектілердің орналасуын анықтап, қазба орындарын тиімдірек және негізді таңдауға мүмкіндік берді [3].

Георадардың тәжірибелік мәселелерді шешуде қолданудың тағы бір мысалы ретінде шөлді аймақтарда жаңа қала құру барысында пайдалануын атап өтуге болады. Египетте халықтың тығыздығының артуына, ауыл шаруашылық алқаптарының шектелуіне, игерілетін жерлердің тапшылығына және олардың қымбаттығына байланысты мемлекет басшысы шөлді жерлерде жаңа қала салу туралы шешім қабылдады [4]. Жоспарланған шөлді аймақ шегінде тиісті қабаттың (тау жыныстарының) пайда болу тереңдігін анықтау және нәтижелерді қолда бар ұңғымалармен байланыстыру үшін көп күш салуды қажет етеді. Инженерлік есептеулер үшін ғимарат құрылымының тұрақтылығын қамтамасыз ету және ғимараттың кейінгі құлауының таңқаларлық салдарын болдырмау үшін геофизикалық аспап топырақтың инженерлік сипаттамалары мен тау жыныстарының тереңдігін анықтау және зерттелетін аймақтың жер асты құрылымдары мен литологиясын анықтау мақсатында қолданылды.

Сонымен бірге, жерленген тарихи шахталары шұңқырлардың пайда болу қаупін және геотехникалық тәуекелдердің көздерін анықтауға байланысты мәселені шешуде геофизикалық аспапты қолдануға жүгінген дұрыс. Ескі тау-кен карталарында көмілген шахтаның орналасуы дәлсіздіктерге бейім болып келеді. Бұл дәлсіздіктерді шектеудің тиімді әдісі – геофизикалық әдістерді қолдану. Алайда олардың тиімділігі жергілікті зерттеу жағдайларына байланысты. [5] жұмысында ЮНЕСКО-ның Бүкіләлемдік мұра тізіміне енген Польшадағы Бохня тұз кенішіндегі XIV ғасырдағы Велка көмілген шахтасын анықтау мақсатында георадар аспабы қолданылды. Бұл шахтаның орналасқан жерін анықтау қажеттілігі келесі себептерге байланысты болды. Біріншіден, Бохнядағы тұз шахтасындағы қазбаларға Велка шахтасының болжамды орналасқан жерінен судың түсуінен қиындықтар пайда шінболды. Шахта аймағы тұз шахтасының аумағындағы ең батпақты жерлердің бірі. Тарихи тау-кен жұмыстарын қорғау мақсатында су өткізбейтін тосқауыл қою үшін шахтаның нақты орналасқан жерін анықтау өте маңызды. Екіншіден, Бохнядағы базар алаңын жаңарту Велка шахтасының орналасқан жерін нақтылауды және оның жер бетіне қауіп төндіретінін тексеруді талап етті. Ортағасырлық шахтаның нақты орналасуын табудың тағы бір маңызды себебі оның археологиялық құндылығы болды. Велка шахтасының орналасқан жерін анықтау үшін жер бетін және ұңғыманы зерттеуде георадар аспабы пайдаланылды. Гетерогенді материалдың антропогендік қабаты және

урбанизацияланған аумақ айқын георадарлық ауытқуларды анықтауда қиындықтарға тап болды. Зерттеу аймағында 250 МГц және 100 МГц антенналарын қолдана отырып, бірнеше ондаған қиылысатын радиолокациялық түсірілімдер жасалды. Георадарлық аномалияны көрсететін жер үсті георадарлық түсірілімнің бастапқы нәтижелері негізгі ұңғыманы зерттеу және ұңғыманы георадарлық зерттеу арқылы жинақталды. Атап айтқанда, көлбеу бақылау ұңғымасында бос жерлер, қопсытылған жерлер және бөшке бекіткішінің ағаш сынықтары бар екендігі расталды. Көмілген шахта үстіндегі шұңқырлардың типтік себептерінің жіктелуіне сүйене отырып, шахтаны қайта толтыру материалының тығыздалуы Велка шахтасының үстінде пайда болған сәтсіздіктің себебі ретінде анықталды. Шахтаның ағаш қақпағының бұзылуы жер бетінде шөгудің пайда болуына әкелуі мүмкін. Сондықтан бос орын қайта толтырумен толтырылып, Бохня тұз кенішінің тарихи өндірістеріне судың ағып кетуін тоқтату үшін гидравликалық тосқауыл қойылды. Бұл зерттеу ұңғымалардан алынған деректермен біріктірілген жер үсті мен ұңғымалардың радиолокациялық түсірілімі урбанизацияланған аймақтағы ескі көмілген шахта орнын дәл анықтау үшін қажетті жоғары дәлдікті деректерді алуға мүмкіндік беретінін көрсетті.

Дегенмен, георадар көмегімен нақты эксперименттер жүргізу үшін геофизикалық аспапты жалға алу қиын әрі шығынды талап етуі мүмкін. Бұл тұрғыда компьютерлік модельдеу зерттеушілерге жердің ішкі көрінісін іс жүзінде зерттеуге мүмкіндік беретін баға жетпес құралға айналады.

Георадар антеннасының шынайы дизайнын уақыт аймағында ақырлы-айырымдық әдісімен модельдеу тамаша жетістіктердің бірі [6]. Коммерциялық георадар антенналарының ерекшеліктері бар антенна үлгілері зерттеушілерге анағұрлым дәл синтетикалық өлшеу жауабын алуға мүмкіндік береді. Әртүрлі орталарда электромагниттік толқындардың таралуын модельдеу үшін уақыт аймағында ақырлы-айырымдық әдісі кеңінен қолданылатын сандық тәсілдердің бірі. Ол кеңістік пен уақытты дискреттеуге, оларды шағын ұяшықтарға және қадамдарға бөлуге негізделген. Бұл әдіс электромагниттік өрістердің әрекетін сипаттайтын Максвелл теңдеулерін жуықтап алуға және оларды нақты геологиялық орта үшін сандық түрде шешуге мүмкіндік береді.

Жұмыстың мақсаты: Георадар аспабының жұмыс істеу принципін компьютерлік модельдеу арқылы зерттеу.

Георадар сигналдарын цифрлік өңдеу үшін фильтрлер қолданылады [7-9]. Авторлар георадарды қолдану қиындығы қазіргі кезеңде талап етілетін деректерді интерпретациялаудың күрделілігі үшін жоғары білікті мамандарды тарту болып табылатынын атап өтеді. Георадар деректерін түсіндірудің қалыптасқан өзіндік әдістерін геофизикалық ақпаратты құпия сақтауға ықпал етеді.

Материалдар мен тәсілдер.

Уақыт аймағында ақырлы-айырымдық (FDTD) әдісі геофизикалық аспаптардың дамуына септігін тигізді. FDTD әдісі есептеу электрлік барлауда сандық модельдеу үшін кеңінен қолданылады. Дегенмен, модельдеудің көлемді сипатына байланысты бұл әдіс көбінесе өңдеу уақыты мен жады тұрғысынан айтарлықтай есептеу ресурстарын қажет етеді. Осы тұрғыдан қарастырғанда георадарды модельдеу оңайға соқпайды. Бұл модельдеу георадар сенсоры, жер асты құрылымдары және объектер сияқты әртүрлі компоненттерді қосуды және тиісті модельдерді құруды талап етеді. Сонымен қатар, георадарды тура модельдеу әртүрлі геометриялы көптеген пішіндерді пайдаланады. Бұл күрделілік георадарға қатысты кері есепті шешу барысында немесе машиналық оқыту алгоритмдерін үйрету үшін тура модельдерді пайдалану кезінде одан әрі артады [10].

gprMax кітапханасы георадарды сандық модельдеу үшін электромагниттік толқынның уақыт аймағында таралуын ақырлы-айырымдық әдіспен модельдеуін

орындауға мүмкіндік беретін тегін, әрі қолжетімді, ашық бағдарламалық құрал болып табылады. Бастапқыда Си тілінде жазылған grgMax модельдеудің осы түрлерін енгізуді жеңілдету, кеңейтілген мүмкіндіктерін қосу мақсатында бастапқы код Python және Cython бағдарламалау тілдерінің тіркесімі арқылы толығымен қайта жазылды [11]. grgMax-тың тура модельдеуі және ортада құмды қабатты қолдану қалалық таяз жер асты объектілерін бұзбай дәл анықтауға техникалық қолдау көрсете алады [12]. Қазіргі заманғы есептеу ресурстары бұрын қол жетімсіз болған заманауи және күрделі георадардың FDTD-модельдерін жасауға мүмкіндік береді.

Нәтижелер мен талқылау.

Бағдарламалық құралды оңтайландыру үдерісі Python көмегімен код жазу, Miniconda 3, OpenMP қолдауы бар C компиляторлары және grgMax пакетін пайдалану арқылы жүзеге асырылды.

Ең алдымен виртуалды орта құрылды.

Георадар электромагниттік импульстерді шығарады.

Модельдеуде пайдаланылатын импульс келесі формуламен сипатталды:

$$W(t) = e^{-2\pi^2} * \left(t - \frac{1}{f_c}\right)^2 * f_c^2.$$

$f_c = 1\text{ГГц}$ жиіліктегі Гаусс импульсі алынды, 40 дБ деңгейінде $f = 3\text{ГГц}$ тең.

Гаусс импульсінің спектрі мен формасын беру үшін келесі команда жазылды:

```
python -m tools.plot_source_wave gaussian 1 1e9 5e-9 1e-12 -ff.
```

Электромагниттік толқынның біртекті ортада таралу жылдамдығы келесі формуламен анықталады:

$$v = \frac{30}{\sqrt{\epsilon_r}}.$$

Зерттелетін орта ретінде - біртекті орта, құрғақ құм алынды. Құрғақ құмда диэлектрлік өтімділік $\epsilon_r = 3$ екендігі белгілі. Бұдан электромагниттік толқынның біртекті ортада таралу жылдамдығы $v = \frac{30}{\sqrt{3}} \approx 17,3 \text{ (см/нс)}$ тең.

Электромагниттік толқынның ұзындығы:

$$\lambda = \frac{v}{f}, \text{ мұндағы жиілік } f = 3\text{ГГц}.$$

Жоғарыда есептелген электромагниттік толқынның біртекті ортада таралу жылдамдығының мәні арқылы толқын ұзындығының сандық мәнін аламыз: $\lambda = \frac{17,3}{3} \approx 5,8 \text{ (см)}$.

Моделденетін аймақ ретінде ені 60 см., ұзындығы 80 см. болатын тіктөртбұрыш алынды. #box: 0 0 0 0.80 0.38 0.002 sand командасы арқылы тіктөртбұрыштың бір бөлігі құммен толтырылды.

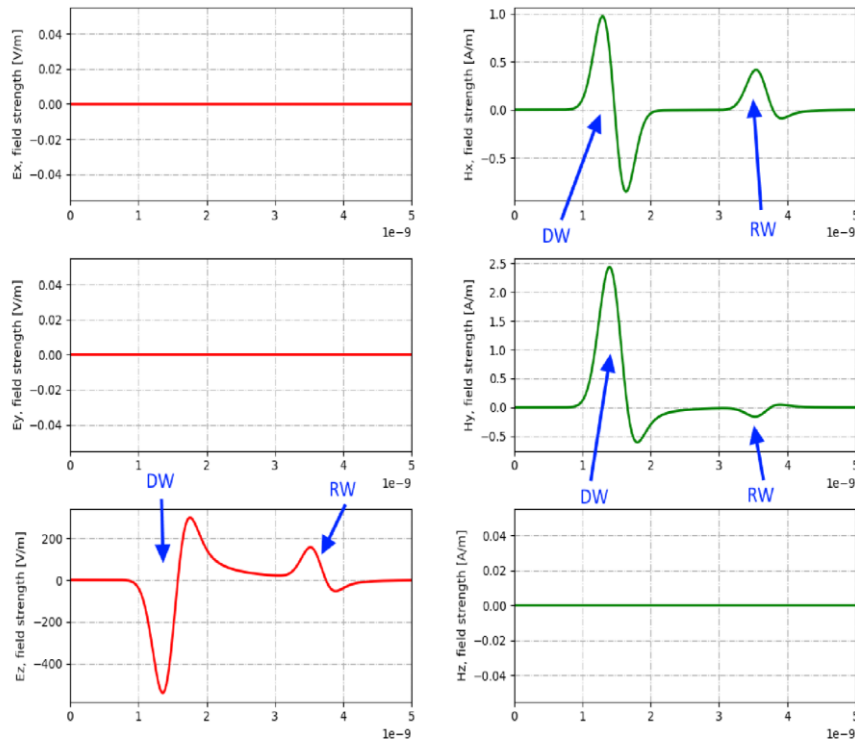
Антенна мен жер астында орналасқан объектінің арақашықтығы $h = 18 \text{ (см)}$. Георадар сигналының ортада таралу уақыты $t = \frac{2h}{v} = \frac{2 * 18}{17,3} = 2,1 \text{ (нс)}$.

Электромагниттік өріс алты компоненттен тұрады: $E_x, E_y, E_z, H_x, H_y, H_z$.

python -m tools.plot_Ascan models\hello.out командасының көмегімен уақыт графигін саламыз (1-сурет).

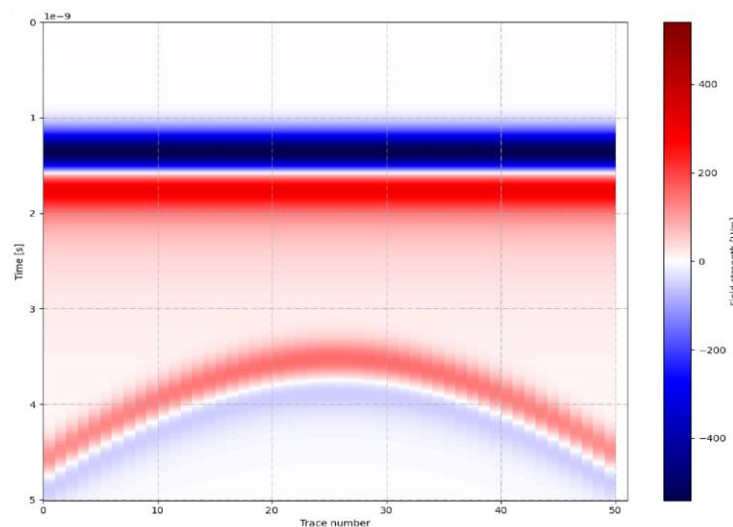
1-суретте келесі белгілеу нұсқағыштары бейнеленген: DW арқылы антеннадан таралған тура толқындар, RW – объектен шағылысқан толқындарды білдіреді.

Георадарлық қиманы (радарограммаларды) талдау жер астындағы орналасқан объекттің өлшемі мен формасы, орналасу тереңдігі туралы ақпарат алуға болады.



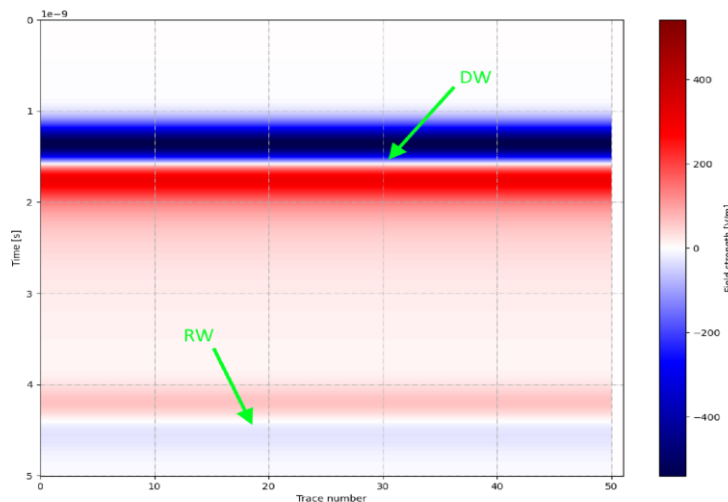
1 сурет – Электромагнитік өрістің алты компоненті бойынша уақыт графиктері

Радарограммаларды эзирлеу `python -m tools.plot_Bscan models\hello_merged.out Ez` командасының көмегімен ортаның бірінші қабаты жасалды (2-сурет). 2-суреттегі қызыл түс электрлік өрістің E_z компонентінің оң, ақ түс – нольге тең, көк түс – оның теріс мәнді екенін білдіреді.



2 сурет – Бір қабатты орта радарограммасы

Диэлектрик өтімділігі $\varepsilon=9$ тең құм қабаты, яғни ортаның екінші қабаты 3-суретте бейнеленген. 3-суретте DW мен RW белгілеу нұсқағыштары жоғарыда айтылып, өтілген толқындарға сәйкес келеді.



3 сурет – Құм қабаты қосылған қима

Георадардың компьютерлік модельдеуін геология, археология, инженерлік зерттеулер және т.б. салаларда маңызы бар. Ол виртуалды барлауға, физикалық эксперименттердің құнын төмендетуге және геологиялық ортаны түсінуді жеңілдетуге мүмкіндік береді. Бұл зерттеулер геофизика ғылымының дамуына және әртүрлі салаларда тәжірибелік қолдануларға үлес қосу мүмкіндігіне ие.

Қорытынды.

Тегін, әрі қолжетімді, ашық таратылатын grgMax бағдарламалық құралы георадардың жұмыс принциптері мен жер астында орналасқан оқшауланған, жасырын объектілерді анықтау әдістерін тереңірек түсіну үшін сәтті қолданылды. Келешекте машиналық оқыту көмегімен орта параметрлерін автоматты түрде анықтайтын ақпараттық жүйе құрастыру жоспарланып отыр.

Қорытындылай келе, уақыт аймағында ақырлы-айырымдық әдісімен георадарды модельдеу жерасты құрылымдары мен геологиялық түзілімдерді зерттеудің қуатты құралы болып табылады деуге болады. Бұл әдіс зерттеушілерге жер қабаттарының құрамы мен қасиеттері туралы құнды мәліметтер алуға, сондай-ақ әртүрлі геологиялық үдерістерді зерттеуге мүмкіндік береді. grgMAX пакетін пайдалана отырып, Python бағдарламалау тілінде жасалған программа зерттеушілерге шынайы георадар модельдерін жасауға, параметрлерді конфигурациялауға және нәтижелерді талдауға кең мүмкіндіктер ашады. Оның интуитивті интерфейсі мен икемді параметрлері оны тәжірибелі мамандар үшін де, жаңадан бастаған зерттеушілер үшін де құнды құрал. Есептеу технологиялары мен программалық құралдардағы жылдам жетістіктермен георадарды модельдеу зерттеушілерге барған сайын дәл және шынайы нәтижелер береді.

ӘДЕБИЕТТЕР

[1] Meşecan İ., Çiço B., Bucak İ.Ö. Feature vector for underground object detection using B-scan images from GprMax // Microprocessors and Microsystems. – 2020. – Vol. 76. – P.103116. – <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2020.103116>

[2] Dalatkazin T.S., Vedernikov A.S., Grigoriev D.V., Zamyatin A.L., Zuev P.I. Experience in application of geophysical methods in complex geodynamic diagnostics of rock massif. *Gornaya Promyshlennost.* – 2022. – Vol. 2022(1s). – P. 105–110.

[3] Edemsky D., Popov A., Prokopovich I. Geophysical survey of Tunnug mound periphery, Tuva, Russia. - *Journal of Applied Geophysics.* – Vol. 189. – 2021. – P. 104326. – <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2021.104326>.

[4] Abudeif A.M., Mohammed M.A., Fat-Helbary R.E., El-Khashab H.M., Masoud M.M., Integration of 2D geoelectrical resistivity imaging and boreholes as rapid tools for geotechnical characterization of construction sites: A case study of New Akhmim city, Sohag, Egypt. - *Journal of African Earth Sciences.* – 2020. – Vol. 163. – P. 103734. – <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.103734>.

[5] Pilecki Z., Krzysztof K., Elżbieta P., Andrzej K., Sylwia T.-S., Tomasz Ł. Identification of buried historical mineshaft using ground-penetrating radar. - *Engineering Geology.* – 2021. – Vol. 294. – P. 106400. - <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106400>.

[6] Özkap K., Pekşen E., Kaplanvural İ., Çaka D. 3D scanner technology implementation to numerical modeling of GPR // *Journal of Applied Geophysics.* – 2020. – Vol. 179. – P. 104086. – <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104086>

[7] Iskakov K.T., Boranbaev S.A., Uzakkyzy N. Wavelet processing and filtering of the radarogram trace // *Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications.* – 2017. – Vol. 5(4). – P. 43–54.

[8] Uzakkyzy N., Iskakov K., Boranbayev S. About the results of the processing route radarogram Haar wavelets and Daubechies // *Progress in Electromagnetics Research Symposium.* – 2017. – P. 3729–3739.

[9] Mukanova B.G., Iskakov K.T., Kembay A.S., Boranbaev S.A. Inverse source identification problem for the wave equation: An application for interpreting GPR data // *Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications.* – 2020. – Vol. 8(3). – P. 78–91.

[10] Warren C., Giannopoulos A., Gray A., Giannakis I., Patterson A., Wetter L., Hamrah A. A CUDA-based GPU engine for gprMax: Open source FDTD electromagnetic simulation software. – *Computer Physics Communications.* – 2019. – Vol. 237. – P.208-218. – <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2018.11.007>

[11] Apaydın O., İşseven T., Çıtır Y., Paker S., Erer I., Aydın N. G. Extracting tomographic images of interior structures of cylindrical objects and trees using Ground Penetrating Radar method. – *Results in Engineering.* – 2022. – Volume 14. – P. 100410.

[12] Jia W., Wang S., Min S., Zhang Y. Electromagnetic energy focusing technology with GPR array transmitting antenna for high resolution detection // *Measurement.* – 2022. – Vol. 203. – P. 112000.

Nurgul Aziyeva, senior lecturer, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, nurgul_aziyeva@mail.ru

Zhanar Oralbekova, PhD, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, oralbekova@bk.ru

INVESTIGATION OF THE TECHNICAL METHOD OF GEOEXPLORATION BY USING COMPUTER MODELING

Abstract. This article presents a study of computer simulation of georadar using the finite-difference time-domain (FDTD) method. The main attention is paid to the software implementation of this method using the Python programming language and the gprMAX package. GPR is a powerful tool for non-destructive testing, detection of underground objects,

and geological exploration. The research methodology includes the creation of virtual GPR scenarios, the introduction of geological parameters, as well as modeling of the interaction of electromagnetic waves with various underground structures. The simulation results are visualized and analyzed to evaluate the effectiveness of the FDTD method in reproducing GPR data. The study's results allow a deeper understanding of the possibilities and limitations of the FDTD method in the context of GPR modeling. The discussion of the results highlights the key advantages of this methodology, such as accuracy and adaptability to different conditions. This research is important for developing more efficient methods for analyzing geological structures and detecting underground objects.

Keywords. Ground-penetrating radar, Finite-Difference Time-Domain, GprMax, underground object detection, modeling, non-destructive testing.

Нургул Азиева, старший преподаватель, Евразийский национальный университет имени Л.Н.Гумилева, Астана, Казахстан, nurgul_aziyeva@mail.ru

Жанар Оралбекова, PhD, Евразийский национальный университет имени Л.Н.Гумилева, Астана, Казахстан, oralbekova@bk.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО МЕТОДА ГЕОРАЗВЕДКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Аннотация. Данная статья представляет исследование компьютерного моделирования георадара с использованием метода конечно-разностной временной области (КРВО). Основное внимание уделяется программной реализации данного метода с применением языка программирования Python и пакета gprMAX. Георадар является мощным инструментом для неразрушающего контроля, обнаружения подземных объектов и геологического исследования. Методология исследования включает создание виртуальных георадарных сценариев, введение геологических параметров, а также моделирование взаимодействия электромагнитных волн с различными подземными структурами. Результаты компьютерного моделирования визуализируются и анализируются для оценки эффективности метода КРВО в воспроизведении георадарных данных. Результаты исследования позволяют более глубоко понять возможности и ограничения метода КРВО в контексте моделирования георадара. Обсуждение результатов выделяет ключевые преимущества этой методологии, такие как точность и адаптивность к различным условиям. Это исследование имеет важное значение для разработки более эффективных методов анализа геологической структуры и обнаружения подземных объектов.

Ключевые слова. Георадар, конечно-разностная временная область, GprMax, обнаружение подземных объектов, компьютерное моделирование, неразрушающий контроль.
