Код МРНТИ 52.13.25

Г. Мейрамбек[1], Карел Вах[2], *Л. Қ. Адильбекова[1], А. Н. Нуржусупова[1]
[1]Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан),
[2]PHEDCS (Прага қ., Чехия)

GB-SAR МОНИТОРИНГІ ДЕРЕКТЕРІ ЖӘНЕ ГЕОМЕХАНИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУ НЕГІЗІНДЕ ЖЫНЫС МАССИВІНІҢ ДЕФОРМАЦИЯЛЫҚ ЖАҒДАЙЫН КЕШЕНДІ ТАЛДАУ

Аңдатпа. Мақалада терең карьерлердегі тау жыныстары массивінің жасырын әлсіреуін ерте анықтауға арналған интеграцияланған тәсіл қарастырылған. Зерттеу Ұлытау облысындағы «Шығыс-Сарыоба» кен орны карьерінің оңтүстік бортында жүргізілді. Әдістеме GB-SAR мониторингі, GNSS бақылаулары және RS3 бағдарламасындағы үшөлшемді геомеханикалық модельдеу нәтижелерін біріктіруге негізделген. GB-SAR деректері жергілікті деформациялық аномалияны анықтаса, GNSS бақылаулары өңірлік деформацияларды тіркемеді. Геомеханикалық модельдеу аномалияның терең пластикалық деформациялармен байланысты екенін көрсетті. Ұсынылған тәсіл карьер борттарының тұрақтылығын бағалау сенімділігін арттырып, қауіпті аймақтарды ерте анықтауға мүмкіндік береді.
Түйінді сөздер: *жерүсті радиолокациялық интерферометрия, геомеханикалық модельдеу, тау жыныстары массиві, карьер бортының тұрақтылығы, деформациялық мониторинг, терең пластикалық деформациялар, кері талдау, ерте диагностика.*

Integrated analysis of rock mass deformation based on GB-SAR data and geomechanical modeling

Abstract. The paper presents an integrated approach for the early detection of hidden rock mass weakening processes during deep open-pit mining. The study was conducted at the southern slope of the Vostochny Saryoba open pit located in the Ulytau Region of Kazakhstan. The methodology is based on the integrated analysis of GB-SAR monitoring data, GNSS observations, and three-dimensional geomechanical modeling performed in the RS3 software package. The study identified a local deformation anomaly and confirmed its relationship with deep-seated plastic deformation processes within the rock mass. The proposed approach improves the reliability of slope stability assessment and enhances the effectiveness of early identification of geomechanically hazardous zones.
Key words: *ground-based radar interferometry, geomechanical modeling, rock mass, open-pit slope stability, deformation monitoring, deep-seated plastic deformation, back analysis, early diagnosis.*

Интегрированный анализ деформационного состояния массива по данным GB-SAR и геомеханического моделирования

Аннотация. В статье рассмотрен интегрированный подход к раннему выявлению скрытых процессов ослабления массива горных пород при разработке глубоких карьеров. Исследование выполнено на примере южного борта карьера месторождения «Восточный Сарыоба» в области Улытау. Методика основана на комплексном анализе данных радиолокационного мониторинга GB-SAR, GNSS-наблюдений и результатов трехмерного геомеханического моделирования в программном комплексе RS3. В ходе исследования выявлена локальная деформационная аномалия и установлена ее связь с развитием глубинных пластических деформаций массива. Предложенный подход позволяет повысить надежность оценки устойчивости бортов карьеров и эффективность раннего выявления геомеханически опасных зон.
Ключевые слова: *наземная радиолокационная интерферометрия, геомеханическое моделирование, массив горных пород, устойчивость бортов карьера, деформационный мониторинг, глубинные пластические деформации, обратный анализ, ранняя диагностика.*

Кіріспе

Терең карьерлерді игеру тау жыныстары массивіндегі кернеулердің күрделі қайта бөліну үдерістерімен, әлсіреу аймақтарының қалыптасуымен және еңістер деформацияларының біртіндеп дамуымен қатар жүреді. Карьер кемерлерінің тұрақтылығын жоғалту өнеркәсіптік қауіпсіздікке елеулі қауіп төндіреді және өндірістік үдерістердің тоқтауына, инфрақұрылымның зақымдануына және апаттық жағдайлардың туындауына алып келуі мүмкін [1–3].

Қазіргі геомеханиканың ең күрделі міндеттерінің бірі – массив тұрақсыздығының бастапқы кезеңдерін анықтау, өйткені бұл кезеңде массивтің әлсіреу үдерістері әлі де айқын беткі деформациялармен қатар жүрмейді. Тәжірибеде мониторинг жүйелерінің басым бөлігі қалыптасып үлгерген ығысуларды тіркеуге бағытталған, ал тұрақсыздықтың жасырын даму кезеңдері көбінесе анықталмай қалады [4].

Дәстүрлі геодезиялық әдістер, соның ішінде GNSS-бақылаулар мен нивелирлеу, кеңістіктік ығысуларды анықтаудың жоғары дәлдігін қамтамасыз етеді, алайда бірқатар жағдайларда олар еңістердің жергілікті ерте деформацияларын анықтауға жеткілікті сезімтал болмайды [5, 6].

Соңғы жылдары жерүсті радиолокациялық интерферометрия (GB-SAR) әдістері кеңінен қолданылуда, олар жергілікті ығысуларға жоғары сезімталдықты және карьер еңістерін үздіксіз қашықтықтан мониторингтеу мүмкіндігін қамтамасыз етеді. GB-SAR әдісінің жоғары тиімділігіне қарамастан, жергілікті деформациялық аномалияларды интерпретациялау күрделі міндет болып қала береді, себебі бақыланатын ығысулар олардың қалыптасу механизмдерін әрдайым бірмәнді анықтауға мүмкіндік бермейді.

Көптеген зерттеулерде радиолокациялық мониторинг деректері негізінен дамып келе жатқан деформацияларды тіркеу немесе жедел ескерту құралы ретінде пайдаланылады. Сонымен қатар, жергілікті деформациялық аномалиялардың массивтің жасырын терең әлсіреу үдерістерінің индикаторы бола алатындығы мәселесіне айтарлықтай аз көңіл бөлінеді [7].

Осы зерттеуде еңістің локализацияланған деформациялық белсенділігі ауқымды беткі тұрақсыздықтың дамуына дейін пайда болуы мүмкін және массив ішінде терең пластикалық аймақтың қалыптасуын көрсетуі ықтимал деген гипотеза қарастырылады.

Зерттеудің ғылыми жаңалығы GB-SAR арқылы тіркелетін жергілікті деформациялар мен үшөлшемді геомеханикалық модельдеу әдісі арқылы анықталған терең пластикалық аймақтың дамуы арасындағы өзара байланысты анықтауда болып табылады.

Зерттеудің мақсаты – GB-SAR мониторингі, GNSS-бақылаулар және FEM-модельдеу деректерін бірлесіп талдау негізінде тұрақсыздықтың жасырын аймақтарын ерте анықтаудың интеграцияланған тәсілін әзірлеу.

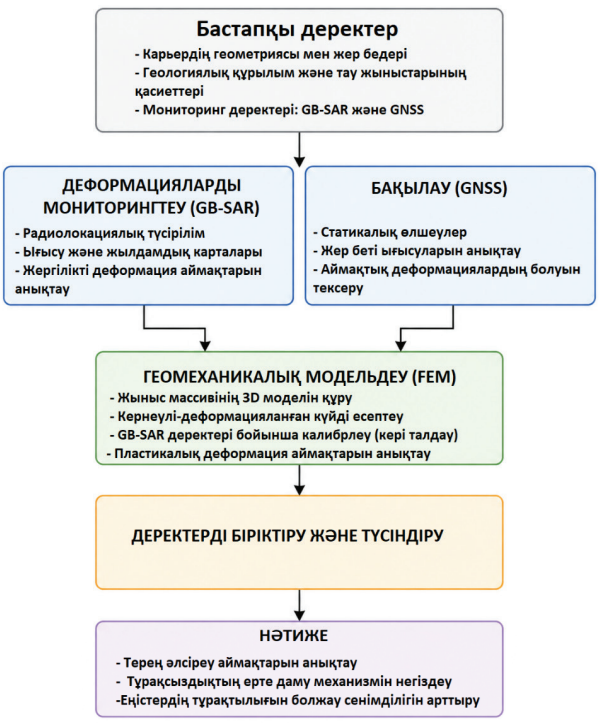
Материалдар мен әдістер

Зерттеу нысаны Қазақстан Республикасының Ұлытау облысында орналасқан «Шығыс-Сарыоба» кен орнының карьері болып табылады.

Зерттеу ауданы кен орнын ұзақ уақыт бойы ашық әдіспен игеруге байланысты қарқынды техногендік әсермен сипатталады. Учаскенің геологиялық құрылысы тектоникалық бұзылыстармен, жоғары жарықшақтылық аймақтарымен және тау жыныстарының литологиялық әртектілігімен күрделенген.

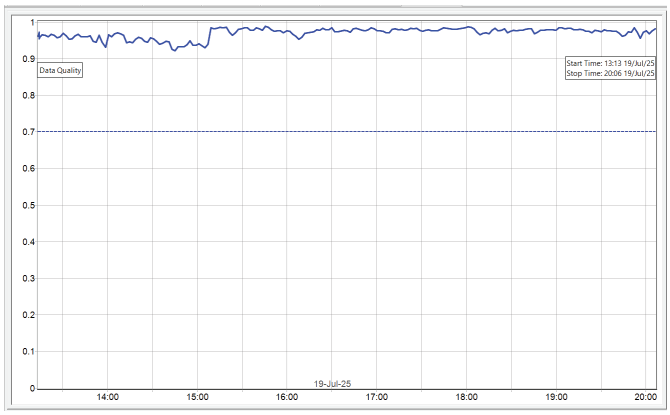
Карьердің оңтүстік борты шегінде бұған дейін жергілікті деформациялық белсенділіктің белгілері тіркелген, бұл кешенді геомеханикалық талдау жүргізу қажеттілігін туындатты.

Есептік модельді құру үшін жер бедерінің цифрлық моделі, маркшейдерлік түсірілім деректері, карьер кемерлерінің контурлары және инженерлік-геологиялық материалдар пайдаланылды. Осы деректер негізінде зерттелетін учаскенің карьер бортының геометриясын және массивтің құрылымдық ерекшеліктерін қамтитын интеграцияланған геомеханикалық сұлба қалыптастырылды (1-сурет) [8].



Сурет 1. Интеграцияланған зерттеу әдісінің сұлбасы.
Figure 1. Scheme of the integrated research method.
Рис. 1. Схема интегрированного метода исследования.

Радиолокациялық мониторинг IBIS-FM EVO-C жерүсті интерферометрия жүйесін пайдалану арқылы жүргізілді. Мониторинг карьердің оңтүстік бортының аса қауіпті учаскелерін қамтып, радардың көру сызығы (LOS) бағыты бойынша ығысуларды тіркеуді қамтамасыз етті. Өңдеу нәтижелері бойынша ығысу карталары, деформациялардың уақыттық қатарлары, ығысу жылдамдықтарының таралуы және сигнал сапасының карталары (DQI) алынды. Кейінгі талдау үшін сигналдың тұрақты когеренттілігімен және радиолокациялық өлшеулердің жоғары сапасымен сипатталатын учаскелер ғана пайдаланылды.



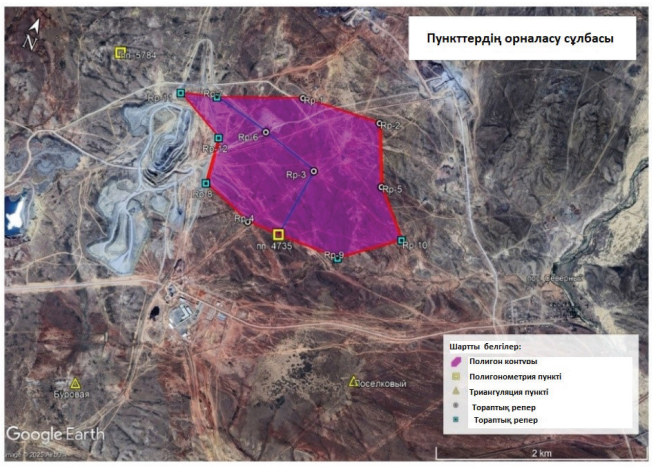
Сурет 2. Мониторинг кезеңіндегі радиолокациялық деректер сапасы индексінің (ДСИ) өзгеру динамикасы.
Figure 2. Dynamics of the radar data quality index (DQI) during the monitoring period.
Рис. 2. Динамика изменения индекса качества радиолокационных данных (ДИК) в период мониторинга.

Бақылау кезеңінің бүкіл ұзақтығы бойында деректер сапасы индексінің мәндері 0,9-дан жоғары деңгейде сақталды, бұл интерферометриялық сигналдың жоғары тұрақтылығын және тіркелген деформациялық өлшеулердің сенімділігін көрсетеді. Интерферометриялық когеренттіліктің тұрақтылығы анықталған орын ығысуларды өлшеу артефактілері ретінде емес, нақты геомеханикалық үдерістердің көрінісі ретінде түсіндіруге мүмкіндік береді.

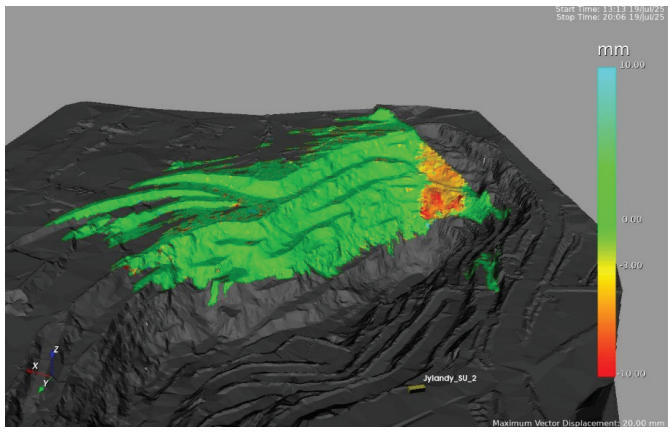
GNSS-бақылаулар статикалық қысқа базистік өлшеулер әдісімен жүргізілді. Деформациялық мониторинг нәтижелерінің кеңістіктік байланысын және әртүрлі бақылау әдістерінен алынған деректердің салыстырмалылығын қамтамасыз ету мақсатында зерттелетін учаскеде әлеуетті техногендік әсер аймағы шегінде орналастырылған GNSS пункттері мен түйіндік реперлерді қамтитын жергілікті бақылау желісі құрылды. Желінің конфигурациясы зерттелетін карьер бортының кеңістіктік қамтылуын қамтамасыз етіп, жергілікті деформациялық көріністерді де, олардың кеңістіктік-уақыттық өзгергіштігін де тіркеуге мүмкіндік берді. Бақылау пункттерін орналастыру карьердің геометриясын, кемерлердің орналасуын және деформациялық үдерістердің болжамды даму бағыттарын ескере отырып жүзеге асырылды.

GNSS-мониторингтің негізгі міндеті зерттелетін учаске шегінде кеңістіктік таралған беткі деформациялардың бар-жоғын анықтау болды.

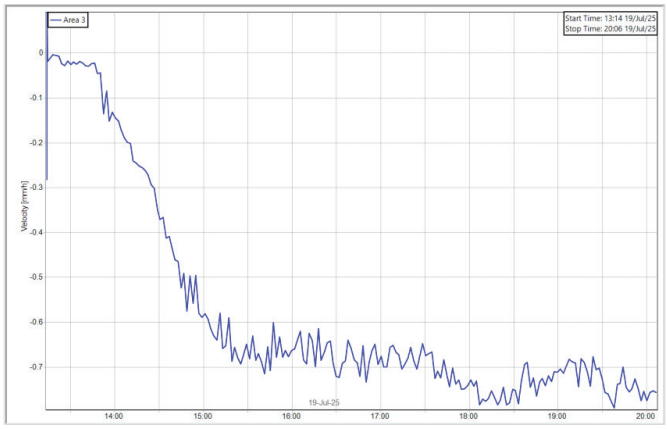
Анықталған деформациялық үдерістерді интерпретациялау үшін RS3 бағдарламалық кешенінде карьердің геометриясын, жер бедерінің цифрлық моделін, массивтің құрылымдық ерекшеліктерін, жарықшақтылық аймақтарын және гравитациялық жүктемені қамтитын тау жыныстары массивінің үшөлшемді соңғы элементтік моделі әзірленді [9]. Бастапқы кезеңде модельге бұзылмаған тау жыныстарының зертханалық сипаттамалары енгізілді, алайда есептеу нәтижелері деформациялардың іс жүзінде толық дерлік жоқтығын көрсетті, бұл радиолокациялық мониторинг



Сурет 3. Зерттелетін учаске шегіндегі ҒНСЖ пункттері мен бақылау желісінің орналасу сұлбасы.
Figure 3. Layout of GNSS Stations and the monitoring network within the study area.
Рис. 3. Схема расположения ГНСС пунктов и сети наблюдений в пределах исследуемого участка.



Сурет 4. Карьердің оңтүстік борты шегіндегі GB-SAR деректері бойынша LOS-ығысулардың кеңістіктік таралуы.
Figure 4. Spatial distribution of LOS displacements derived from GB-SAR data within the southern slope of the open-pit mine.
Рис. 4. Пространственное распределение LOS-смещений по данным GB-SAR в пределах южного борта карьера.



Сурет 5. GB-SAR деректері бойынша Area 3 жергілікті деформациялық аймағы үшін ығысу жылдамдықтарының уақыттық қатары.
Figure 5. Time series of displacement velocities for the Area 3 local deformation zone based on GB-SAR data.
Рис. 5. Временной ряд скоростей смещений для локальной деформационной зоны Area 3 по данным GB-SAR.

деректеріне сәйкес келмеді. Осыған байланысты модельге кері талдау әдісі арқылы параметрлік калибрлеу жүргізілді, оның барысында геомеханикалық параметрлерді түзету деформациялық аномалияның локализациясын, ығысулардың таралу сипатын және пластикалық аймақтардың конфигурациясын ескере отырып жүзеге асырылды [10].

Модельдеудің негізгі міндеті локализацияланған деформациялық аймақтың қалыптасу механизмін анықтау болды.

Зерттеу нәтижелері

Радиолокациялық мониторинг нәтижелері карьердің оңтүстік бортының төменгі бөлігінде локализацияланған деформациялық аймақтың бар екенін көрсетті.

Ығысулардың кеңістіктік таралуы карьер бортының төменгі бөлігінде деформациялық белсенділіктің айқын локализациясын көрсетеді, бұл массивтің терең әлсіреуінің ықтимал аймағының қалыптасуын білдіреді [11].

Анықталған деформациялық аймақ LOS- ығысулардың тұрақты артуымен, деформациялардың кеңістіктік градиенттерінің шоғырлануымен, ығысулардың таралуының жергілікті сипатымен және радиолокациялық сигналдың жоғары тұрақтылығымен сипатталды. Зерттелетін борттың қалған бөлігі айқын жергілікті белсенділену белгілерінсіз салыстырмалы түрде тұрақты фондық деформациялық режиммен сипатталды.

Ерекше маңыздысы, анықталған жергілікті аномалия GNSS-бақылаулар деректері бойынша айқын беткі шөгулермен қатар жүрмеді. Осылайша, еңістің жергілікті деформациялық белсенділігі ауқымды беткі тұрақсыздықтың айқын белгілері болмаған жағдайда байқалды.

Ығысулардың уақыттық қатарын талдау кездейсоқ шу сипатындағы тербелістер белгілерінсіз локализацияланған деформациялық үдерістің тұрақты дамуын көрсетті. LOS-ығысулардың біртіндеп жинақталуы карьердің оңтүстік борты шегінде деформациялық белсенділіктің тұрақты кинематикалық аймағының қалыптасуын көрсетеді. Алынған нәтижелерді интерпретациялау бақыланған жергілікті деформациялық белсенділікті тұрақсыздықтың бастапқы даму кезеңіндегі массивтің квазистационарлық кернеулік-деформациялық күйінің көрінісі ретінде қарастыруға мүмкіндік береді.

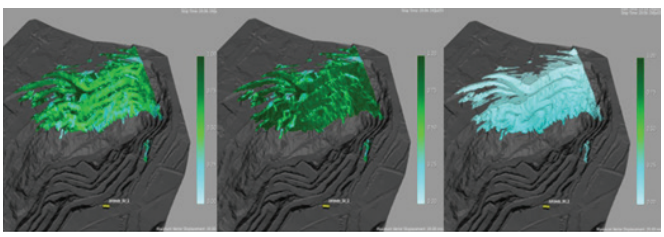
Геомеханикалық модельді калибрлегеннен кейін массивте радиолокациялық аномалия аймағымен кеңістіктік байланысқан айқын терең пластикалық деформациялар аймағы анықталды.

Пластикалық үдерістердің ең қарқынды дамуы GB-SAR арқылы тіркелген локализацияланған ығысулар

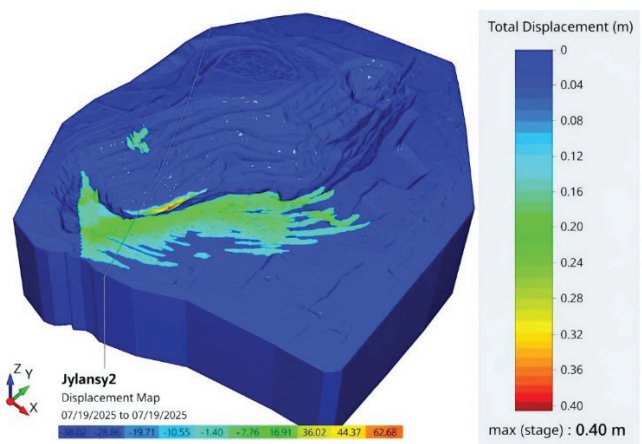
учаскесінен төмен орналасқан аймақта байқалды, бұл беткі деформациялық белсенділіктің массив ішіндегі кернеулердің терең қайта бөлінуімен байланысты екенін көрсетеді.

Модельдеу сондай-ақ бақылау кезеңінде әлі карьер бортының айқын тұрақсыздығы түрінде байқалмаған ықтимал сырғу бетінің біртіндеп қалыптасуын көрсетті.

Анықталған деформациялық аномалияның сенімділігін қосымша бағалау мақсатында радиолокациялық жүйенің ығысу векторының әртүрлі компоненттеріне сезімталдығына кеңістіктік талдау жүргізілді.



Сурет 6. Ығысу векторының әртүрлі модельдері үшін IBIS ArcSAR жүйесінің сезімталдық карталары.
Figure 6. Sensitivity maps of the IBIS ArcSAR system for different displacement vector models.
Рис. 6. Карты чувствительности системы IBIS ArcSAR для различных моделей вектора смещения.



Сурет 7. GB-SAR бойынша анықталған жергілікті деформациялық аномалия мен массивтің 3D FEM-модельдеу нәтижелерінің кеңістіктік сәйкестігі.
Figure 7. Spatial correlation between the local deformation anomaly detected by GB-SAR and the results of 3D FEM modeling of the rock mass.
Рис. 7. Пространственное сопоставление локальной деформационной аномалии GB-SAR и результатов 3D FEM-моделирования массива.

Осы кезеңнің негізгі ерекшелігі еңістегі жергілікті деформациялардың қатар байқалуы, массив ішінде терең пластикалық аймақтың дамуы және айқын өңірлік беткі деформациялардың болмауы болып табылады, бұл тұрақсыздықтың қалыптасуының бастапқы кезеңінің жасырын сипатын көрсетеді. Зерттелген жағдайда GB-SAR әдісімен тіркелген жергілікті деформациялық белсенділік өңірлік беткі шөгулердің дамуына дейін байқалды, бұл олардың кейіннен жер бетінде көрініс табуымен салыстырғанда массив ішіндегі кернеулердің қайта бөлінуі мен пластикалық аймақтардың қалыптасу үдерістерінің ертерек дамитынын көрсетеді [12].

Алынған деректер GB-SAR әдісінің ерте кезеңдегі жергілікті деформацияларға жоғары сезімталдығын растайды және жергілікті радиолокациялық аномалияларды массивтің жасырын терең әлсіреуінің ақпараттық белгісі ретінде қарастыруға болатынын көрсетеді. Бұл ретте жергілікті ығысуларды анықтау ғана емес, сондай-ақ бақыланатын деформациялар мен терең пластикалық аймақтың дамуы арасындағы байланысты анықтауға мүмкіндік беретін FEM-модельдеу негізіндегі олардың геомеханикалық интерпретациясы да принциптік тұрғыдан маңызды болып табылады. GB-SAR мониторингі мен сандық модельдеуді интеграциялау еңістердің ықтимал тұрақсыздығын ерте диагностикалау мүмкіндігін қамтамасыз етеді.

Қорытынды

Жұмыста GB-SAR мониторингі, GNSS-бақылаулар және үшөлшемді геомеханикалық модельдеу деректерін бірлесіп талдау негізінде массивтің терең әлсіреуінің жасырын аймақтарын ерте анықтаудың интеграцияланған тәсілі ұсынылды.

GB-SAR әдісімен тіркелетін жергілікті деформациялық аномалиялар айқын өңірлік беткі деформациялар пайда болғанға дейін едәуір ерте туындауы мүмкін және тау жыныстары массиві ішінде терең пластикалық үдерістердің дамуын көрсететіні анықталды.

Зерттеу нәтижелері локализацияланған радиолокациялық деформациялық аномалия мен массивтегі кернеулердің қайта бөлінуінен туындаған жасырын пластикалық деформациялар аймағының қалыптасуы арасындағы кеңістіктік байланысты көрсетті. Жүргізілген зерттеу жергілікті радиолокациялық аномалияларды терең тұрақсыздықтың ерте индикаторы ретінде пайдалану мүмкіндігін растайды және әлеуетті қауіпті аймақтарды диагностикалау үшін GB-SAR мониторингі мен геомеханикалық модельдеуді интеграциялаудың тиімділігін көрсетеді.

Ұсынылған тәсіл тау-кен өндіру кәсіпорындарында геомеханикалық тәуекелдерді ерте ескерту жүйелерін құру кезінде қолданылуы мүмкін.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. *Ірі ауқымды жер қойнауын игеру кезінде тау жыныстары массивінің жай-күйін кешенді мониторингтеу / O. Bazaluk [және т. б.] // Frontiers in Environmental Science. – 2022. – Т. 10. – 852591 (ағылшын тілінде)*
2. *Карьердің борт маңындағы бөлігіндегі тау жыныстары массивінің жай-күйін зерттеу және оның тұрақтылығын басқару / P. Saik [және т. б.] // Frontiers in Earth Science. – 2024. – Т. 12. – 1395418 (ағылшын тілінде)*
3. *Dossymbek D., Mortazavi A. Қазақстандағы Васильков ашық карьерінің солтүстік бортының тұрақтылығын талдау // The Evolution of Geotech – 25 Years of Innovation / ред. R. E. Hammah, T. E. Yacoub, J. Curran, A. McQuillan. – Boca Raton: CRC Press/Balkema, 2022. – Б. 282–288 (ағылшын тілінде)*

4. Chen R., Xu J., Li X. Күрделі геологиялық жағдайлардағы терең карьер еңістерінің деформация механизмдерін сандық зерттеу // Computers and Geotechnics. – 2025. – Т. 176. – 106102 (ағылшын тілінде)
5. Sun W., Zhang P., Luo Y. Ашық карьерлердегі геотехникалық тәуекелдерді бағалауға арналған GNSS және LiDAR мониторингін біріктіру // Sensors. – 2024. – Т. 24. – № 6. – 2145 (ағылшын тілінде)
6. Xu Q., Dong X., Huang R. Спутниктік позициялау технологияларын біріктіру негізіндегі еңіс деформацияларын нақты уақыт режимінде геодезиялық мониторингтеу // Measurement. – 2025. – Т. 248. – 115982 (ағылшын тілінде)
7. Pieraccini M. Жерүсті радиолокациялық интерферометрия: библиографиялық шолу // Remote Sensing. – 2019. – Т. 11. – № 9. – 1029 (ағылшын тілінде)
8. GB-SAR деректері бойынша еңіс деформацияларын геокодтау және қолдану мәселелеріне шолу / H. Zhang [және т. б.] // Measurement. – 2025. – Т. 289. – 114016 (ағылшын тілінде)
9. Kainthola A., Verma D., Gupte S. Тау-кен қазбаларындағы еңістердің тұрақтылығын талдаудың сандық әдістеріне шолу // Arabian Journal of Geosciences. – 2023. – Т. 16. – 455 (ағылшын тілінде)
10. Жыланды кен орындары тобын бірлесіп игеру кезіндегі кернеулі-деформацияланған күйді сандық модельдеу / G. Meirambek [және т. б.] // ES Energy and Environment. – 2025. – Т. 31. – 1909 (ағылшын тілінде)
11. Stead D., Eberhardt E. Сандық модельдеу әдістерін қолдану арқылы күрделі жыныс еңістерінің деформациясы мен бұзылуын сипаттаудың заманауи тәсілдері // Engineering Geology. – 2023. – Т. 317. – 107012 (ағылшын тілінде)
12. Ығысу аймағын анықтау үшін радиолокациялық бақылаулар негізінде тау жыныстары массивін кешенді геомеханикалық модельдеу / G. Meirambek [және т. б.] // Engineered Science. – 2026. – Т. 41. – 2227 (ағылшын тілінде)

REFERENCES

1. Integrated monitoring for the rock mass state during large-scale subsoil development / O. Bazaluk et al. // Frontiers in Environmental Science. – 2022. – Vol. 10. – Article 852591 (in English)
2. Investigation of the rock mass state in the near-wall part of the quarry and its stability management / P. Saik et al. // Frontiers in Earth Science. – 2024. – Vol. 12. – Article 1395418 (in English)
3. Dossymbek, D., Mortazavi, A. North wall stability analysis of Vasilkovskoye open pit Kazakhstan // In: Hammah, R.E., Yacoub, T.E., Curran, J., McQuillan, A. (Eds.). The Evolution of Geotech – 25 Years of Innovation. CRC Press/Balkema, 2022. – P. 282–288 (in English)
4. Chen R., Xu J., Li X. Numerical investigation of deformation mechanisms in deep open-pit slopes under complex geological conditions // Computers and Geotechnics. – 2025. – Vol. 176. – Article 106102 (in English)
5. Sun W., Zhang P., Luo Y. Integrated GNSS and LiDAR monitoring for geotechnical risk assessment in open-pit mines // Sensors. – 2024. – Vol. 24. – No. 6. – Article 2145 (in English)
6. Xu Q., Dong X., Huang R. Real-time geodetic monitoring of slope deformation using integrated satellite positioning technologies // Measurement. – 2025. – Vol. 248. – Article 115982 (in English)
7. Pieraccini M. Ground-Based Radar Interferometry: A Bibliographic Review // Remote Sensing. – 2019. – Vol. 11. – No. 9. – Article 1029 (in English)
8. Research on GB-SAR slope deformation geocoding and application review / H. Zhang et al. // Measurement. – 2025. – Vol. 289. – Article 114016 (in English)
9. Kainthola A., Verma D., Gupte S. A review of numerical approaches for slope stability analysis in mining excavations // Arabian Journal of Geosciences. – 2023. – Vol. 16. – Article 455 (in English)
10. Numerical Modelling of Stress-Strain State During Combined Mining of Zhilandy Group of Deposits / G. Meirambek et al. // ES Energy and Environment. – 2025. – Vol. 31. – Article 1909 (in English)
11. Stead D., Eberhardt E. Developments in the characterization of complex rock slope deformation and failure using numerical modeling techniques // Engineering Geology. – 2023. – Vol. 317. – Article 107012 (in English)
12. Integrated geomechanical modeling of the rock mass based on radar observations for identifying the displacement zone / G. Meirambek et al. // Engineered Science. – 2026. – Vol. 41. – Article 2227 (in English)

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Комплексный мониторинг состояния массива горных пород при крупномасштабном освоении недр / O. Bazaluk [и др.] // Frontiers in Environmental Science. – 2022. – Т. 10. – Ст. 852591 (на английском языке)
2. Исследование состояния массива горных пород в прибортовой части карьера и управление его устойчивостью / P. Saik [и др.] // Frontiers in Earth Science. – 2024. – Т. 12. – Ст. 1395418 (на английском языке)
3. Dossymbek D., Mortazavi A. Анализ устойчивости северного борта Васильковского карьера (Казахстан) // В кн.: The Evolution of Geotech – 25 Years of Innovation / под ред. R. E. Hammah, T. E. Yacoub, J. Curran, A. McQuillan. Boca Raton: CRC Press/Balkema, 2022. – С. 282–288 (на английском языке)
4. Chen R., Xu J., Li X. Численное исследование механизмов деформирования глубоких карьерных откосов в сложных геологических условиях // Computers and Geotechnics. – 2025. – Т. 176. – Ст. 106102 (на английском языке)
5. Sun W., Zhang P., Luo Y. Интегрированный мониторинг GNSS и LiDAR для оценки геотехнических рисков на открытых горных работах // Sensors. – 2024. – Т. 24. – № 6. – Ст. 2145 (на английском языке)
6. Xu Q., Dong X., Huang R. Геодезический мониторинг деформаций откосов в режиме реального времени с использованием интегрированных спутниковых технологий позиционирования // Measurement. – 2025. – Т. 248. – Ст. 115982 (на английском языке)
7. Pieraccini M. Наземная радиолокационная интерферометрия: библиографический обзор // Remote Sensing. – 2019. – Т. 11. – № 9. – Ст. 1029 (на английском языке)
8. Обзор методов геокодирования деформаций откосов и практического применения GB-SAR / H. Zhang [и др.] // // Measurement. – 2025. – Т. 289. – Ст. 114016 (на английском языке)
9. Kainthola A., Verma D., Gupte S. Обзор численных подходов к анализу устойчивости откосов в горных выработках // Arabian Journal of Geosciences. – 2023. – Т. 16. – Ст. 455 (на английском языке)
10. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния при комбинированной разработке месторождений Жиландинской группы / G. Meirambek [и др.] // ES Energy and Environment. – 2025. – Т. 31. – Ст. 1909 (на английском языке)

11. *Stead D., Eberhardt E. Развитие методов характеристики сложных деформаций и разрушений скальных откосов с использованием численного моделирования // Engineering Geology. – 2023. – Т. 317. – Ст. 107012 (на английском языке)*
12. *Интегрированное геомеханическое моделирование массива горных пород на основе радиолокационных наблюдений для выявления зоны смещений / G. Meirambek [и др.] // Engineered Science. – 2026. – Т. 41. – Ст. 2227 (на английском языке)*

Авторлар туралы мәліметтер:
Мейрамбек Г., т. ғ. к., профессор, «Маркшейдерлік іс және геодезия» кафедрасы, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті (Алматы қ., Қазақстан), *g.meirambek@satbayev.university;* https://orcid.org/0000-0002-8869-5497
Карел Вах, Фотограмметриялық білім беру және құрылыс институтының бас директоры (Прага қ.,Чехия), *vach@eurogv.cz;* https://orcid.org/0009-0001-7575-9105
Адильбекова Л. Қ., докторант, «Маркшейдерлік іс және геодезия» кафедрасы, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті (Алматы қ., Қазақстан), *l.adilbekova@satbayev.university;* https://orcid.org/0009-0008-8308-0793
Нуржусупова А. Н., докторант, «Маркшейдерлік іс және геодезия» кафедрасы, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті (Алматы қ., Қазақстан), *nurzhusupovaalima@gmail.com;* https://orcid.org/0009-0005-1712-3837

Information about the authors:
Meirambek G., Candidate of Technical Sciences, Professor, Department of Mine Surveying and Geodesy, K. I. Satbayev Kazakh National Research Technical University (Almaty, Kazakhstan)
Karel Vach, Chief Executive Officer of the Institute of Photogrammetric Education and Construction (Prague, Czech Republic)
Adilbekova L. K., Ph.D student, Department of Mine Surveying and Geodesy, K. I. Satbayev Kazakh National Research Technical University (Almaty, Kazakhstan)
Nurzhussupova A. N., Ph.D student, Department of Mine Surveying and Geodesy, K. I. Satbayev Kazakh National Research Technical University (Almaty, Kazakhstan)

Сведения об авторах:
Мейрамбек Г., к. т. н., профессор кафедры «Маркшейдерское дело и геодезия», Казахский национальный исследовательский технический университет им. К. И. Сатпаева (г. Алматы, Казахстан)
Карел Вах, генеральный директор, «Институт фотограмметрического образования и строительства» (г. Прага, Чехия)
Адильбекова Л. Қ., докторант кафедры «Маркшейдерское дело и геодезия», Казахский национальный исследовательский технический университет им. К. И. Сатпаева (г. Алматы, Казахстан)
Нуржусупова А. Н., докторант кафедры «Маркшейдерское дело и геодезия», Казахский национальный исследовательский технический университет им. К. И. Сатпаева (г. Алматы, Казахстан)