

**ГОРНЫЙ
ЖУРНАЛ КАЗАХСТАНА**

зарегистрирован Министерством культуры и
информации Республики Казахстан 04.04.2013 г.
Свидетельство о постановке на учет периодического
печатного издания 13508-Ж.

Издается с января 2003 г.

Приказом № 603 от 12.07.2024 г. Комитета по контролю
в сфере образования и науки МОН РК внесен в перечень
научных изданий, рекомендуемых для публикации
основных результатов научной деятельности.

*В журнале публикуются материалы, отражающие
состояние и перспективы развития геологии, горного дела
и металлургии не только в нашей стране, но и за рубежом.
Журнал освещает проблемы охраны труда и техники
безопасности, экономики, подготовки кадров и других
вопросов, связанных с горно-металлургическим комплексом.
В журнале представлены статьи прикладного характера,
результаты фундаментальных исследований, служащие
основой для новых технических разработок.*

*При перепечатке материалов ссылка
на Горный журнал Казахстана обязательна.
Ответственность за достоверность сведений
в публикуемых статьях и рекламных материалах несут
авторы и рекламодатели. Мнение редакции не всегда
может совпадать с мнением авторов.*

Адрес редакции:
050026, г. Алматы, ул. Карасай батыра, 146, оф. 401,
+7 (747) 343-15-02
minmag.kz

Представитель журнала на специализированных
мероприятиях – Общество с ограниченной
ответственностью «Маркетинг от Тимченко»

Представители журнала:

Республика Узбекистан –
ШЕРЗОД ВАФО-ОГЛЫ КАРИМОВ
karimov20-13@mail.ru

Российская Федерация, Москва –
ИРИНА ЯРОПОЛКОВНА ШВЕЦ
shvetsirina@yandex.ru

Российская Федерация, Сибирский регион –
ЮРИЙ НИКОЛАЕВИЧ ШАПОШНИК
shaposhnikyury@mail.ru

Периодичность 12 номеров в год

Тираж 1500 экземпляров

ISSN 2227-4766

Подписной индекс **75807** в каталогах:
АО «Казпочта»,
ТОО «Агентство «Евразия пресс»

Подписано в печать 30.06.2025 г.

Отпечатано:

«Print House Geronа»
ул. Сатпаева 30А/3, офис 124
тел: + 7 727 250-47-40,
+ 7 727 398-94-59,
факс: + 7 727 250-47-39

УЧРЕДИТЕЛЬ И СОБСТВЕННИК
ТОО «Научно-производственное
предприятие «ИНТЕРРИН»



INTERRIN

Главный редактор

М.Ж. БИТИМБАЕВ, mbitimbaev@mail.ru

Заместитель гл. редактора

Л.А. КРУПНИК, leonkr38@mail.ru

Заместитель гл. редактора

Х.А. ЮСУПОВ, yusupov_kh@mail.ru

Ответственный редактор

Т.С. ДОЛИНА, Tatyana.Dolina@interrin.kz

Редакционная коллегия:

Fathi Habashi (Canada), Dr. techn. [Vienna], Dr.h.c. [St. Petersburg],
Dr.h.c. [National Tech Univ, Lima], Dr.h.c. [San Marcos Univ, Lima]

Fidelis Tawiah Suorineni, PhD, Professor of Mining Engineering

Барменшинова М.Б., канд. техн. наук, ассоц. профессор

Бекботаева А.А., PhD, ассоц. профессор

Белин В.А., д-р техн. наук, профессор (Россия)

Бондаренко В.И., д-р техн. наук, профессор (Украина)

Буктуков Н.С., д-р техн. наук, профессор, академик

Воробьев А.Е., д-р техн. наук, профессор (Россия)

Галиев С.Ж., д-р техн. наук, профессор

Демин В.Ф., д-р техн. наук, профессор

Едильбаев А.И., д-р техн. наук

Жанибеков Б.О., д-р философии геол.-мин. наук, доцент

Каплунов Д.Р., д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель
науки и техники (Россия)

Каримов Ш.В., PhD (Узбекистан)

Лось В.Л., д-р геол.-минерал. наук, профессор

Молдабаев С.К., д-р техн. наук, профессор

Насиров У.Ф., д-р техн. наук, профессор (Узбекистан)

Нифадьев В.И., д-р техн. наук, профессор

Нурпеисова М.Б., д-р техн. наук, профессор

Ольшанский Е.Н., член-корреспондент МАИН

Петров Е.А., д-р техн. наук, профессор

Ратов Б.Т., д-р техн. наук, профессор

Рысбеков К.Б., канд. техн. наук, профессор

Столповских И.Н., д-р техн. наук, профессор

Тамбиев П.Г., канд. техн. наук

Туробов Ш.Н., PhD, доцент

Хайитов О.Г., д-р геол.-минерал. наук, профессор

Хамидов Р.А., PhD, доцент

Шодиев А.Н., д-р техн. наук, доцент

Чепуштанова Т.А., PhD

® – статья на правах рекламы

① – информационное сообщение

 – статья публикуется в авторской редакции

3 Колонка главного редактора

Геология

4 Актоғай мыс-порфирлі кен орнының мысалында гидротермиялық өзгерген аймақтарды жіктеу үшін машиналық оқыту алгоритмдерін қолдану

*Э.О. Орынбасарова, *Б. Адебиет, О. Байтурбай, М.К. Закария*

12 Медно-порфировые месторождения Кордильерского (США) и Центрально-Казахстанского рудных поясов: влияние тектонических условий на рудообразование

Геодезия

20 Multispectral analysis of ASTER data for remote sensing of porphyry copper deposits

**М.А. Alpysbay, А.В. Umirbaeva, Zh. Kozhaev, N. Mussakhan*

27 Перспективы применения спутникового нивелирования в условиях Республики Казахстан

*Ф.А. Илиуф, *Т.С. Садыкова, А.Т. Камза, С.Ж. Бейсенбаева*

35 Сравнение цифровых моделей рельефа на примере склона международного комплекса лыжных трамплинов «Сункар»

43 Оценка точности математических методов картирования геологических объектов

**А. Ильясова, Д.Э. Урманова, Э.Б. Серикбаева, С.В. Турсбеков*

50 Определение вертикального градиента силы тяжести

*А. Ержанқызы, *С. Нурақынов, А. Бермуханова, М. Қожахметов*

55 Построение базы данных гравиметрической информации для модели геоида Казахстана

*А. Kenesbayeva, *E.I. Kuldeev, E.O. Shalenov, T.B. Nurpeissova*

61 Application of the kriging method for gravity data interpolation

67 АММ 2025. Как прошло главное событие казахстанского ГМК ①

69 Юбилейный «Золотой гефест»: в год рабочих профессий страна чествует лучших специалистов горно-металлургической отрасли ①

72 Требования к оформлению и условия предоставления статей

КОЛОНКА ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА



**Марат
Жакупович
Битимбаев**
главный редактор

*Дорогие читатели!
Уважаемые коллеги!*

Наступило лето. Каким оно будет, прогнозируется сейчас в достаточно совпадающем с действительностью режиме с допускаемыми отклонениями, поэтому метеорология как наука становится поучительной дисциплиной для геологов и горняков.

Если мы можем точно прогнозировать атмосферные явления и погоду, которые зависят в планетарном и крупнорегиональном масштабе от действующих законов материального мира природы, нам понятно, что сравнительный анализ для геологии рудообразования и тектонических процессов можно также осуществлять, достаточно точно выводя ожидаемые результаты. На таком постулате может быть построена горнопромышленная геология и следом за ней технологическая минералогия.

Ожидаемое в будущем региональное (в уменьшенном местном районировании) управление рудообразованием, особенно посредством использования вулканогенных флюидов, в том числе под потухшими вулканами – это важнейшая задача, которую следует решать с использованием второго начала термодинамики и направленного бурения скважин, назначаемых для целей выпуска, предварительного охлаждения, перепуска по каналам различного назначения с целью безопасного использования флюидов.

Начав с прогноза погоды, мы вышли на прогнозы управления производством металлов. Деятельность людей в этом направлении должна усиливаться и усложняться, потому что минерально-сырьевая база полезных ископаемых не бесконечна, а рудообразование – процесс долгий даже в геологическом масштабе времени.

Но лето неумолимо. Оно несет не только погоду и ожидания трудового отпуска, окончания школьного сезона, переход в следующие классы и курсы. Нам было всем полезно вспомнить, что 1-го июня – День защиты детей, 15-го июня – День медицинского работника.

Обе эти категории – это важнейшие среди народонаселения люди, которым мы обязаны и будущим благополучием, и сегодняшним здоровьем.

Будем ценить детей и медиков, которые незаметно для себя создают действительность вокруг нас. Не будем забывать, что мы тоже выросли из детей, что стать взрослыми нам помогли медики.

Будем их любить и всегда помнить, как трудно быть ребенком и в будущем медиком, потому что это самые ответственные вместе с учителями люди на Земле.

Код МРНТИ 38.49.31

Э.О. Орынбасарова, *Б. Адебиев, О. Байтурбай, М.К. Закария
Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан)

АҚТОҒАЙ МЫС-ПОРФИРЛІ КЕН ОРНЫНЫҢ МЫСАЛЫНДА ГИДРОТЕРМИЯЛЫҚ ӨЗГЕРГЕН АЙМАҚТАРДЫ ЖІКТЕУҮҮШІН МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУ АЛГОРИТМДЕРІН ҚОЛДАНУ

Аннотация. Мақалада Ақтоғай мыс-порфирлі кен орнын мысалға ала отырып, гидротермалды өзгерген аймақтарды жіктеу үшін машиналық оқыту алгоритмдерін қолдану нәтижелері қарастырылады. Зерттеу ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) спутнигінің мультиспектралды деректері, сондай-ақ далалық және зертханалық зерттеу нәтижелері негізінде жүргізілді. Жіктеу нәтижелері бойынша максималды ықтималдық әдісі ең жоғары тиімділікті көрсетті: жалпы дәлдік – 84,12%, Каппа коэффициенті – 0,79. Ал минималды қашықтық әдісінің дәлдігі 54%-ды, Каппа коэффициенті 0,39-ды құрады. Бұл нәтижелер гидротермалды өзгерген аймақтарды автоматты түрде карталауда машиналық оқыту алгоритмдерінің әлеуетін растайды.

Түйінді сөздер: машиналық оқыту, гидротермиялық өзгерістер, мыс-порфирлі кен орындары, ASTER, максималды ықтималдылық, минималды қашықтық.

Application of machine learning algorithms for classification of hydrothermally altered areas on the example of the Aktogay porphyry copper deposit

Abstract. This article presents the results of applying machine learning algorithms to classify hydrothermally altered zones, using the Aktogay porphyry copper deposit as a case study. The research is based on multispectral data from the ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) satellite, as well as field and laboratory investigations. According to the classification results, the maximum likelihood algorithm demonstrated the highest effectiveness, with an overall accuracy of 84.12% and a Kappa coefficient of 0.79. The minimum distance algorithm showed an accuracy of 54%, with a Kappa coefficient of 0.39. These findings confirm the potential of machine learning algorithms for the automated mapping of hydrothermally altered zones.

Key words: machine learning, hydrothermal alterations, porphyry copper deposits, ASTER, maximum likelihood, minimum distance.

Использование алгоритмов машинного обучения для классификации гидротермально измененных областей на примере медно-порфирового месторождения Актотай

Аннотация. В статье рассматриваются результаты применения алгоритмов машинного обучения для классификации гидротермально измененных зон на примере медно-порфирового месторождения Актотай. Исследование выполнено на основе мультиспектральных данных спутника ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), а также данных полевых и лабораторных исследований. По результатам классификации наивысшую эффективность показал метод максимального правдоподобия: общая точность составила 84,12%, коэффициент Каппа – 0,79. Метод минимального расстояния продемонстрировал точность 54%, при коэффициенте Каппа – 0,39. Полученные результаты подтверждают потенциал алгоритмов машинного обучения для автоматизированного картографирования гидротермально измененных зон.

Ключевые слова: машинное обучение, гидротермальные изменения, медно-порфировые месторождения, ASTER, максимальное правдоподобие, минимальное расстояние.

Кіріспе

Гидротермалды өзгерістер пайдалы қазбалар кен орындарының, әсіресе Қазақстанда кең таралған мыс-порфирлі кен орындарының негізгі индикаторларының бірі болып саналады. Мыс-порфирлі кен орындары филлиттік, аргиллиттік, калийлік және пропилиттік сияқты типтік гидротермалды өзгерген аймақтармен сипатталады. Осындай аймақтарды дәл анықтау және карталау күрделі мәселе болып табылады, ал бұл мәселені тиімді шешу геологиялық барлау және кен өндіру жұмыстарының тиімділігін арттыруға тікелей әсер етеді¹.

Соңғы жылдары геологиялық барлау мақсатында Жерді қашықтықтан зондау (ЖҚЗ) әдістері, оның ішінде мультиспектралды және гиперспектралды түсірілімдерді қолдану белсенді түрде қолданып келеді. Бұл деректер минералдарды карталаудың дәлдігі мен жылдамдығын едәуір арттыруға мүмкіндік береді. Дегенмен мультиспектралды мәліметтерді пайдалануда кездесетін дәстүрлі әдістердің (мысалы, визуалды дешифрлеу, индекстерді есептеу) бірқатар кемшіліктері бар. Атап айтқанда, бұл әдістер спектралдық қолтаңбалары күрделі минералдарды анықтауда жеткілікті дәлдік көрсетпейді, ал талдау нәтижелері субъективтілікке бейім келеді [1].

Соңғы жылдары мұндай мәселелерді шешуде спектралдық мәліметтерден жасырын заңдылықтарды анықтау арқылы талдаудың дәлдігін арттыратын машиналық

оқыту алгоритмдері кеңінен қолданыла бастады [2, 3]. Мысалы, бұл мақалада [4] авторлар ASTER деректері және қолдау векторлық машинасы алгоритмдерін Израильдің Беэр-Шева аймағындағы жер бетінің түрлерін жіктеу үшін қолданды. Тірек векторлары әдісі алгоритмінің ASTER мәліметтерін жіктеу кезінде жоғары тиімділігін көрсетті. Келесі зерттеуде [5] максималды ықтималдылық және минималды қашықтық әдістері салыстырылды. Landsat спутниктік деректері негізінде жерді пайдалану және жер жамылғысын жіктеу негізінде карталау жүргізілді. Нәтижелерге сәйкес, максималды ықтималдылық әдісі жоғары дәлдік көрсетті, ал минималды қашықтық әдісі есептеу тұрғысынан жеңіл болғанымен, жіктеу дәлдігі төмен болды. Бұл зерттеу максималды ықтималдылық алгоритмінің күрделі жіктеу тапсырмалары үшін тиімділігін дәлелдеді.

Сонымен қатар, жекелеген зерттеулердің болғанына қарамастан, Қазақстандағы мыс-порфирлі кен орындарының гидротермалды өзгерген аймақтарын жіктеуде түрлі машиналық оқыту алгоритмдерінің тиімділігін кешенді бағалау әлі жүргізілген жоқ. Осыған байланысты, бұл жұмыстың мақсаты – ASTER мультиспектралды деректері негізінде Ақтоғай мыс-порфирлі кен орны мысалында гидротермалды өзгерген зоналарды жіктеу үшін машиналық оқыту алгоритмдерінің тиімділігін бағалау және оларды салыстырмалы талдау болып табылады.

¹Innотer: ақпараттық нормал. URL: <https://innoter.com/articles/poisk-gidrottermalno-izmenennykh-porod-dlya-vyyavleniya-medno-porfirovyykh-mestorozhdeniy-s-potomshchuyu/> (қаралған күні: 13.03.2025). Қолжетімділік режимі: ашық.

Алынған нәтижелер Қазақстан аумағындағы геологиялық-барлау және кен іздеу жұмыстарының тиімділігін арттыру үшін пайдалы болады, сондай-ақ ұқсас кен орындарындағы гидротермалды өзгерген аймақтарды автоматтандырылған карталауда тиімді машиналық оқыту әдістерін анықтауға мүмкіндік береді.

Әдістері мен материалдары

Зерттеу аумағы. Зерттеу аумағы ретінде Жоңғар-Балқаш қатпарлы жүйесіне кіретін және күрделі геологиялық құрылысымен ерекшеленетін Колдар массивінде орналасқан Ақтоғай мыс-порфирлі кен орны таңдалды. Бұл массивтің геологиялық құрылымы күрделі болып келеді және өңірдегі мыс-порфир типті минералданумен байланысты негізгі объектілердің бірі болып саналады.

Колдар массиві негізінен диориттер мен гранодиориттерден құралған интрузивті лакколит болып табылады. Массивтің ашылған беті батыстан шығысқа қарай шамамен 17 км және жалпы шамамен 75 км² аумақты қамтиды. Геофизикалық зерттеулердің нәтижелері бойынша массивтің 1 мен 2 км-ге дейінгі тереңдіктегі бөліктері шамамен 216 км² аумақты алып жатыр. Массивтің негізгі бөлігі тереңдігі 4,7 км-ге дейін жететін бірнеше желі қалыптастырады, олардың ішіндегі бастысы Ақтоғай және Айдарлы кен орындарының арасында жатыр².

Ақтоғай мыс-порфир кен орны массивтің шығыс бөлігінде орналасқан. Бұл кен орны геологиялық зерттеудің жоғары дәрежесіне және геологиялық барлау жұмыстарының егжей-тегжейлі деректерінің болуына байланысты анықтамалық аудан ретінде таңдалды. Негізгі кен минералдары халькопирит, борнит және халькозинмен ұсынылған. Кендердегі мыстың орташа мөлшері шамамен 0,39%, ал Молибден шамамен 0,01% құрайды [6].

Бастапқы деректер. Бастапқы деректер ретінде ресми Earth Data порталынан алынған бұлттылығы және өсімдік жамылғысы минималды деңгейдегі ASTER мультиспектралды спутниктік дерегі пайдаланылды. Қолданылған деректің түсірілім уақыты 2004 жылдың 14 тамызы, деңгейі L1A. Зерттеу барысында тек көрінетін және жақын инфрақызыл арналары қолданылды. ASTER деректерінің таңдалуы оның гидротермалды өзгерістермен байланысты минералдардың спектралды сипаттамаларын тіркеуге қабілеттілігімен негізделеді. ASTER деректері 14 спектралды арнаны, оның ішінде 3 көрінетін, 6 жақын инфрақызыл және 5 жылулық инфрақызыл диапазондарын қамтиды. ASTER мәліметтерінің маңызды артықшылықтарына тегін қолжетімділік, көрінетін және жақын инфрақызыл арналарында жоғары кеңістіктік ажыратымдылық (15 және 30 м сәйкесінше), сондай-ақ мыс-порфирлі кен орындарына тән минералдарды жіктеу үшін маңызды болып табылатын жақын инфрақызыл арнасында басқа мультиспектралды түсірілімдерге Landsat 8 OLI/TIRS (2 арна) және Sentinel 2 (3 арна) қарағанда көбірек спектралдық арналардың (9 арна) болуын жатқызуға болады.

Бастапқы деректердің маңызды бөлігін әртүрлі дереккөздерінен жиналған бақылау нүктелері базасы құрайды, оның қатарында:

- 103 бақылау нүктесі – «Kaz minerals» компаниясы ұсынған бақылау нүктелері, олар бұрғылау және зертханалық зерттеулер нәтижелеріне негізделген;

- 397 бақылау нүктесі – зерттеу аумағының деталды геологиялық карталарын цифрлау арқылы алынған бақылау нүктелері.

Жалпы алғанда филлиттік аймақ бойынша – 93, аргилиттік – 132, калийлік – 149 және пропилиттік – 126 бақылау нүктелері қолданылды. Бұл деректер машиналық оқыту және жіктеу дәлдігін бағалау үшін қажетті бақылау нүктелері базасын жасау мақсатында пайдаланылды.

Зерттеу әдістері. Зерттеу келесі кезеңдерден тұрады:

- ASTER спутниктік түсірілімінің алдын ала өңделуі ENVI бағдарламалық жасақтамасында жүргізілді және радиометриялық калибрлеу, Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes (FLAASH) әдісін қолдану арқылы атмосфералық түзету кезеңдерін қамтыды.

- Бақылау базасы негізінде ENVI бағдарламалық жасақтамасында қызығушылық аймақтары құрылды. Бұл кезеңде алынған мәліметтер оқыту және бақылау жиынтықтарына бөлінді (80% – оқыту, 20% – бақылау).

- Қызығушылық аймақтары қалыптастырылғаннан кейін олардың өзара айырымдылығы бағаланды. ENVI бағдарламалық жасақтамасында қызығушылық аймақтары арасындағы айырмашылықтарды бағалау үшін айырымдылық матрицасы пайдаланылды [7]. Бұл кезең жоғары бөліну деңгейіне ие класстарды анықтау, сондай-ақ нашар ажыратылатын класстарды біріктіру немесе қайта белгілеу қажеттігін бағалау үшін маңызды құрал болып табылады.

- Жіктеу үшін екі машиналық оқыту алгоритмі қолданылды: минималды қашықтық және максималды ықтималдылық.

Минималды қашықтық алгоритмі бақылау үлгілерінің спектралдық қашықтықтарын негізге ала отырып, жаңа пикселді ең жақын орталыққа жатқызады. Бұл әдіс Евклид қашықтығын есептеу қағидасына негізделеді [8]:

$$D = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(X_j - M_{ij})^2}{S_{ij}^2}}, \quad (1)$$

мұндағы:

X_j – J-диапазонындағы X пикселінің сұр мәні;

M_{ij}, S_{ij} – I-ші j-диапазонының орташа мәні және стандартты ауытқуы;

n – спектралдық арналардың саны.

Бұл алгоритм есептеу жылдамдығы жоғары болғанымен, деректердің статистикалық таралуын есепке алмайды, сондықтан кластар арасындағы қабаттасу жағдайында төмен дәлдік көрсетуі мүмкін.

Максималды ықтималдылық – бұл Байес теоремасына негізделген бақыланатын классификация алгоритмі. Бұл алгоритм апостериорлық ықтималдықты есептеу арқылы пикселді тиісті класқа жатқызады [9]. Әдістің негізі келесі функциямен сипатталады:

²KAZ Minerals: Ақтоғай жобасы. URL: <https://www.kazminerals.com/ru/operations/aktogay/> (қаралған күні: 13.03.2025). Қолжетімділік режимі: ашық.

$$P(i|w) = \frac{P(w|i) \cdot P(i)}{P(w)}, \quad (2)$$

мұндағы:

$P(w|i)$ – ықтималдық функциясы;

$P(i)$ – априорлық ықтималдық, яғни зерттеу аймағында i класстың пайда болу ықтималдығы;

$P(w)$ – w мәнінің кездесу ықтималдығы, ол барлық кластар бойынша ықтималдықтардың қосындысы ретінде есептеледі.

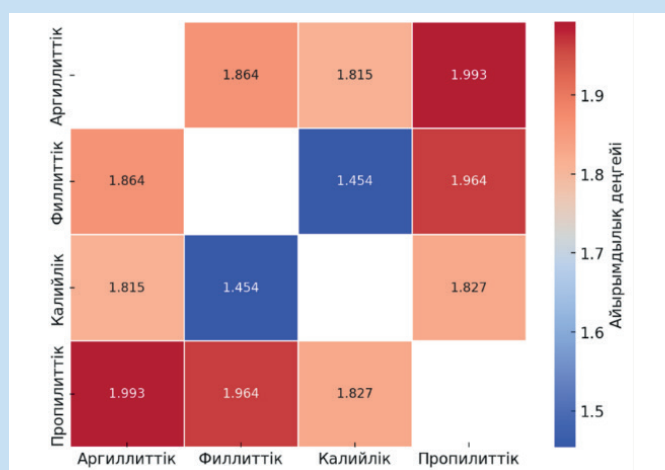
- Жіктеу дәлдігін бағалау үшін жалпы дәлдік, Каппа коэффициенті, өндіруші дәлдігі және пайдаланушы дәлдігі өлшемдері қолданылды. негізгі бағалау метрикалары қолданылды.

Жалпы дәлдік – дұрыс жіктелген пикселдер санының жалпы пикселдер санына қатынасы бойынша есептеледі және жалпы классификация тиімділігін көрсетеді. Бірақ бұл көрсеткіш кездейсоқ сәйкестікті ескермейді, сондықтан Каппа коэффициенті қолданылады. Каппа – барлық кластар бойынша кездейсоқ сәйкестіктің ықтималдығын ескеретін статистикалық өлшем. Каппа коэффициенті 0-ден 1-ге дейінгі аралықта өзгереді, мұнда $\kappa > 0.81$ – өте жоғары дәлдікті, 0.61–0.80 – жоғары дәлдікті, ал 0.41–0.60 – орташа дәлдікті көрсетеді. Жеке кластар үшін өндіруші дәлдігі (белгілі бір класқа жататын пикселдердің дұрыс жіктелу көрсеткіші) және пайдаланушы дәлдігі (белгілі бір класқа жатқызылған пикселдердің шын мәнінде сол класқа тиесілігі көрсеткіші).

- Гидротермалды өзгерген аймақтарды жіктеу қорытынды нәтижелері ArcGIS Pro бағдарламалық жасақтамасында. Нәтижесінде тақырыптық карталар құрылды.

Нәтижелер мен талқылаулар

Зерттеудің алғашқы кезеңінде қызығушылық аймағы айырымдылығын бағалау анализі жүргізілді (сурет 1). Бұл талдау спектралдық тұрғыдан гидротермалды өзгерген аймақтардың айырымдылық деңгейін анықтауға және оларды әрі қарай классификациялау процесінің тиімділігін бағалауға мүмкіндік берді.



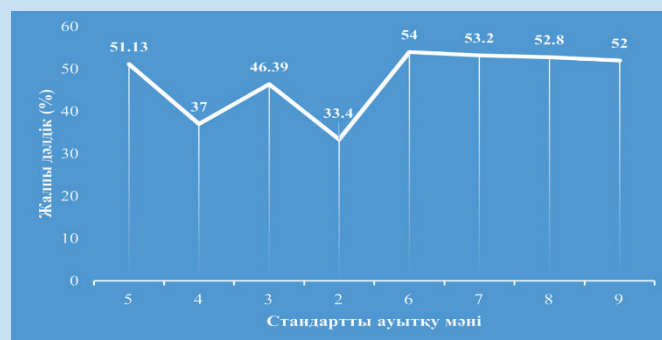
Сурет 1. Класстардың өзара айырымдылық жылу картасы.

Figure 1. Heat map of class separability.

Рис. 1. Тепловая карта разделимости классов.

Өзара айырымдылық талдау нәтижелері көрсеткендей, аргиллиттік, филлиттік және пропилиттік зоналар жоғары спектралдық айырымдылыққа ие, ал калийлік зона басқа зоналармен салыстырғанда айырымдылығы төмен екені анықталды (1.454), бұл оның спектралдық сипаттамаларының басқа класстармен қатты қабаттасатынын көрсетеді.

Келесі зерттеу кезеңінде минималды қашықтық алгоритмі қолданылды. Бұл алгоритмді пайдалана отырып жіктеу сапасының максималды дәлдігіне қол жеткізу үшін стандартты ауытқу параметрі 2 ден 8-ге дейінгі аралықта тексерілді. Сынақ нәтижелері 2-суретте бейнеленген.



Сурет 2. Минималды қашықтық алгоритмі бойынша стандартты ауытқу мәнінің өзгеруіне байланысты жалпы дәлдік динамикасы.

Figure 2. Dynamics of the overall accuracy depending on the change in the standard deviation value according to the minimum distance algorithm.

Рис. 2. Динамика общей точности в зависимости от изменения значения стандартного отклонения по алгоритму минимального расстояния.

Дәлдік талдауы стандартты ауытқу мәнінің 2-ден 6-ға дейінгі аралықта жалпы жіктеу дәлдігінің жоғарылауы байқалатынын көрсетті, жалпы дәлдік стандартты ауытқу 6 болған кезде максималды мәнге жетеді (54%). Стандартты ауытқу мәнін одан әрі арттыру керісінше, жіктеу дәлдігінің төмендеуіне алып келеді. Осылайша, жіктеу дәлдігін бағалау нәтижелері 1-кестеде көрсетілген.

Минималды қашықтық алгоритмі бойынша максималды жалпы дәлдік 54% құрады, ал Каппа коэффициенті 0.37. Сәйкесінше гидротермалды өзгерген аймақтардың картасын құру үшін (сурет 3) филлиттік (67.4%) және пропилиттік (76.01%) аймақтар таңдалды. Аргиллиттік және калийлік аймақтар төмен дәлдік көрсеткіштеріне байланысты есепке алынбады.

Максималды ықтималдылық алгоритмі бойынша нәтижелерді талдау барысында берілген 4-суретте шектік мәнінің өзгеруіне байланысты жалпы дәлдіктің (%) динамикасы көрсетілген. Бұл талдау шектік мәнінің классификация дәлдігіне әсерін анықтауға мүмкіндік береді.

Жоғарыдағы суреттен көрініп тұрғандай, шектік мән 0.05 дейін төмендеген кезде жалпы дәлдік ең жоғары деңгейге жетеді. Одан әрі мәнді төмендету (0.03 немесе 0.01) жіктеу дәлдігіне ешқандай әсер етпейді, яғни 84% деңгейінде тұрақталады. Бұл шектік мәнінің белгілі бір шекке дейін әсері бар екенін және одан төмендегенде жіктеу

Кесме 1

Минималды қашықтық бойынша жіктеу дәлдігін бағалау нәтижелері

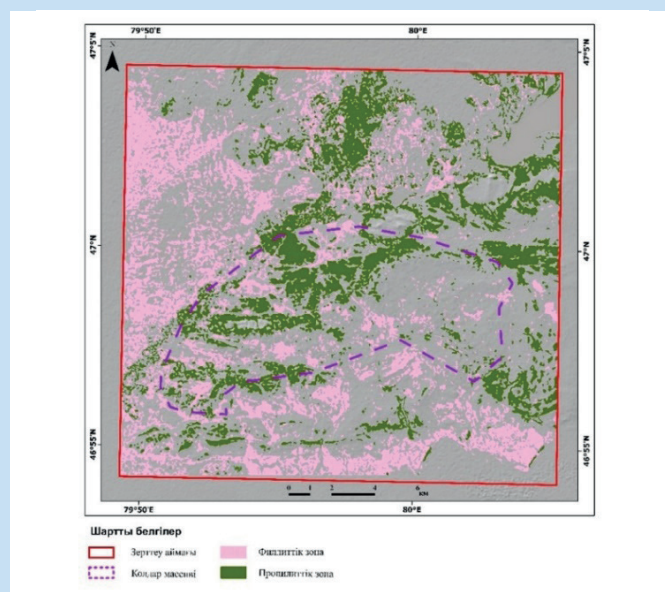
Table 1

The results of the evaluation of classification accuracy using the minimum distance algorithm

Таблица 1

Результаты оценки точности классификации по алгоритму минимального расстояния

Гидротермалды өзгеру аймағы	Комиссия қателігі, %	Өткізіп алу қателігі, %	Өндіруші дәлдігі, %	Пайдаланушы дәлдігі, %
Аргилиттік	64.21	70.94	29.06	35.79
Филлиттік	47.79	17.20	82.80	52.03
Пропилиттік	25.76	22.22	77.78	74.24
Калийлік	40.00	73.83	26.17	60.00

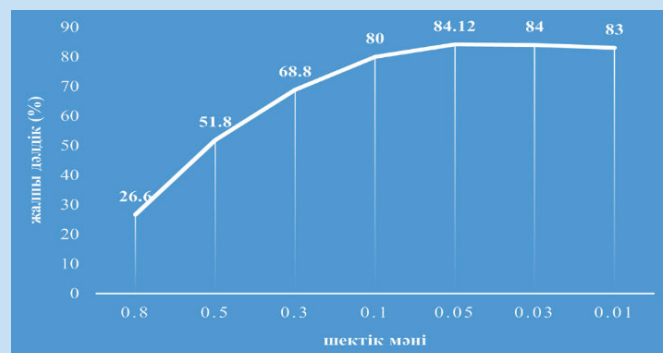


Сурет 3. Минималды қашықтық алгоритмі бойынша гидротермалды өзгерген аймақтар картасы.

Figure 3. A map of hydrothermally altered areas using the minimum distance algorithm.

Рис. 3. Карта гидротермально измененных областей по алгоритму минимального расстояния.

дәлдігіне ықпал етпейтінін көрсетеді. Осылайша, максималды ықтималдылық алгоритмі негізінде гидротермалды өзгерген аймақтарды жіктеу дәлдігін бағалау нәтижелері



Сурет 4. Максималды ықтималдылық алгоритмі бойынша шектік мәнің өзгеруіне байланысты жалпы дәлдік динамикасы.

Figure 4. Dynamics of the overall accuracy depending on the change in the threshold value according to the maximum probability algorithm.

Рис. 4. Динамика общей точности в зависимости от изменения порогового значения по алгоритму максимальной вероятности.

2-кестеде ұсынылған. Бұл бағалау ең оңтайлы шектік мәнді қолдану арқылы алынған нәтижелерге негізделген. Гидротермалды өзгерген аймақтардың картасын құру үшін филлиттік, аргилиттік және пропилиттік зоналардың нәтижелері пайдаланылды (сурет 5).

Максималды ықтималдық әдісі минималды қашықтық әдісімен салыстырғанда жіктеу дәлдігін айтар-

Кесме 2

Максималды ықтималдылық бойынша жіктеу дәлдігін бағалау нәтижелері

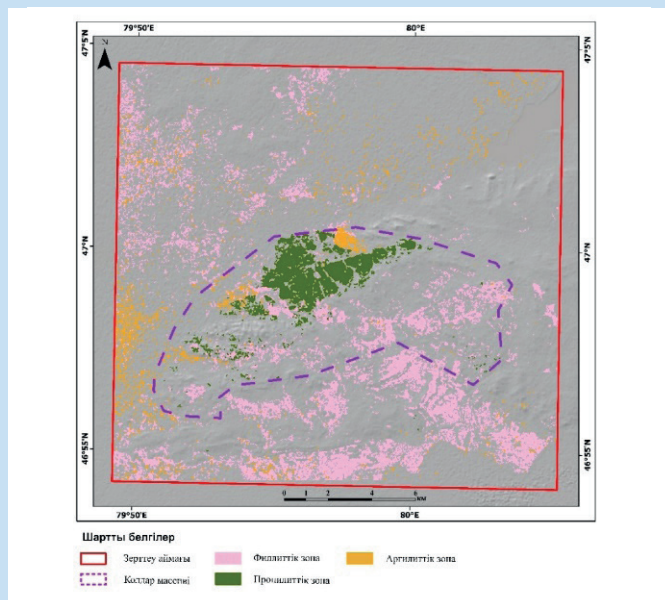
Table 2

The results of the evaluation of the accuracy of classification using the maximum likelihood algorithm

Таблица 2

Результаты оценки точности классификации по алгоритму максимального правдоподобия

Гидротермалды өзгеру аймағы	Комиссия қателігі, %	Өткізіп алу қателігі, %	Өндіруші дәлдігі, %	Пайдаланушы дәлдігі, %
Аргилиттік	0.00	23.93	76.07	100.00
Филлиттік	17.53	13.98	86.02	82.47
Пропилиттік	2.52	7.94	92.06	97.48
Калийлік	15.75	17.45	82.55	84.25



Сурет 5. Максимальды ықтималдылық алгоритмі бойынша гидротермалды өзгерген аймақтар картасы.
Figure 5. A map of hydrothermally altered areas using the maximum likelihood algorithm.

Рис. 5. Карта гидротермально измененных областей по алгоритму максимального правдоподобия.

лықтай жақсартты, жалпы дәлдік көрсеткіші 84.12% құраса, Каппа коэффициенті 0.79 дейін артты. Орташа өндіруші дәлдігі 84.18%-ға дейін жоғарыласа, пайдаланушы дәлдігі 91.05%-ға жетті. Сонымен қатар комиссиялық және өткізіп алу қателері айтарлықтай төмендеді.

Алынған нәтижелерді талдау көрсеткендей, минималды қашықтық алгоритмі қарапайым сызықтық арақашықтық принципіне негізделгендіктен, бұл аймақтың нақты жіктеуін орындауда қиындықтарға тап болды. Бұл әсіресе спектральды айырмашылықтары аз және аралас аймақтарда маңызды фактор болып табылады.

Максимальды ықтималдық әдісі ықтималдық үлестіруді қолдану арқылы әрбір пиксельдің белгілі бір класқа жату ықтималдығын бағалайды, сондықтан ол жоғары спектральды айнымалылармен жұмыс істеуде анағұрлым тиімді болды. Осылайша, калийлік аймақтың төменгі айырымдылық көрсеткіштері және минималды қашықтық әдісінің шектеулері бұл аймақтың финалдық картаға енгізілмеуіне себеп болды. Бұл зерттеу әдісті таңдағанда аймақтың спектральды ерекшеліктерін ескерудің маңыздылығын көрсетеді.

Қорытынды

Жүргізілген зерттеу гидротермалды өзгерген аймақтарды классификациялау үшін машиналық оқыту алгоритмдерін қолданудың тиімділігін растады. Ақтоғай кен орны негізінде максимальды ықтималдық алгоритмінің минималды қашықтыққа қарағанда айтарлықтай артықшылығы көрсетілді, нәтижесінде жалпы дәлдік 84,12%-ға жетті. Бұл әдістің спектральды деректермен неғұрлым тиімді жұмыс істейтінін және кеңістіктік таралу карталарын құруда жоғары нақтылық беретінін дәлелдейді.

Болашақ зерттеулерде классификацияның дәлдігін арттыру және спектральды сипаттамалардың көптірлігін ескеру мақсатында Random Forest (RF), Support Vector Machine (SVM) және нейрондық желілер сияқты күрделі машиналық оқыту алгоритмдерін қолдану жоспарлануда. Сонымен қатар, гиперспектральды деректерді пайдалану маңызды бағыттардың бірі болып табылады, себебі олар минералдарды дәлірек анықтауға және гидротермалды өзгерген аймақтарды жіктеу сапасын жақсартуға мүмкіндік береді. Бұл тәсіл кеңістіктік деректерді өңдеу мен интерпретациялау мүмкіндіктерін кеңейтіп, геологиялық барлау үдерістерін оңтайландыруға ықпал етеді.

Алғыс

Зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитетінің қаржылық қолдауымен жүзеге асырылды (грант №BR21882179).

ПАЙДАЛАНҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Минералдарды мультиспектралды және гиперспектралды қашықтықтан зондау деректері арқылы іздеу әдістері / Ghrefat H. [және т. б.] // *Earth Observation, Geoinformatics for Geosciences*. Elsevier. 2023. Б. 197–222 (ағылшын тілінде)
2. Минералдарды мультиспектралды деректер негізінде тануға арналған машиналық оқыту әдістері / Jahoda P. [және т. б.] // *The Analyst*. 2020. Т. 146. № 1. Б. 184–195 (ағылшын тілінде)
3. SEM/EDS деректерін қолданып, өзен құмдарындағы ауыр минералдарды автоматты классификациялау үшін машиналық оқытуды қолдану / Hao H. [және т. б.] // *Minerals Engineering*. 2019. Т. 143. Б. 105899 (ағылшын тілінде)
4. Zhu G., Blumberg D.G. ASTER деректері мен SVM алгоритмін қолдана отырып жіктеу: Израильдегі Беэр-Шева мысалында // *Remote Sensing of Environment*. 2002. Т. 80. № 2. Б. 233–240 (ағылшын тілінде)
5. Patil M., Desai C., Umrikar B. Жерді пайдалану және жер жамылғысын талдауға арналған суреттерді жіктеу құралы: Максимальды ықтималдық және минималды қашықтық әдістерінің салыстырмалы зерттеуі // *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2020. XLII-3/W10. Б. 605–611 (ағылшын тілінде)
6. Қазақстандағы Ақтоғай мыс-порфир кен орнының геологиясы және кен түзуші сұйықтықтардың эволюциясы / Li C. [және т. б.] // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2018. Т. 165. Б. 192–209

(ағылшын тілінде)

7. Pons X., Cristóbal J., Sanjurjo-Vílchez J. Қашықтықтан зондтау әдебиетіндегі дивергенция және түрлендірілген дивергенция формулалары туралы ескертулер // *Remote Sensing Letters*. 2024. Т. 15. № 11. Б. 1187–1194 (ағылшын тілінде)
8. Li X., Liu L., Huang L. ENVI негізінде бірнеше қашықтықтан зондтау суреттерін жіктеу әдістерінің салыстырмалы талдауы // *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2020. XLII-3/W10. Б. 605–611 (ағылшын тілінде)
9. Ahmad A., Quegan S. Мультиспектралды деректер негізіндегі максималды ықтималдық әдісін талдау // *Applied Mathematical Sciences*. 2012. Т. 6. № 129. Б. 6425–6436 (ағылшын тілінде)

REFERENCES

1. Mineral exploration using multispectral and hyperspectral remote sensing data / Ghrefat H. [et al.] // *Earth Observation, Geoinformatics for Geosciences*. Elsevier. 2023. 97–222 pp. (in English)
2. Learning for recognizing minerals from multispectral data / Jahoda P. [et al.] // *The Analyst*. 2020. V. 146. No. 1. 184–195 pp. (in English)
3. Machine learning application to automatically classify heavy minerals in river sand by using SEM/EDS data / Hao H. [et al.] // *Minerals Engineering*. 2019. V. 143. 105899 p. (in English)
4. Zhu G., Blumberg D.G. Classification using ASTER data and SVM algorithms: The case study of Beer Sheva, Israel // *Remote Sensing of Environment*. 2002. V. 80. No. 2. 233–240 pp. (in English)
5. Patil M., Desai C., Umrikar B. Image classification tool for land use/land cover analysis: A comparative study of maximum likelihood and minimum distance method // *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2020. XLII-3/W10. 605–611 pp. (in English)
6. Geology and ore-forming fluid evolution of the Aktogai giant porphyry Cu 809 deposit, Kazakhstan / Li C. [et al.] // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2018. V. 165. 192–209 pp. (in English)
7. Pons X., Cristóbal J., Sanjurjo-Vílchez J. Some notes on the divergence and transformed divergence formulae in the remote sensing literature // *Remote Sensing Letters*. 2024. V. 15. No. 11. 1187–1194 pp. (in English)
8. Li X., Liu L., Huang L. Comparison of several remote sensing image classification methods based on ENVI // *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2020. XLII-3/W10. 605–611 pp. (in English)
9. Ahmad A., Quegan S. Analysis of maximum likelihood classification on multispectral data // *Applied mathematical sciences*. 2012. V. 6. No. 129. 6425–6436 pp. (in English)

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Минералоразведка с использованием мультиспектральных и гиперспектральных данных дистанционного зондирования / Ghrefat H. [и др.] // *Earth Observation, Geoinformatics for Geosciences*. Elsevier. 2023. С. 197–222 (на английском языке)
2. Машинное обучение для распознавания минералов по мультиспектральным данным / Jahoda P. [и др.] // *The Analyst*. 2020. Т. 146. № 1. С. 184–195 (на английском языке)
3. Применение машинного обучения для автоматической классификации тяжелых минералов в речном песке с использованием данных SEM/EDS / Hao H. [и др.] // *Minerals Engineering*. 2019. Т. 143. С. 105899 (на английском языке)
4. Zhu G., Blumberg D.G. Классификация с использованием данных ASTER и алгоритмов SVM: на примере Беэр-Шева, Израиль // *Remote Sensing of Environment*. 2002. Т. 80. № 2. С. 233–240 (на английском языке)
5. Patil M., Desai C., Umrikar B. Инструмент классификации изображений для анализа землепользования и покрова территории: сравнительное исследование метода максимального правдоподобия и метода минимального расстояния // *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2020. XLII-3/W10. С. 605–611 (на английском языке)
6. Геология и эволюция рудообразующих флюидов гигантского порфирового медного месторождения Актогай, Казахстан / Li C. [и др.] // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2018. Т. 165. С. 192–20 (на английском языке)
7. Pons X., Cristóbal J., Sanjurjo-Vílchez J. Некоторые замечания по формулам дивергенции и преобразованной дивергенции в литературе по дистанционному зондированию // *Remote Sensing Letters*. 2024. Т. 15. № 11. С. 1187–1194 (на английском языке)
8. Li X., Liu L., Huang L. Сравнение нескольких методов классификации изображений дистанционного зондирования на основе ENVI // *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2020. XLII-3/W10. С. 605–611 (на английском языке)

9. Ahmad A., Quegan S. Анализ метода максимального правдоподобия для классификации мультиспектральных данных // *Applied Mathematical Sciences*. 2012. Т. 6. № 129. С. 6425–6436 (на английском языке)

Авторлар туралы мәліметтер:

Орынбасарова Э.О., Ph.D, Геоматика инновациялық орталығының директоры, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан), e.orynbassarova@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0001-6421-4698>

Адебиет Б., Ө.А. Байқоңыров атындағы Тау-кен металлургия институтының «Маркшейдерлік іс және геодезия» кафедрасының докторанты, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан), 980104351171-d@stud.satbayev.university; <https://orcid.org/0009-0005-0508-018X>

Байтурбай О., з.ғ.м., Ө.А. Байқоңыров атындағы Тау-кен металлургия институтының Маркшейдерлік іс және геодезия кафедрасының ассистенті, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан), o.baiturbay@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0002-7654-2610>

Закария М.К., Ph.D, К. Тұрысов атындағы геология және мұнай-газ ісі институтының «Мұнай-газ және кен геофизикасы» кафедрасының оқытушысы, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан), zakariya.maksat@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0002-6971-9710>

Information about the authors:

Orynbassarova E.O., Ph.D, Associate Professor, Director of the Geomatics Innovation Center, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Adebiyet B., Ph.D student at the Department of SaG, of the Mining and Metallurgical Institute named after O.A. Baikonurov of the Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Baiturbay O., Master of Law, Assistant at the Department of SaG, Mining and Metallurgical Institute named after O.A. Baikonurov, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Zakariya M.K., Ph.D Doctor, Lecturer at the Department of «Oil and Ore Geophysics» of the K. Turysov Institute of Geology and Oil and Gas Business, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Сведения об авторах:

Орынбасарова Э.О., Ph.D, директор Инновационного центра геоматики, Satbayev University (г. Алматы, Казахстан)

Адебиет Б., докторант кафедры «Маркшейдерское дело и геодезия» Горно-металлургического института им. О.А. Байконурова, Satbayev University (г. Алматы, Казахстан)

Байтурбай О., м.ю.н., ассистент кафедры МДиГ Горно-металлургического института О.А. Байконурова, Satbayev University (г. Алматы, Казахстан)

Закария М.К., доктор Ph.D кафедры «Нефтегазовая и рудная геофизика» института геологии и нефтегазового дела имени К. Турысова, Satbayev University (г. Алматы, Казахстан)



TECH MINING RUSSIA

www.techmining.ru

7-Я СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ И ВЫСТАВКА

СТРОИТЕЛЬСТВО, МОДЕРНИЗАЦИЯ И ЦИФРОВИЗАЦИЯ ГОРНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

17-18

сентября
2025

Москва

Novotel Moscow City



16+



miningmetals

UZBEKISTAN

19-я Международная выставка
**Горное дело, металлургия
и металлообработка**

2025

28 | 29 | 30 Октября
Ташкент, Узбекистан



Iteca Exhibitions

Тел: +998 71 205 18 18; +998 94 800 18 18

E-mail: mining@iteca.uz; Web: www.mining.uz



Код МРНТИ 38.17.91

А.А. Бекботаева¹, К. Фурлонг², *Д.Н. Талгарбаева¹, Т.Л. Абдуллаева¹¹Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева» (г. Алматы, Казахстан),²Пенсильванский государственный университет (г. Стейт Колледж, США)

МЕДНО-ПОРФИРОВЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ КОРДИЛЬЕРСКОГО (США) И ЦЕНТРАЛЬНО-КАЗАХСТАНСКОГО РУДНЫХ ПОЯСОВ: ВЛИЯНИЕ ТЕКТОНИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА РУДООБРАЗОВАНИЕ

Аннотация. Анализ разломных зон, магматических комплексов и гидротермальных изменений позволил выявить структурно-геологические и минералогические закономерности размещения рудных тел в субдукционных обстановках. Сравнение порфировых систем Центрального Казахстана (позднепалеозойская субдукция) и северо-западных районов США (мезозойско-кайнозойская субдукция) показало сходные рудоконтролирующие факторы: активные разломы, калиевые изменения, кварц-серицитовые ассоциации. Отличия касаются интенсивности изменений, состава рудных минералов и масштаба магматизма. Полевые работы (2019, 2024) включали картирование и отбор образцов, лабораторные анализы охватывали минералогию, петрографию и геохимию. Интеграция данных позволила уточнить условия формирования порфировых систем и выделить признаки перспективных объектов в сходных геодинамических условиях. Результаты применимы для планирования поисков.

Ключевые слова: медно-порфировые месторождения, Центрально-Казахстанский, Кордильерский, тектоника, минералогия, интрузивные комплексы, рудообразование.

Кордильера (АҚШ) және Орталық Қазақстан кен белдеулерінің порфирді мыс кен орындары: тектоникалық жағдайлардың кен түзілуіне әсері

Аннотация. Жарылымдық зоналар, магмалық кешендер мен гидротермальдық өзгерістерді талдау субдукция жағдайларындағы кен денелерінің құрылымдық-геологиялық және минералогиялық заңдылықтарын анықтауға мүмкіндік берді. Қазақстанның орталығындағы (палеозой) және АҚШ-тың солтүстік-батысындағы (мезозой-кайнозой) порфирлік жүйелерді салыстыру ұқсас руданы бақылаушы факторларды көрсетті: белсенді жарылымдар, калийлі өзгеру аймақтары, кварц-серициттік ассоциациялар. Айырмашылықтар гидротермальдық өзгеру қарқындылығы мен кен минералдарының құрамында байқалады. 2019 және 2024 жылдардағы далалық жұмыстар құрылымдық карталау мен үлгілер жинауды қамтыды. Лабораториялық зерттеулер минералогияны, петрографияны және геохимианы талдауды қамтыды. Бұл деректер перспективалы аудандарды анықтауға және геологиялық барлау жұмыстарын жоспарлауға мүмкіндік береді.

Түйінді сөздер: порфирді мыс кен орындары, Орталық Қазақстандық, Кордильералық, тектоника, минералогия, интрузивтік кешендер, кен түзілуі.

Porphyry copper deposits of the Cordilleran (USA) and Central Kazakhstan ore belts: the influence of tectonic conditions on ore formation

Abstract. Analysis of fault zones, magmatic complexes, and hydrothermal alterations revealed structural and mineralogical controls on ore body localization in subduction settings. A comparison between porphyry systems of Central Kazakhstan (Paleozoic subduction) and the northwestern USA (Mesozoic-Cenozoic subduction) shows common ore-controlling factors: active faults, potassic alteration zones, and quartz-sericite associations. Differences lie in the intensity of hydrothermal alteration, ore mineral composition, and the scale of magmatic events. Fieldwork in 2019 and 2024 included structural mapping and sampling, while laboratory studies covered mineralogical, petrographic, and geochemical analyses. The integrated data refined the formation conditions of porphyry systems and identified indicators of prospective areas in similar geodynamic settings. Results are applicable to future exploration planning.

Key words: porphyry copper deposits, Central Kazakhstan, Cordillera, tectonics, mineralogy, intrusive complexes, ore formation.

Введение

Медно-порфировые месторождения традиционно связаны с магматическими дугами, формирующимися в субдукционных зонах, где магмато-гидротермальные процессы концентрируют металлы в рудных телах. Формирование рудных комплексов Центрально-Казахстанского рудного пояса (ЦКРП) происходило в позднем палеозое, когда субдукционные и последующие коллизионные процессы привели к интенсивному магматизму и гидротермальной активности. Однако последующие тектонические деформации изменили пространственное распределение рудных тел, что усложняет их идентификацию и прогнозирование новых месторождений. В отличие от классических субдукционных провинций, ЦКРП испытал разрывные и складчатые деформации, что могло способствовать формированию скрытых или глубоко залегающих рудных систем.

В 2019 году в рамках научно-исследовательской работы, выполненной по технической спецификации ТОО «KAZ Minerals Aktogay», были проведены комплексные исследования, направленные на изучение влияния приразломной тектоники на изменение минерального состава медно-порфирового оруднения месторождения Акто-

гай, а также использовались опубликованные данные по месторождениям США [1]. Полевые данные включают структурные описания, ориентировки зон измененности и отбор проб для лабораторного анализа, минералогический и минераграфический состав пород и руд.

Несмотря на значительный объем исследований, остается недостаточно изученным влияние поздних тектонических перестроек на перераспределение металлов. Большинство моделей рудообразования учитывают только начальные этапы формирования месторождений, тогда как последующая переработка рудных тел может существенно изменять их структуру и минеральный состав. Настоящее исследование направлено на анализ пространственной локализации и сохранности рудных тел в ЦКРП с учетом поздних тектонических процессов. Сравнение с медно-порфировыми месторождениями Кордильерского пояса (США) позволяет выявить общие и региональные закономерности формирования порфировых систем. В работе рассматриваются особенности тектонической эволюции, геохимия, минералогический состав и возраст рудообразования, что позволит уточнить механизмы рудогенеза и предложить новые подходы к прогнозированию месторождений.

Методы и методология

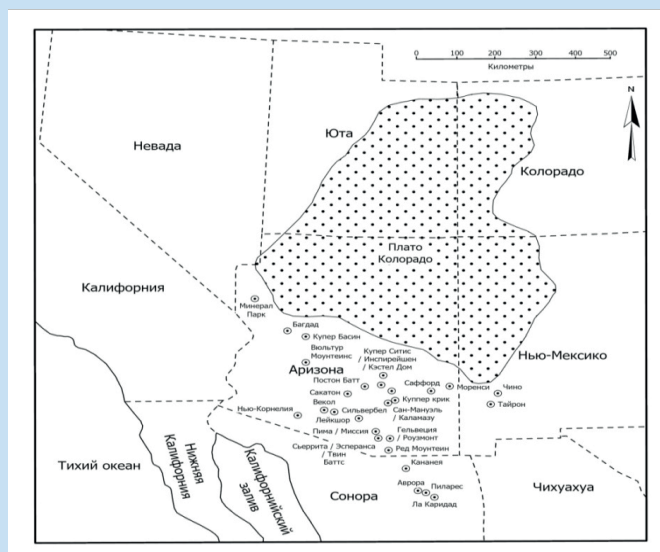
Исследование основано на комплексном подходе, включающем структурно-тектонический, геохимический и петрографический анализ. Основное внимание уделено влиянию субдукционных и посторогенных процессов на перераспределение металлов и формирование рудных тел. Лабораторные исследования, проведенные по итогам двух полевых сезонов – в 2019 году (по проекту ТОО «KAZ Minerals Aktogay») и в 2024 году (в рамках проекта ПЦФ), включали минералогический, петрографический и геохимический анализ горных пород и руд месторождений Актогай и Кызылкия. В исследование вошли роговики, порфириды, кварц-серицитовые и калишпатизированные породы, а также сульфидные руды образцов пород и руд, отобранных в 2019 и 2024 годах, с акцентом на ореолы калишпатизации, кварц-серицитового и пропилитового изменения.

Сравнение месторождений Центрального Казахстана и Северо-Западной Америки выявило схожие закономерности формирования рудных тел, связанные с активными разломами и магматическими комплексами зон субдукции, а также различия в интенсивности гидротермального обогащения. Интеграция полевых данных (структурно-геологическое картирование, описание зон измененности, GPS-привязка проб) и лабораторных исследований позволила уточнить факторы формирования рудных систем и определить критерии прогнозирования новых месторождений, что важно для дальнейших геологоразведочных работ.

Основная часть

Геологическая и тектоническая обстановка. Меднопорфировые месторождения в США сосредоточены вдоль Кордильерского рудного пояса. Этот пояс простирается от Аляски на севере до Мексики на юге, охватывая такие штаты, как Аризона (Моренси, Резолюшен), Юта (Бингем-Каньон), Невада (Робинсон), Монтана (Батт) и Нью-Мексико (Чино) и другие. *Кордильерский рудный пояс* сформировался в мезозойско-кайнозойский период в результате субдукции Тихоокеанской плиты под Североамериканскую платформу. Эти месторождения связаны с крупными магматическими интрузиями, приуроченными к континентальным дуговым системам.

Порфиновые медные системы чаще всего развиваются в условиях сжатия или трансрессии, но также могут образовываться при переходе к растянутому или умеренно растянутому тектоническому режиму, что способствует внедрению порфировых интрузий. Некоторые месторождения формируются в постколлизийных обстановках или в бэк-арк-зонах, где происходит растяжение коры после завершения субдукции. Они образуются в верхней коре на глубинах менее 5–10 км в тектонически нестабильных районах, что делает их уязвимыми к эрозии [2]. Компрессионные тектонические условия способствуют накоплению гидратированных магм в нижней коре, а последующие изменения тектонического режима могут способствовать быстрой эмиссии магматических жидкостей в верхнюю кору, что критично для формирования порфировых месторождений [3].



**Рис. 1. Медно порфировые месторождения юго-запада
Северной Америки [1].**

Сурет 1. Солтүстік Американың оңтүстік-батыс аймағында орналасқан мыс порфирлі кенорындары [1].
Figure 1. Porphyry copper deposits of southwestern North America [1].

Центрально-Казахстанский рудный пояс представляет собой одну из наиболее значимых металлогенических провинций Центральной Азии. Он включает Актогайский и Балхашский рудные районы, известен своими крупными порфировыми медными месторождениями, такими как Актогай, Бозшаколь, Конырат и Коунрад. Пояс сформировался в результате сложных тектоно-магматических процессов, происходивших в позднем палеозое, в ходе аккреции и субдукции океанических террейнов, закрытия Палеоазиатского океана и последующих коллизионных событий [4].

Геологическое развитие ЦКРП связано с активным ортогенезом, что привело к формированию благоприятных условий для рудообразования [5]. Порфировые месторождения пояса образовались в тесной связи с гранитоидными интрузиями, внедрявшимися в континентальную кору в посторогенный этап тектонической эволюции региона [6]. Металлогеническая специализация пояса включает медь, молибден и золото, а также сопутствующие элементы, такие как серебро и редкие земли.

Минералогический состав вмещающих пород Северо-Западной Америки характеризуются сложной системой гидротермальных изменений. Основные зоны изменения включают натрий-кальцевую, калиевую, серицит-хлоритовую, серицитовую, кварц-пиррофиллитовую, кварц-алунит-каолинитовую, пропилитовую и хлоритовую зоны [2]. Эти зоны альтерации формируют концентрические оболочки вокруг магматического центра месторождения, отражая температурные и химические градиенты флюидных потоков [3]. Порфировые интрузии, ассоциированные с этими месторождениями, включают диориты, кварцевые диориты, гранодиориты, кварцевые монцониты (монцограниты) и реже сиениты [2]. Для медно-молибденовых порфиров характерны более кислые интрузивные породы,

такие как кварцевые монцитоны и гранодиориты, обогащенные фтором редкометалльные граниты, содержащими элементы, такие как *Zr, Ba, Li, P3Э, Nb, Rb и Ta* [2].

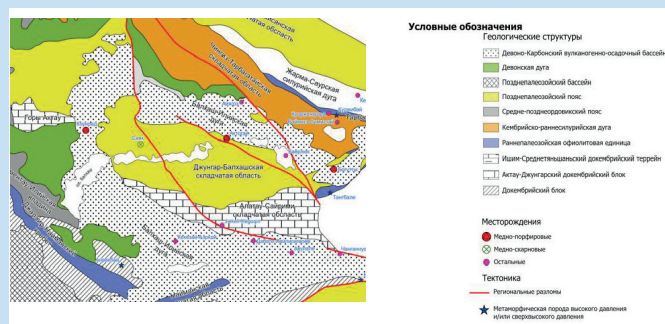


Рис. 2. Геолого-тектоническая карта Центрально-Казахстанского рудного пояса [5].

Сурет 2. Орталық Қазақстан кен белдеуінің геология-тектоникалық картасы [5].

Figure 2. Geological-tectonic map of the Central Kazakhstan ore belt [5].

Основными вмещающими породами ЦКРП являются гранодиориты, диориты и кварцевые монцитоны, в некоторых районах встречаются плагиограниты, амфиболиты и метаморфизованные осадочные породы. Изученный нами минералогический состав включает порообразующие минералы: плагиоклаз, калиевый полевой шпат, кварц, амфиболы и биотит. В процессе гидротермального изменения породы подвергались серицитизации, пропититизации, силификации и калишпатизации, что способствовало концентрации рудных минералов [7].

Cu-Mo-порфировые месторождения Казахстана и Кордильер имеют схожие закономерности рудной минерализации, но также проявляют ряд отличий. В обоих регионах основными рудными минералами являются халькопирит,

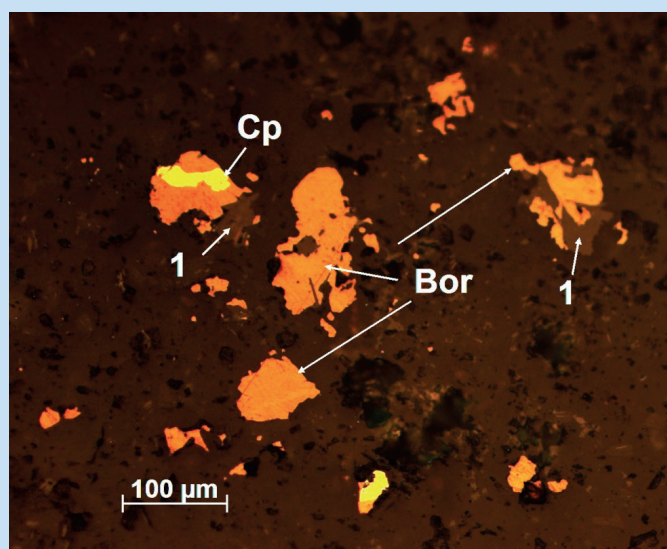


Рис. 3. Борнит (Bor) замещает халькопирит (Cp).

Сурет 3. Борнит (Bor) халькопиритті (Cp) алмастырады.

Figure 3. Bornite (Bor) replaces chalcopyrite (Cp).

борнит и молибденит, приуроченные к калиевым зонам изменений, фотографии аншлифов из месторождения Актогай показаны на рисунках 3–6 [8]. Пространственная зональность одинакова: борнит концентрируется в центральных частях рудных тел, халькопирит – в промежуточных, а пирит – на периферии. Оба типа месторождений связаны с гидротермальными процессами, а в калиевых зонах выявлены золото, серебро и минералы платиновой группы. Однако в Казахстане поздние тектонические процессы могли значительно изменить пространственное положение рудных тел, а в зонах окисления преобладают малахит, хризокolla и другие [2, 9].

Сопутствующие элементы и минералы (Au, Ag, PGE) концентрируются в калиевых зонах гидротермальных изменений, преимущественно в ассоциации с борнитом, халькопиритом и молибденитом. Их пространственное распределение важно учитывать при оценке экономического потенциала месторождений.

Платиновые металлы (PGM) часто связаны с борнит-халькопиритовыми рудами, обогащенными магнетитом. В Кордильерских месторождениях [2] основным минералом платиновой группы является мерензкит, тогда как в ЦКРП [10, 11] платина и палладий встречаются в дисперсных включениях борнита, а также в молибденитах, содержащих примеси *Rh* и *Au*.

Формы рудных тел. Рудные тела медно-порфировых месторождений Центрального Казахстана и Северо-Западной Америки в основном представлены штокверковыми и жильными системами, что характерно для порфировых систем в зонах субдукции [8, 12]. В обоих регионах минерализация связана с магматическими интрузиями и их гидротермальными преобразованиями, формирующими зоны рудного обогащения.

Месторождения Северо-Западной Америки, такие как Бингем и Моренси, демонстрируют классическую порфировую морфологию рудных тел [2]. Эти рудные тела

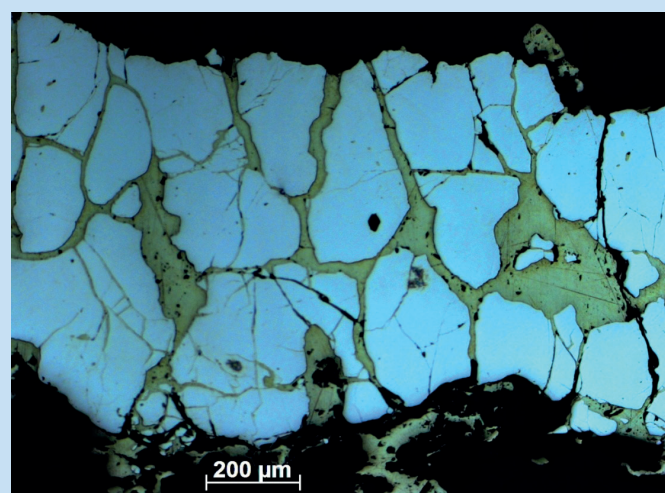
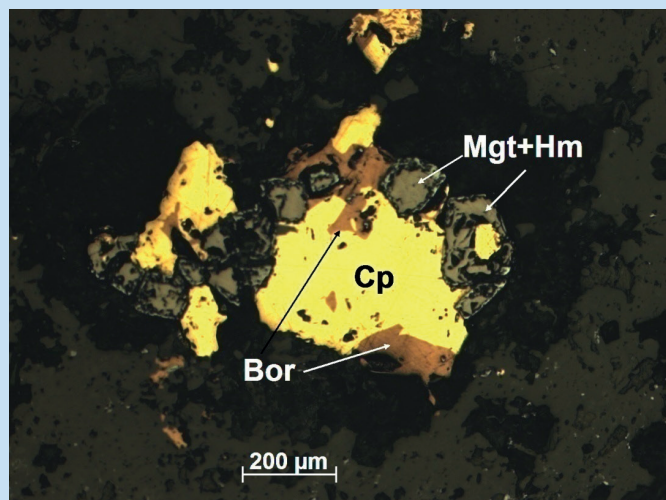


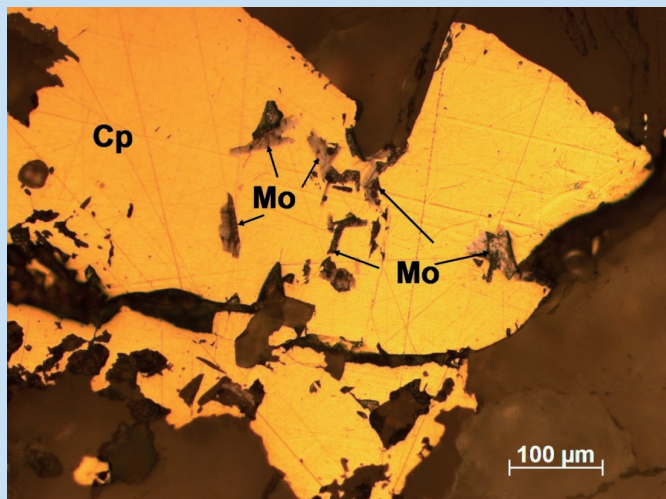
Рис. 4. Py-Cp находится в кварце. Белый – пирит (Py), желтый – халькопирит (Cp).

Сурет 4. Py-Cp кварц жігінде. Ақ – пирит (Py), сары – халькопирит (Cp).

Figure 4. Py-Cp is in a quartz. White is pyrite (Py), yellow is chalcopyrite (Cp).



**Рис. 5. Магнетит (Mgt) с гематитом (Hm) в ассоциации с халькопиритом (Cp) и борнитом (Bor).
Сурет 5. Магнетит (Mgt) гематитпен (Hm) халькопиритпен (Cp) және борнитпен (Bor) бірге.
Figure 5. Magnetite (Mgt) with hematite (Hm) in association with chalcopyrite (Cp) and bornite (Bor).**



**Рис. 6. Зерна молибденита (Mo) в халькопирите (Cp).
Сурет 6. Молибденит (Mo) түйіршіктері халькопириттің (Cp) ішінде.
Figure 6. Molybdenite (Mo) grains in chalcopyrite (Cp).**

обладают относительной устойчивостью к поздним тектоническим изменениям, что обусловлено стабильной субдукционной тектоникой региона.

В ЦКРП форма рудных тел также преимущественно штокверковая, но на некоторых месторождениях отмечается влияние поздних тектонических процессов, что привело к изменению пространственного расположения рудных зон. На месторождении Нурказган наблюдается частичная деструкция рудного массива вследствие разломных процессов [12], а в Актогае, Айдарлы и Арганаты фиксируются тектонически нарушенные зоны [9]. Морфология рудных тел в ЦКРП остается типичной для порфировых систем, однако местами претерпела модификации

вследствие позднепалеозойских и мезозойско-кайнозойских тектонических событий, что следует учитывать при прогнозировании рудных объектов на более глубоких горизонтах.

Возраст интрузий и рудообразования. Возраст рудообразования и интрузий существенно различается между регионами. В Восточной Америке медно-порфировые месторождения связаны с позднемезозойскими и кайнозойскими магматическими комплексами (70–30 млн лет). В Центральном Казахстане рудные тела формировались в палеозойскую эру (350–310 млн лет). Это связано с разной геодинамической эволюцией регионов: в Казахстане процесс рудообразования был связан с субдукцией и последующими коллизиями в палеозое, а в Америке – с мезозойской субдукцией Тихоокеанской плиты.

Актогайское порфировое медное месторождение, расположенное в Балхашском металлогеническом поясе Казахстана, является одним из ключевых примеров медно-порфировых месторождений ЦКРП. Это месторождение представляет собой важный объект для изучения процессов рудообразования и тектонической эволюции субдукционных зон. В рамках сравнительного анализа Кордильерского и ЦКРП, исследование возраста интрузий и рудообразования в Актогайском месторождении позволяет выявить ключевые этапы формирования порфировых медных руд и их связь с тектоническими процессами.

По исследованиям [11] датирование циркона методом SHRIMP для гранитоидов Актогайского рудного поля показало, что кварцевый диорит из интрузивного тела Колдар имеет возраст кристаллизации 335.7 ± 1.3 , порфировый гранодиорит – 327.5 ± 1.9 млн лет (верхний карбон). Это соответствует основному этапу рудообразования Актогая. Возраст Коньратского месторождения датируется [12] также с магматизмом и рудообразованием в позднем карбоне, что указывает на общие геодинамические процессы в Балхашском металлогеническом поясе. Таким образом, в Балхашско-Джунгарской рудоносной провинции наблюдается четкая взаимосвязь между геологической эволюцией и минерализацией, возраст формирования порфировых месторождений меди варьируется от ордовика до перми, однако большинство из них относится к позднему карбону [10–12].

Сравнение с Кордильерским поясом (США) показывает, что процессы рудообразования в субдукционных зонах имеют схожие временные рамки, однако тектоническая эволюция и эксгумация месторождений могут значительно варьироваться в зависимости от региональных геодинамических условий.

Заключение

Анализ тектонических условий формирования медно-порфировых месторождений Центрального Казахстана и Кордильерского рудного пояса США показал, что, несмотря на схожие механизмы рудообразования, различия в геодинамической эволюции обусловили уникальные особенности месторождений. В Центральном Казахстане порфировые системы возникли в позднем палеозое вследствие субдукции Палеоазиатского океана и коллизионных процессов, в то время как в Кордильерах они сформиро-

вались значительно позже – в позднем меле и кайнозое, демонстрируя более выраженную зональность.

Гидротермальные изменения оказали ключевое влияние на формирование рудных тел, при этом в Прибалхашье преобладают кашпатизация и серицитизация, а в Кордильерах более интенсивные гидротермальные процессы привели к образованию рудных систем большего масштаба. Различия в магматических источниках и геохимических условиях отразились на составе и распределении металлов.

Возрастные характеристики рудоносных интрузий подтверждают существование двух периодов активного рудообразования: 350–310 млн лет в Центральном Казахстане и 70–30 млн лет в Кордильерах. Поздние тектонические перестройки привели к значительным структурным изменениям казахстанских месторождений, что усложняет

их реконструкцию, но указывает на вероятность скрытых рудных тел в глубинных зонах древней субдукции.

Сопоставление порфировых систем Казахстана и США позволило выделить универсальные признаки, определяющие размещение рудных тел: активные разломы, калиевые изменения, кварц-серицитовая ассоциация. Эти результаты могут быть использованы для оценки перспективных площадей в других регионах с аналогичной тектонической структурой.

Благодарность

Данная статья финансировалась Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан по теме (ПЦФ № BR21882179) «Разработка прогнозно-поисковых решений для геологического картирования рудных залежей наземно-космическими методами».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ливингстон Д.Э. Гипотеза тектоники плит для генезиса порфировых месторождений меди в провинции Южного бассейна и хребта // *Earth and Planetary Science Letters*. 1973. № 20 (2). С. 171–179 (на английском языке)
2. Джон Д.А., Тейлор Р.Д. Побочные продукты месторождений медно-порфировых и молибденовых руд // *Reviews in Economic Geology*. 2016. № 8. С. 137–164 (на английском языке)
3. Генрих К.А. Формирование месторождений медно-порфировых руд: взгляд из геологии, геохимии и геофизики // *Reviews in Economic Geology*. 2007. № 14. С. 1–38 (на английском языке)
4. Медно-порфировые месторождения Восточного Казахстана / Рагданова А.А. [и др.] // *Горный журнал Казахстана*. 2022. № 3. С. 137–143 (на русском языке)
5. Геологическая эволюция и огромные рудообразующие пояса в центральной части Центрально-Азиатского металлогенического региона / Сяо В. [и др.] // *Journal of Earth Science*. 2016. № 27 (3). С. 491–506 (на английском языке)
6. Новая геологическая карта Западного Джунгара, Северный Синьцзян (Северо-Западный Китай): значение для реконструкции палеоэкологической среды / Чжу Ю.Ф. [и др.] // *Episodes*. 2013. 36. С. 205–220 (на английском языке)
7. Оценка магматического родства и петрогенезиса гранитоидов на гигантском медно-порфировом месторождении Актогай, Центральный Казахстан / Цао М.-Дж. [и др.] // *American Journal of Science*. 2016. № 316 (9). С. 614–668 (на английском языке)
8. Силлитоз Р.Х. Медно-порфировые системы // *Economic Geology*. 2010. № 105 (1). С. 3–41 (на английском языке)
9. Новое порфировое медно-молибденовое рудопроявление в аргановых гранитах Восточного Прибалхашья (Казахстан): геология, геохимия и минералогия / Байбатша А. [и др.] // *Geosciences*. MDPI. 2024. Т. 14. № 237. С. 1–21 (на английском языке)
10. Медные минералы из зоны окисления Cu(Mo)-порфирового месторождения Сарышаган (Западное Прибалхашье, Центральный Казахстан) / Прибавкин С.В. [и др.] // *Минералогия*. 2020. Т. 6. № 1. С. 58–67 (на английском языке)
11. Степанец В.Г., Макат Д.К., Савельева Н.А. Геология, минералогия и геодинамическая природа платиноносного месторождения Нурказган (Центральный Казахстан) // МНК «Геология, минерагения и перспективы развития минерально-сырьевых ресурсов РК и стран СНГ», Алматы, 8–9 октября 2015 г. С. 1–16 (на русском языке)
12. Ермолов П.В., Дегтярев К.Е., Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Яковлева С.З., Плоткина Ю.В., Толмачева Е.В. Определение возраста рудоносных гранитоидов месторождения Конырат (Коунрад) в Северном Прибалхашье, ЦК // *Доклады Академии наук*. 2015. Т. 461. № 2. – С. 345–350 (на русском языке)

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Ливингстон Д.Э. Оңтүстік бассейн және жотасы провинциясындағы порфирлі мыс кен орындарының генезисіне қатысты плиталық тектоника гипотезасы // *Earth and Planetary Science Letters*. 1973. № 20 (2). Б. 171–179 (ағылшын тілінде)
2. Джон Д.А., Тейлор Р.Д. Мыс-порфирлі және молибденді кен орындарының қосалқы өнімдері // *Reviews in Economic Geology*. 2016. № 18. Б. 137–164 (ағылшын тілінде)

3. Генрих К.А. Мыс-порфирлі кен орындарының қалыптасуы: геология, геохимия және геофизика тұрғысынан қарастыру // *Reviews in Economic Geology*. 2007. № 14. Б. 1–38 (ағылшын тілінде)
4. Шығыс Қазақстанның мыс-порфирлі кен орындары / Рагданова А.А. [және т.б.] // *Қазақстан тау-кен журналы*. 2022. № 3. Б. 137–143 (орыс тілінде)
5. Орталық Азия металлогендік аймағының орталық бөлігіндегі геологиялық эволюция және ірі кен түзілу белдеулері / Сяо В. [және т.б.] // *Journal of Earth Science*. 2016. № 27 (3). Б. 491–506 (ағылшын тілінде)
6. Батыс Жоңғардың (Солтүстік Синьцзян, Солтүстік-Батыс Қытай) жаңа геологиялық картасы: палеоэкологиялық ортаны қайта құру үшін маңызы / Чжу Ю.Ф. [және т.б.] // *Episodes*. 2013. № 36. Б. 205–220 (ағылшын тілінде)
7. Орталық Қазақстандағы Актотай алып мыс-порфирлі кен орны гранитоидтарының магмалық туыстығы мен петрогенезисін бағалау / Цао М.-Дж. [және т.б.] // *American Journal of Science*. 2016. № 316 (9). Б. 614–668 (ағылшын тілінде)
8. Силлитое Р.Х. Мыс-порфирлі жүйелер // *Economic Geology*. 2010. № 105 (1). Б. 3–41 (ағылшын тілінде)
9. Шығыс Прибалхаш арганды граниттеріндегі жаңа порфирлі мыс-молибденді кен шоғыры (Қазақстан): геология, геохимия және минералогия / Байбатша А. [және т.б.] // *Geosciences*. MDPI. 2024. Т. 14. № 237. Б. 1–21 (ағылшын тілінде)
10. Сарышаған Си (Мо)-порфирлі кен орнының (Батыс Прибалхаш, Орталық Қазақстан) тотығу аймағындағы мыс минералдары / Прибавкин С.В. [және т.б.] // *Минералогия*. 2020. Т. 6. № 1. Б. 58–67 (орыс тілінде)
11. Степанец В.Г., Мапат Д.К., Савельева Н.А. Нұрқазған платина тасымалдаушы кен орнының геологиясы, минералогиясы және геодинамикалық табиғаты (Орталық Қазақстан) // «Геология, минералогия және ҚР мен ТМД елдерінің минералдық-шикізат ресурстарын дамытудың перспективалары» ХҒ конференция материалдары, Алматы, 8–9 қазан 2015 ж. Б. 1–16 (орыс тілінде)
12. Ермолов П.В., Дегтярев К.Е., Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Яковлева С.З., Плоткина Ю.В., Толмачева Е.В. Солтүстік Прибалхаш (Коунрад) Конырат кен орнының рудалы гранитоидтарының жасын анықтау // *Ғылым академиясының есептері*. 2015. Т. 461. № 2. – Б. 345–350 (орыс тілінде)

REFERENCES

1. Livingston D.E. A plate tectonic hypothesis for the genesis of porphyry copper deposits of the Southern Basin and Range Province // *Earth and Planetary Science Letters*. 1973. V. 20 (2). 171–179 pp. (in English)
2. John D.A., Taylor R.D. By-Products of Porphyry Copper and Molybdenum Deposits // *Reviews in Economic Geology*. 2016. V. 18. 137–164 pp. (in English)
3. Heinrich C.A. The Formation of Porphyry Copper Deposits: Insights from Geology, Geochemistry, and Geophysics // *Reviews in Economic Geology*. 2007. V. 14. 1–38 pp. (in English)
4. Medno-porfirovye mestorozhdeniia Vostochnogo Kazakhstana [Copper-porphyry deposits of Eastern Kazakhstan], Ragdanova A.A. [et al.], Gornyi zhurnal Kazakhstana [Mining Journal of Kazakhstan]. 2022. No. 3. 137–143 pp. (in Russian)
5. Geological Evolution and Huge Ore-Forming Belts in the Core Part of the Central Asian Metallogenic Region / Xiao W. [et al.] // *Journal of Earth Science*. 2016. V. 27 (3). 491–506 pp. (in English)
6. A New Geological Map of the Western Junggar, North Xinjiang (NW China): Implications for Paleoenvironmental Reconstruction / Zhu Y.F. [et al.] // *Episodes*. 2013. V. 36. 205–220 pp. (in English)
7. Assessing the magmatic affinity and petrogenesis of granitoids at the giant Aktogai porphyry Cu deposit, Central Kazakhstan / Cao M.-J. [et al.] // *American Journal of Science*. 2016. V. 316 (9). 614–668 pp. (in English)
8. Sillitoe R.H. Porphyry Copper Systems // *Economic Geology*. 2010. V. 105 (1). 3–41 pp. (in English)
9. New Porphyry Copper–Molybdenum Ore Occurrence in Arganaty Granites of the Eastern Balkhash (Kazakhstan): Geology, Geochemistry, and Mineralogy / Baibatsha A. [et al.] // *Geosciences*. MDPI. 2024. V. 14. No. 237. 1–21 pp. (in English)
10. Copper Minerals from the Oxidation Zone of the Saryshagan Cu (Mo)-Porphyry Deposit (Western Balkhash Region, Central Kazakhstan) / Pribavkin S.V. [et al.] // *Mineralogy*. 2020. V. 6. No. 1. 58–67 pp. (in English)
11. Stepanets V.G., Makat D.K., Saveliyeva N.A. Geologiya, mineralogiia i geodinamicheskaiia priroda platinonosnogo mestorozhdeniia Nurkazgan (Tsentralnyi Kazakhstan) [Geology, mineralogy

and geodynamic nature of the platinum-bearing deposit Nurkazgan (Central Kazakhstan)], *Mezhdunarodnaia nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Geologiya, mineragiya i perspektivy razvitiya mineralno-syrevykh resursov RK i stran SNG» [International scientific conference «Geology, minerageny and prospects for the development of mineral resources of the Republic of Kazakhstan and the CIS countries»]*, Almaty, October 8–9, 2015. 1–16 pp. (in Russian)

12. Ermolov P.V., Degtyarev K.E., Kotov A.B., Salnikova E.B., Yakovleva S.Z., Plotkina Yu.V., Tolmacheva E.V. *Opreделение vozrasta rudonosnykh granitoidov mestorozhdeniya Konyrat (Kounrad) v Severnom Pribalkhashe, Tsentralnyi Kazakhstan [Determination of the age of ore-bearing granitoids of the Konyrat (Kounrad) deposit in the Northern Balkhash region, Central Committee], Doklady Akademii nauk [Reports of the Academy of Sciences]. 2015. V. 461. No. 2. 345–350 pp. (in Russian)*

Сведения об авторах:

Бекботаева А.А., доктор Ph.D, профессор кафедры «Геология», Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), Приглашенный ученый PennState University (г. Стэйт Колледж, США), a.bekbotayeva@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0003-2670-3604>

Фурлонг К., доктор Ph.D, профессор кафедры «Геонаука», PennState University (г. Стэйт Колледж, США), kpf1@psu.edu; <https://orcid.org/0000-0002-2674-5110>

Талгарбаева Д.Н., магистр технических наук по специальности «Геология и разведка полезных ископаемых», Институт Ионосферы (г. Алматы, Казахстан), turbekova.d.n@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-5747-8978>

Абдуллаева Т.Л., магистр технических наук, преподаватель кафедры «Геология», Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), Приглашенный ученый PennState University (г. Стэйт Колледж, США), t.abdullaeva@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0003-0657-0867>

Авторлар туралы мәліметтер:

Бекботаева А.А., Ph.D, Сәтбаев университетінің геология кафедрасының профессоры (Алматы қ., Қазақстан), ПеннСтейт университетінің шақырылған стипендиаты (Стейт колледжі қ., АҚШ)

Фурлонг К., Ph.D, Геоғылымдар кафедрасының профессоры, ПеннСтейт университеті (Стейт колледжі қ., АҚШ)

Талгарбаева Д.Н., «Геология және пайдалы қазбаларды барлау» мамандығы бойынша ғылым магистрі, Ионосфера институты (Алматы қ., Қазақстан)

Абдуллаева Т.Л., техника ғылымдарының магистрі, Сәтбаев университетінің геология кафедрасының оқытушысы (Алматы, Қазақстан), ПеннСтейт университетінің шақырылған стипендиаты (Стейт колледжі қ., АҚШ)

Information about the authors:

Bekbotayeva A.A., Ph.D, Professor, Department of Geology, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan), Visiting Scholar, PennState University (State College, USA)

Furlong K., Ph.D, Professor, Department of Geosciences, PennState University (State College, USA)

Talgarbaeva D.N., Master of Technical Sciences in the specialty «Geology and exploration of minerals», Institute of the Ionosphere (Almaty, Kazakhstan)

Abdullayeva T.L., MSc, Lecturer, Department of Geology, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan), Visiting Scholar, PennState University (State College, USA)

*30 лет развития
инноваций
и технологий!*

2025

miningmetals 30 YEARS OF SUCCESS CENTRAL ASIA

Юбилейная Центрально-Азиатская Международная Выставка
ГОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, ДОБЫЧА И ОБОГАЩЕНИЕ РУД И МИНЕРАЛОВ

17 • 19 сентября
АЛМАТЫ, КАЗАХСТАН

Организаторы



+7 727 258 34 34



mining-metals.kz



mining_shows_kaz



miningmetals.kz



Код МРНТИ 36.23.31

*M.A. Alpysbay¹, A.B. Umirbaeva², Zh. Kozhaev¹, N. Mussakhan¹¹Satbayev University (Almaty, Kazakhstan),²International Educational Corporation (Almaty, Kazakhstan)

MULTISPECTRAL ANALYSIS OF ASTER DATA FOR REMOTE SENSING OF PORPHYRY COPPER DEPOSITS

Abstract. Porphyry copper deposits are key sources of **Cu**, **Mo** and **Au**, requiring effective exploration methods. ASTER multispectral data enables mapping ore-bearing zones by identifying hydrothermal alterations. This study explores **FeOH**, **AlOH** and **MgOH** indices, along with ASTER thermal channels, to detect minerals linked to ore bodies. The effectiveness of these indices in delineating argillic (sericite-kaolinite) and propylitic (chlorite-epidote) alteration zones is analyzed. A comparative analysis of ASTER data processing approaches and successful applications in various ore-bearing regions is conducted. The results can enhance remote mapping techniques and optimize porphyry copper deposit exploration.

Key words: porphyry copper deposits, ASTER, remote sensing, hydrothermal alteration, **FeOH**, **AlOH**, **MgOH**, thermal channels.

ASTER деректерін көпспектрлі талдау арқылы мыс-порфир кен орындарын қашықтан зондтау

Аннотация. Порфирлік мыс кен орындары **Cu**, **Mo** және **Au**-дың негізгі көздері болып табылады, оларды барлау үшін тиімді әдістер қажет. ASTER көпспектрлі деректері гидротермалдық өзгерістерді анықтау арқылы кенді аймақтарды картаға түсіруге мүмкіндік береді. Бұл зерттеуде кен денелерімен байланысты минералдарды анықтау үшін **FeOH**, **AlOH** және **MgOH** индекстері, сондай-ақ ASTER жылулық арналары қарастырылады. Осы индекстердің аргиллиттік (серицит-каолиниттік) және пропилиттік (хлорит-эпидоттық) өзгеру аймақтарын ажыратудағы тиімділігі талданады. ASTER деректерін өңдеу тәсілдері мен олардың әртүрлі кенді аймақтардағы табысты қолдану мысалдары салыстырмалы түрде зерттелді. Алынған нәтижелер қашықтықтан картаға түсіру әдістерін жетілдіруге және порфирлік мыс кен орындарын барлауды оңтайландыруға ықпал ете алады.

Түйінді сөздер: мыс-порфир кен орындары, ASTER, қашықтықтан зондтау, гидротермальды өзгеру, **FeOH**, **AlOH**, **MgOH**, жылулық арналары.

Многоспектральный анализ данных ASTER для дистанционного зондирования медно-порфировых месторождений

Аннотация. Порфировые медные месторождения являются ключевыми источниками **Cu**, **Mo** и **Au**, требующими эффективных методов разведки. Многоспектральные данные ASTER позволяют картировать рудоносные зоны путем выявления гидротермальных изменений. В данном исследовании рассматриваются индексы **FeOH**, **AlOH** и **MgOH**, а также термальные каналы ASTER для обнаружения минералов, связанных с рудными телами. Анализируется эффективность этих индексов в выделении аргиллитовой (серицит-каолинитовой) и пропилитовой (хлорит-эпидотовой) зон изменения. Проведен сравнительный анализ методов обработки данных ASTER и успешных примеров их применения в различных рудоносных районах. Полученные результаты могут способствовать совершенствованию методов дистанционного картирования и оптимизации разведки порфировых медных месторождений.

Ключевые слова: медно-порфировые месторождения, ASTER, дистанционное зондирование, гидротермальная аalterация, **FeOH**, **AlOH**, **MgOH**, термальные каналы.

Introduction

Porphyry copper deposits (PCDs) are major sources of **Cu**, **Mo** and **Au**, contributing over 60% of global copper production [1]. Formed through magmatic-hydrothermal processes, they exhibit extensive mineralogical zoning linked to redox and hydrothermal activity [2, 3]. Traditional exploration methods – geochemical, geophysical, and geological – require significant resources, making remote sensing (RS) a valuable alternative for mapping hydrothermal alteration zones [4, 5].

ASTER satellite data, with its 14 spectral bands covering VNIR (0.52–0.86 μm), SWIR (1.6–2.43 μm) and TIR (8.125–11.65 μm) ranges, is widely used in mineral exploration [6, 7]. It facilitates:

- Identification of argillic (sericite-kaolinite) and propylitic (chlorite-epidote) alteration zones [8].
- Mapping of iron oxides (hematite, limonite) via **FeOH** indices [9].
- Analysis of silicate and carbonate distribution using thermal channels [10].

Studies confirm ASTER's effectiveness in Iran, Australia, Chile, and Mongolia for detecting key mineral alterations [11–12]. Various processing approaches include spectral indices, classification methods, and GIS integration. Despite advances, challenges remain in improving classification accuracy and correlating remote sensing data with field studies.

This study focuses on using ASTER data to identify hydrothermal alteration zones in Kazakhstan's Aktogay ore field. By applying **FeOH**, **AlOH**, **MgOH** indices and thermal channels, we assess their effectiveness, compare results with field data, and provide recommendations for optimizing porphyry copper exploration. The Aktogay ore field includes large depos-

its (Aktogay, Aydarly), the small Kyzylkiya deposit, and two poorly studied ore stockworks in the Ayagoz district, 22 km east of the Aktogay railway station.

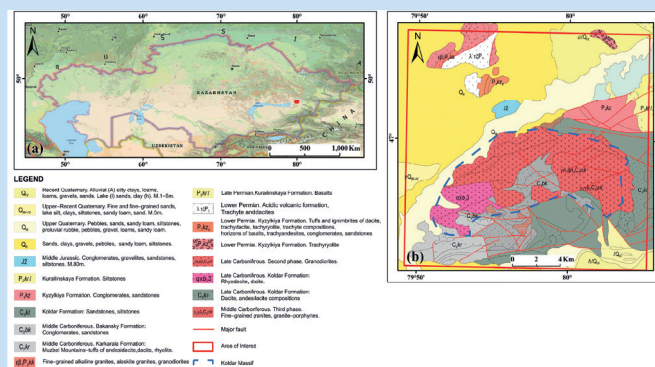


Figure 1. (a) – Geographical location of the study area and surroundings regions. (b) – Simplified geological map of study area (modified from RGF Report 45219 by V.M. Mertenov (sheets L-44-I, II, III), Almaty, 1997).

Сурет 1. (а) – зерттеу аймағы мен оған іргелес аумақтардың географиялық орналасуы. (б) – зерттеу аймағының жеңілдетілген геологиялық картасы (В.М. Мертеновтың РГФ №45219 есебінен өзгертілген, L-44-I, II, III парақтары), Алматы, 1997).

Рис. 1. (а) – географическое расположение района исследования и прилегающих территорий. (б) – упрощенная геологическая карта района исследования (модифицировано из отчета РГФ №45219 В.М. Мертенова (листы L-44-I, II, III), Алматы, 1997).

Methods

This study analyzes ASTER satellite data from the Terra platform, utilizing its 14 spectral bands across VNIR (0.52–0.86 μm), SWIR (1.6–2.43 μm), and TIR (8.125–11.65 μm) for mineral and rock mapping. Standard preprocessing included radiometric correction to remove sensor noise, atmospheric correction using FLAASH, and NDVI-based masking of vegetation and water bodies. To identify hydrothermal alteration zones in porphyry copper deposits, **FeOH**, **AlOH** and **MgOH** indices were calculated, along with thermal channels for detecting silicates and carbonates.

The **AlOH** index was particularly useful for mapping argillic and phyllic alteration minerals linked to ore bodies.

$$\text{AlOH Group Content} = (B5 + B7) / B6, \quad (1)$$

where:

This index is based on the spectral characteristics of **AlOH**-group minerals in the SWIR range (2.1–2.3 μm):

- B5 (2.145–2.185 μm) – sensitive to kaolinite and sericite.
- B7 (2.235–2.285 μm) – also reflects the presence of **AlOH** minerals.
- B6 (2.185–2.225 μm) – control channel, where spectral absorption of **AlOH** minerals is observed.

High values indicate a high concentration of **AlOH** minerals (sericite, kaolinite, alunite) typical of phyllic and argillic alteration zones, while moderate values suggest a mixed clay mineral zone, and low values reflect minimal **AlOH** presence. This index identifies sericitized zones in porphyry system cores, differentiates hydrothermal intensity, and, when combined with **FeOH** and **MgOH** indices, aids in mapping mineralogical zoning.

MgOH Index (magnesium hydroxides: chlorite, epidote, serpentine, talc) – used to identify propylitic alteration zones, which are typical of the peripheral areas of porphyry systems.

$$\text{MgOH Group Content} = (B6 + B9) / (B7 + B8), \quad (2)$$

where:

- B6 (2.185–2.225 μm , SWIR) – sensitive to chlorite and epidote.
- B9 (2.360–2.430 μm , SWIR) – used to assess the content of hydrated minerals.
- B7 (2.235–2.285 μm , SWIR) – control channel, showing weak absorption of chlorite and serpentine.
- B8 (2.295–2.365 μm , SWIR) – helps distinguish **MgOH** minerals from other hydrated phases.

This index is based on the spectral characteristics of magnesium hydroxyl minerals (**MgOH**), such as chlorite, epidote, serpentine and talc. These minerals exhibit distinct spectral features in the shortwave infrared (SWIR) range (2.1–2.4 μm).

- High **MgOH** values (> 1.05) – indicate propylitic alteration zones, which are often located on the periphery of porphyry copper deposits.

- Moderate values (0.95–1.05) – may represent transitional zones between propylitic and argillic alteration.

- Low values (< 0.95) – suggest the absence of significant amounts of **MgOH**-group minerals.

This index is used for identifying propylitic alteration zones characteristic of the peripheral areas of ore bodies, delineat-

ing mineralogical zones within porphyry systems, and, when combined with **FeOH** and **AlOH** indices, for creating comprehensive mineralogical maps to assess the ore-bearing potential of a given area.

FeOH Index (iron oxides and hydroxides) – applied for detecting iron oxides and hydroxides (hematite, limonite, goethite), which are characteristic of oxidation zones and secondary enrichment processes.

$$\text{FeOH} = B2 / B1, \quad (3)$$

where:

- B2 – ASTER Band 2 (0.63–0.69 μm , red spectrum) – maximum reflectance of iron oxides.
- B1 – ASTER Band 1 (0.52–0.60 μm , green spectrum) – control channel.

High **FeOH** values indicate hematite, limonite, and goethite, typical of oxidized zones, and help map secondary sulfide enrichment crucial for ore exploration. Color composite (RGB) images of ASTER band ratios were used for initial mineralogical interpretation, highlighting ore-related mineral zones. Spectral indices, based on mineral reflectance in different spectrum ranges, are calculated as band ratios to identify anomalies linked to specific mineral groups.

Results and Discussion

The multispectral analysis of ASTER data identified hydrothermally altered rock zones essential for remote sensing of porphyry copper deposits. Color interpretation shows red areas (R: (4+6)/5) correspond to intense hydrothermal alteration minerals like alunite, kaolinite, and pyrophyllite. Green areas (G: (5+7)/6) indicate sericite, muscovite, illite, and smectite, typical of phyllic zones linked to ore formation. Blue areas (B: (7+9)/8) represent carbonates, chlorite, and epidote, associated with peripheral propylitic alteration. The most significant anomalies are red, signaling intense hydrothermal changes, while green anomalies suggest argillic alteration, and blue areas indicate the outer hydrothermal zones (Figure 2).

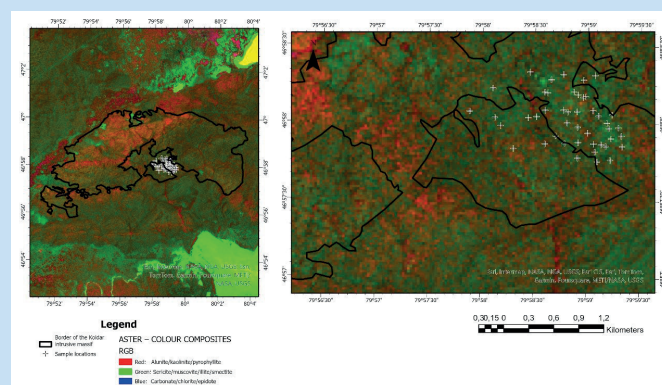


Figure 2. ASTER colour composite.

Сурет 2. ASTER түсті композициясы.

Рис. 2. ASTER цветовой состав (композиционное изображение).

Comparison with known mineralized zones showed that areas marked with white crosses align with increased sericite and kaolinite content, confirming the methodology's accuracy.

This highlights the effectiveness of ASTER data for identifying prospective ore zones. The detected anomalies provide a basis for further exploration, detailed mapping, and drilling prioritization. The *AlOH* index (Figure 3), derived from ASTER data, reflects aluminosilicate minerals like alunite, kaolinite, and diaspore, which form in intense hydrothermal alteration zones. High values indicate argillic alteration, a key marker of porphyry copper-molybdenum deposits and epithermal systems.

In the image, high *AlOH* index values appear in yellow and light blue, while low values are in darker shades. The primary anomaly zone on the right aligns with white crosses, confirming the index's effectiveness in identifying ore-bearing targets. Additional anomalies along tectonic faults suggest secondary alteration, as hydrothermal fluids often migrate along faults, creating favorable conditions for ore deposition.

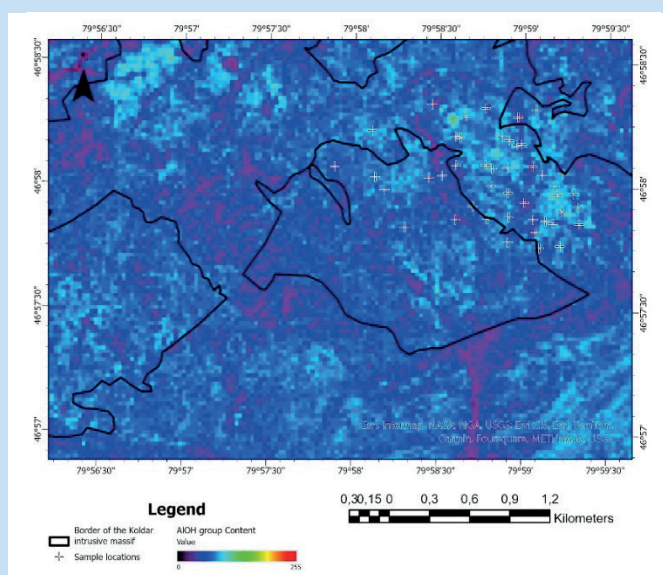


Figure 3. *AlOH* Group content based on ASTER Data.
Сурет 3. ASTER деректері негізіндегі *AlOH* тобының мөлшері.

Рис. 3. Содержание группы *AlOH* по данным ASTER.

Scattered zones of elevated *AlOH* values may indicate local kaolinization and argillic alteration, not necessarily linked to ore formation but still worth further study. The *MgOH* index, derived from ASTER data, identifies magnesium-hydroxyl minerals like chlorite, serpentine, talc, and smectites (Figure 4). These minerals are common in metamorphic and hydrothermally altered rocks within porphyry copper deposits and ultramafic complexes. High *MgOH* values may signal propylitic alteration zones associated with ore-forming processes.

The *MgOH* index distribution differs from *AlOH* due to distinct hydrothermal alterations. *AlOH* anomalies, linked to argillic alteration, concentrate in the central and right parts of the image, aligning with known ore zones. In contrast, *MgOH* anomalies are weaker, indicating limited magnesium-bearing minerals in the area. Localized *MgOH* anomalies along faults suggest possible metasomatic alterations but are less intense than *AlOH*, confirming aluminosilicate dominance. Low *MgOH* values in mineralized zones indicate weak links to ore formation, aligning with the porphyry deposit model, where

argillic alteration (high *AlOH*) prevails near ore bodies, while *MgOH* minerals are peripheral. The *FeOH* index (Figure 5) maps iron-hydroxyl minerals like goethite, limonite, and hematite, marking oxidation zones typical of sulfide mineral alteration in porphyry deposits.

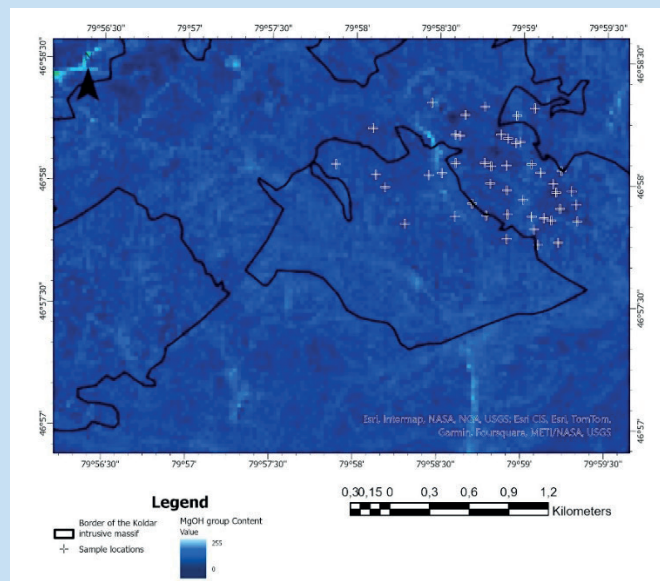
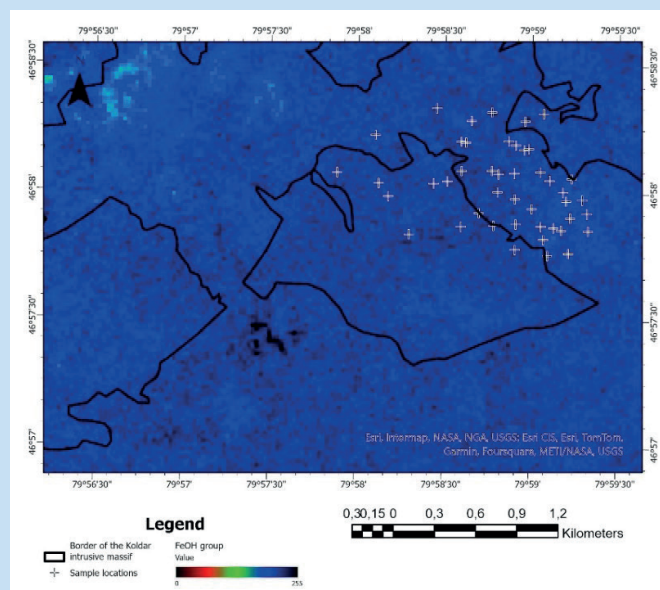


Figure 4. *MgOH* Group content based on ASTER Data.
Сурет 4. ASTER деректері негізіндегі *MgOH* тобының мөлшері.

Рис. 4. Содержание группы *MgOH* по данным ASTER.



Сурет 5. ASTER деректері негізіндегі *FeOH* тобының мөлшері.

Figure 5. *FeOH* Group content based on ASTER Data.
Рис. 5. Содержание группы *FeOH* по данным ASTER.

The *AlOH* index identified zones of argillic and kaolinitic alteration, characteristic of acidic hydrothermal processes associated with the leaching of aluminosilicates, with well-defined anomalies concentrated in the central part of the study area. The *MgOH* index exhibited less prominent anomalies,

indicating weakly developed propylitization, which aligns with the typical model of porphyry systems. The **FeOH** index revealed isolated zones of increased concentration, suggesting the localized presence of iron-bearing hydrothermal minerals. However, compared to **AlOH** and **MgOH**, **FeOH** anomalies were less distinct and more scattered.

At known mineralized locations (marked with red crosses), **FeOH** values do not show a strong correlation, which may indicate weakly developed oxidation zones or deep-seated ore bodies. The low intensity of **FeOH** anomalies compared to **AlOH** and **MgOH** suggests that oxidation processes are weakly expressed, which may imply either the absence of significant weathering and oxidation zones or a low concentration of iron-bearing minerals in the near-surface layers.

Scattered local **FeOH** anomalies require further investigation, as they could be related to oxidized sulfide mineralization zones or weathering products. A comprehensive analysis of **FeOH**, **AlOH**, and **MgOH** indices confirms that the dominant processes in the mineralized zone are argillic alteration and weak propylitization, rather than intense oxidation of sulfide minerals.

The **FeOH** index revealed only minor signs of oxidative changes. Unlike **AlOH** (argillic alteration) and **MgOH** (weak propylitization), iron-bearing minerals did not form significant anomalies, which may indicate deep-seated ore bodies or weakly developed oxidation processes. To refine the findings,

additional geochemical and geophysical investigations are recommended in the areas where **FeOH** anomalies have been identified.

Conclusion

This study analyzed ASTER data to map ore-bearing zones in porphyry copper deposits using **FeOH**, **AlOH**, and **MgOH** indices. The results showed that the **AlOH** index revealed significant anomalies associated with argillic and kaolinitic alterations in the outer zones of porphyry systems. The **MgOH** index indicated localized weak propylitic alteration, suggesting the presence of secondary magnesium silicates. The **FeOH** index exhibited low anomaly intensity, which may imply weak sulfide oxidation or deep-seated ore bodies. A comparison with known mineralized areas confirmed the effectiveness of these indices for remote sensing of porphyry copper deposits. The findings can be applied for the preliminary assessment of prospective areas and optimization of further exploration activities, while integration with geophysical and geochemical methods is recommended to refine the depth characteristics of ore bodies.

Acknowledgments

The research is funded by the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. BR21882179).

REFERENCES

1. Sillitoe R.H. *Porphyry copper systems* // *Economic Geology*. 2010. V. 105. No. 1. 3–41 pp. (in English)
2. Lowell J.D., Guilbert J.M. *Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits* // *Economic Geology*. 1970. V. 65. No. 4. 373–408 pp. (in English)
3. *Porphyry deposits: Characteristics and origin of hypogene features. Economic Geology 100th Anniversary Volume* / Seedorff E., Dilles J. H., Proffett J.M. [et al.]. Littleton: Society of Economic Geologists. 2005. 251–298 pp. (in English)
4. Rajan Girija R., Mayappan S. *Mapping of mineral resources and lithological units: A review of remote sensing techniques* // *International Journal of Image and Data Fusion*. 2019. V. 10. No. 2. 79–106 pp. (in English)
5. Abubakar A.J.A. *Satellite remote sensing for hydrothermal alteration minerals mapping of subtle geothermal system in unexplored aseismic environment: dissertation*. Universiti Teknologi Malaysia, 2018 (in English)
6. Pour A.B., Hashim M., Marghany M. *Characterization of ASTER Data for Mineral Exploration* // *Proceedings of the MRSS 6th International Remote Sensing & GIS Conference and Exhibition, Kuala Lumpur, Malaysia*. 2010. V. 6. 1–8 pp. (in English)
7. Abrams M. *The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER): data products for the high spatial resolution imager on NASA's Terra platform* // *International Journal of Remote Sensing*. 2000. V. 21. No. 5. 847–859 pp. (in English)
8. Ninomiya Y. *A stabilized vegetation index and several mineralogic indices defined for ASTER VNIR and SWIR data* // *IGARSS 2003. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No. 03CH37477)*. IEEE, 2003. V. 3. 1552–1554 pp. (in English)
9. Liu L. et al. *Gold-copper deposits in Wushitula, Southern Tianshan, Northwest China: Application of ASTER data for mineral exploration* // *Geological Journal*. 2018. V. 53. 362–371 pp. (in English)
10. Fatima K. et al. (October 2017). *Minerals identification and mapping using ASTER satellite image*. <https://www.spiedigitallibrary.org/journals/journal-of-applied-remote-sensing/volume-11/issue-4/046006/Minerals-identification-and-mapping-using-ASTER-satellite-image/10.1117/1.JRS.11.046006.short> (in English)

11. Pour A.B., Hashim M. Hydrothermal alteration mapping from Landsat-8 data, Sar Cheshmeh copper mining district, south-eastern Islamic Republic of Iran // *Journal of Taibah University for Science*. 2015. V. 9. No. 2. 155–166 pp. (in English)
12. Rowan L.C., Schmidt R.G., Mars J.C. Distribution of hydrothermally altered rocks in the Reko Diq, Pakistan mineralized area based on spectral analysis of ASTER data // *Remote Sensing of Environment*. 2006. V. 104. No. 1. 74–87 pp. (in English)

ПАЙДАЛАНҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Sillitoe R.H. Порфирлі мыс жүйелері // *Economic Geology*. 2010. Т. 105. № 1. Б. 3–41 (ағылшын тілінде)
2. Lowell J.D., Guilbert J.M. Порфирлі кен орындарындағы минералдану-альтерацияның бүйірлік және тік зоналылығы // *Economic Geology*. 1970. Т. 65. № 4. Б. 373–408 (ағылшын тілінде)
3. Порфирлі кен орындары: гипогендік белгілердің сипаттамасы және шығу тегі. *Economic Geology 100th Anniversary Volume / Seedorff E., Dilles J. H., Proffett J. M.* [және т. б.]. Лутлтон: Society of Economic Geologists. 2005. Б. 251–298 (ағылшын тілінде).
4. Rajan Girija R., Mayappan S. Минералдық ресурстар мен литологиялық бірліктерді картаға түсіру: қашықтықтан зондтау әдістеріне шолу // *International Journal of Image and Data Fusion*. 2019. Т. 10. № 2. Б. 79–106 (ағылшын тілінде)
5. Abubakar A.J.A. Гидротермалды альтерация минералдарын картаға түсіру үшін Жерді қашықтықтан зондтау: дис. ... техн. ғыл. докт. Universiti Teknologi Malaysia, 2018 (ағылшын тілінде)
6. Pour A.B., Hashim M., Marghani M. ASTER деректерінің минералды барлау үшін сипаттамасы // *Proceedings of the MRSS 6th International Remote Sensing & GIS Conference and Exhibition*, Куала-Лумпур, Малайзия. 2010. Т. 6. Б. 1–8 (ағылшын тілінде)
7. Abrams M. ASTER спутниктік сенсоры: NASA Terra платформасындағы жоғары кеңістіктік ажыратымдылыққа ие құрылғының деректер өнімдері // *International Journal of Remote Sensing*. 2000. Т. 21. № 5. Б. 847–859 (ағылшын тілінде)
8. Ninomiya Y. Тұрақтандырылған өсімдіктер индексі және ASTER VNIR мен SWIR деректеріне арналған бірнеше минералогиялық индекстер // *IGARSS 2003. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No. 03CH37477)*. IEEE, 2003. Т. 3. Б. 1552–1554 (ағылшын тілінде)
9. Liu L. және т.б. Солтүстік-Батыс Қытайдың Оңтүстік Тянь-Шань аймағындағы Ушиталадағы алтын-мыс кен орындары: минералды барлауда ASTER деректерін қолдану // *Geological Journal*. 2018. Т. 53. Б. 362–371 (ағылшын тілінде).
10. Fatima K. және т. б. (Қазан 2017). ASTER спутниктік суреттерін пайдалана отырып, минералдарды анықтау және картаға түсіру. <https://www.spiedigitallibrary.org/journals/journal-of-applied-remote-sensing/volume-11/issue-4/046006/Minerals-identification-and-mapping-using-ASTER-satellite-image/10.1117/1.JRS.11.046006.short> (ағылшын тілінде)
11. Pour A.B., Hashim M. Landsat-8 деректерін пайдалана отырып, гидротермалды альтерацияны картаға түсіру, Сар Чешмех мыс кен орны ауданы, Иран Ислам Республикасының оңтүстік-шығысы // *Journal of Taibah University for Science*. 2015. Т. 9. № 2. Б. 155–166 (ағылшын тілінде)
12. Rowan L.C., Schmidt R.G., Mars J.C. ASTER деректерінің спектралдық талдауына негізделген Пәкістанның Реко-Дик минералданған аймағындағы гидротермалды өзгерген жыныстардың таралуы // *Remote Sensing of Environment*. 2006. Т. 104. № 1. Б. 74–87 (ағылшын тілінде)

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Sillitoe R.H. Порфиновые медные системы // *Economic Geology*. 2010. Т. 105. № 1. С. 3–41 (на английском языке)
2. Lowell J.D., Guilbert J.M. Латеральное и вертикальное зонирование минерализации-альтерации в порфировых рудных месторождениях // *Economic Geology*. 1970. Т. 65. № 4. С. 373–408 (на английском языке)
3. Порфиновые месторождения: характеристики и происхождение гипогенных признаков. *Economic Geology 100th Anniversary Volume / Seedorff E., Dilles J.H., Proffett J.M.* [и др.]. Лутлтон: Society of Economic Geologists. 2005. С. 251–298 (на англ. яз.).
4. Rajan Girija R., Mayappan S. Картирование минеральных ресурсов и литологических единиц: обзор методов дистанционного зондирования // *International Journal of Image and Data Fusion*. 2019. Т. 10. № 2. С. 79–106 (на английском языке)

5. *Abubakar A.J.A. Дистанционное зондирование Земли для картирования минералов гидротермальной альтерации в слабоизученных сейсмически стабильных районах: дис. ... д-р техн. наук: Universiti Teknologi Malaysia, 2018 (на английском языке)*
6. *Pour A.B., Hashim M., Marghany M. Характеристика данных ASTER для разведки полезных ископаемых // Proceedings of the MRSS 6th International Remote Sensing & GIS Conference and Exhibition, Куала-Лумпур, Малайзия. 2010. Т. 6. С. 1–8 (на английском языке)*
7. *Abrams M. Спутниковый датчик ASTER: продукты данных для прибора с высоким пространственным разрешением на платформе NASA Terra // International Journal of Remote Sensing. 2000. Т. 21. № 5. С. 847–859 (на английском языке)*
8. *Ninomiya Y. Стабилизированный индекс растительности и несколько минералогических индексов, определенных для VNIR и SWIR данных ASTER // IGARSS 2003. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No. 03CH37477). IEEE, 2003. Т. 3. С. 1552–1554 (на английском языке)*
9. *Liu L. и др. Золото-медные месторождения в Ушитала, Южный Тянь-Шань, Северо-Западный Китай: применение данных ASTER для поиска полезных ископаемых // Geological Journal. 2018. Т. 53. С. 362–371 (на английском языке)*
10. *Fatima K. и др. (Октябрь 2017). Идентификация и картирование минералов с использованием спутниковых изображений ASTER. <https://www.spiedigitallibrary.org/journals/journal-of-applied-remote-sensing/volume-11/issue-4/046006/Minerals-identification-and-mapping-using-ASTER-satellite-image/10.1117/1.JRS.11.046006.short> (на английском языке)*
11. *Pour A.B., Hashim M. Картирование гидротермальной альтерации по данным Landsat-8, район медного рудника Сар-Чешмех, юго-восток Исламской Республики Иран // Journal of Taibah University for Science. 2015. Т. 9. № 2. С. 155–166 (на английском языке)*
12. *Rowan L.C., Schmidt R.G., Mars J.C. Распределение гидротермально измененных пород в минерализованной области Реко-Дук, Пакистан, на основе спектрального анализа данных ASTER // Remote Sensing of Environment. 2006. Т. 104. № 1. С. 74–87 (на английском языке)*

Information about the authors:

Alpysbay M.A., Ph.D doctoral student, Senior Researcher at Satbayev University (Almaty, Kazakhstan), marua.alpysbay@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-0907-7659>

Umirbaeva A.B., Ph.D., Associate Professor of the Department of «Geodesy, Cartography, Cadastre» at the International Educational Corporation (Almaty, Kazakhstan), a_umirbayeva@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4746-3411>

Kozhaev Zh., Ph.D., Associate Professor of the Department of «Surveying and Geodesy» at the Satbayev University (Almaty, Kazakhstan), zh.kozhayev@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0002-9976-9375>

Mussakhan N.N., master's degree student, Department of Mine Surveying and Geodesy of the Mining and Metallurgical Institute named after O.A. Baikonurov, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan), musanaznur@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0009-5610-2712>

Авторлар туралы мәліметтер:

Алпысбай М.А., Ph.D докторанты, Satbayev University жетекші ғылыми қызметкері (Алматы қ., Қазақстан)

Өмірбаева А.Б., Ph.D докторы, «Геодезия және картография, кадастр» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Халықаралық білім беру корпорациясы (Алматы қ., Қазақстан)

Қожаев Ж., Ph.D докторы, «Маркшейдерлік іс және геодезия» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан)

Мусахан Н.Н., магистрант, О.А. Байқоңыров атындағы Тау-кен металлургия институты, «Маркшейдерлік іс және геодезия» кафедрасы, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан)

Сведения об авторах:

Алпысбай М.А., Ph.D докторант, Ведущий научный сотрудник Satbayev University (г. Алматы, Казахстан)

Умирбаева А.Б., доктор Ph.D, ассоциированный профессор кафедры «Геодезия и картография, кадастр» Международной образовательной корпорации (г. Алматы, Казахстан)

Қожаев Ж., доктор Ph.D, ассоциированный профессор кафедры «Маркшейдерское дело и геодезия» Satbayev University (г. Алматы, Казахстан)

Мусахан Н.Н., магистрант, кафедра «Маркшейдерское дело и геодезия», Горно-металлургический институт им. О.А. Байконурова, Satbayev University (г. Алматы, Казахстан)

Масштабное событие горной отрасли в России

Рудник

официальная поддержка:



Торгово-промышленная
палата Российской Федерации



Правительство
Свердловской области



НП «Горнопромышленники
России»

22–24 октября 2025
Екатеринбург

**10-я международная выставка современных
технологий, оборудования и спецтехники
для горнодобывающей промышленности**

принять участие



посетить



МВЦ «Екатеринбург-ЭКСПО»
ЭКСПО-бульвар, дом 2
(342) 206-44-80

mine.proexpo.ru



**pro
ЭХПО**

Код МРНТИ 36.16.35

Х.М. Касымканова¹, А.А. Кенбаев², *Р.А. Ахметов¹, А. Ибраимова¹

¹Satbayev University (г. Алматы, Казахстан),

²РГП на ПХВ «Национальный центр геодезии и пространственной информации» (г. Астана, Казахстан)

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СПУТНИКОВОГО НИВЕЛИРОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Аннотация. В данной статье рассматриваются перспективы применения спутникового нивелирования в Республике Казахстан при решении инженерно-технических задач в области геопространственной цифровой инженерии. Проведен анализ результатов, полученных методом спутникового нивелирования, рассмотрены преимущества и недостатки спутникового нивелирования. Данные, полученные по результатам полевых работ, обработаны в программном обеспечении Leica Infinity, проведена их верификация точности. Статья представляет собой анализ возможностей применения спутникового нивелирования при решении инженерных и научных задач в области геодезии, маркшейдерии.

Ключевые слова: спутниковое нивелирование, глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), Leica Infinity, геодезическая сеть, точность измерений, государственная нивелирная сеть, геоид, квазигеоид, ортометрическая высота, эллипсоидальная высота.

Қазақстан Республикасы жағдайында спутниктік нивелирлеуді қолданудың болашағы

Аннотация. Осы мақалада Қазақстан Республикасы жағдайында геокеңістіктің цифрлық инженерия саласындағы инженерлік-техникалық міндеттерді шешуде спутниктік нивелирлеуді қолданудың болашағы қарастырылады. Спутниктік нивелирлеу әдісімен алынған нәтижелерге талдау жүргізіліп, спутниктік нивелирлеудің артықшылықтары мен кемшіліктері қарастырылды. Далалық жұмыстар нәтижесінде алынған деректер Leica Infinity бағдарламалық қамтамасыз етуде өңделіп, олардың дәлдігіне верификация жүргізілді. Мақала геодезия және маркшейдерия салаларында инженерлік және ғылыми міндеттерді шешуде спутниктік нивелирлеуді қолдану мүмкіндіктеріне талдау ұсынады.

Түйінді сөздер: спутниктік нивелирлеу, ғаламдық навигациялық спутниктік жүйелер (ГНСС), Leica Infinity, геодезиялық желі, өлшеу дәлдігі, мемлекеттік нивелирлік желі, геоид, квазигеоид, ортометриялық биіктік, эллипсоидтық биіктік.

Prospects for the application of satellite levelling in the Republic of Kazakhstan

Abstract. This article examines the prospects for the application of satellite levelling in the Republic of Kazakhstan in solving engineering and technical tasks in the field of geospatial digital engineering. An analysis of the results obtained by the method of satellite levelling has been conducted, and the advantages and disadvantages of satellite levelling are considered. The data collected from fieldwork were processed using Leica Infinity software, and their accuracy was verified. The article presents an analysis of the possibilities of applying satellite levelling to solve engineering and scientific tasks in the fields of geodesy and mine surveying.

Key words: satellite levelling, global navigation satellite systems (GNSS), Leica Infinity, geodetic network, measurement accuracy, national levelling network, geoid, quasi-geoid, orthometric height, ellipsoidal height.

Введение

Развитие современных и передовых технологий в геодезии предоставляет новые возможности для точного определения отметок высот на больших территориях [1–2]. В последние годы применение спутниковых технологий становится все более популярным и востребованным методом при определении не только планового положения, но и в определении высотных отметок [3], в том числе и на территории Республики Казахстан. Определение абсолютных высот с применением технологии Глобальных навигационных спутниковых систем называют спутниковым нивелированием [4].

На рис. 1 схематично представлены основные геометрические поверхности, применяемые в геодезии и спутниковом нивелировании. Уровенная поверхность мирового океана соответствует геоиду – физической поверхности равного гравитационного потенциала, принимаемой за эталон нулевого уровня ортометрических высот. В инженерно-геодезической практике для удобства часто используется условная уровенная поверхность, которая устанавливается, исходя из региональных особенностей, и может отличаться от геоида.

Точки А и В расположены на земной поверхности и имеют ортометрические высоты H_A и H_B относительно условной уровенной поверхности. Точка С лежит непосредственно на этой поверхности и имеет высоту $H_C = 0$. Под условной уровенной поверхностью показан эллипсоид вращения – математическая модель фигуры Земли, применяемая в глобальных навигационных спутниковых системах (ГНСС) и современных геодезических координатных системах.

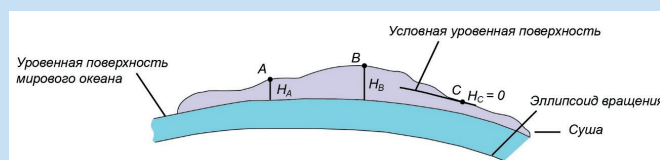


Рис. 1. Графическое представление видов высот.

Сурет 1. Биіктіктер түрлерінің графикалық бейнеленуі.

Figure 1. Graphical representation of elevation types.

Данный рисунок иллюстрирует необходимость учета разницы между ортометрическими и эллипсоидальными высотами при решении задач спутникового нивелирования и трансформации геодезических данных. Корректное понимание взаимосвязей между этими поверхностями позволяет повышать точность инженерно-геодезических измерений и расчетов.

Анализ международного опыта показывает, что в последние годы применение спутникового нивелирования как альтернативы классическому геометрическому нивелированию получило большой импульс [5]. Специалисты из различных стран производят исследования по повышению точности и разработки наиболее приемлемой методики выполнения спутникового нивелирования.

Согласно научным трудам зарубежных специалистов, большинство развитых и развивающихся стран активно применяют и изучают возможности спутниковых технологий при определении высот для различных научных и прикладных целей, включая мониторинг природных и техногенных явлений и создание точных карт высот [6].

Опыт этих стран может быть полезен для Казахстана, где использование ГНСС может значительно повысить точность геодезических работ на больших территориях с разнообразным рельефом. Спутниковое нивелирование получило особую актуальность с внедрением новой единой системы координат на территорию Республики Казахстан QazTRF-23 (Qazaqstan Terrestrial Reference Frame 2023), принятой Постановлением Правительства №208 от 14.03.2023 года «Об установлении государственных систем отсчета и картографических проекций» и развитием собственной сети постоянно действующих референционных станций (CORS).

Теоретические аспекты спутникового нивелирования заключаются в следующем: спутниковое нивелирование основано на использовании ГНСС, таких как GPS, ГЛОНАСС, Galileo, Beidou, IRNSS, QZSS и предоставляет возможность получать точные данные об отметках высот сравнительно на больших территориях. Приемники ГНСС позволяют измерять трехмерные координаты точки, включая геодезическую (эллипсоидальную) высоту над референц-эллипсоидом. Чтобы получить физическую высоту (ортометрическую, отсчитываемую от уровня геоида, близкого к среднему уровню моря), необходимо внести поправку за форму геоида. Таким образом, спутниковое нивелирование фактически определяет высоту точки как сумму эллипсоидальной высоты и значения высоты геоида (квазигеоида) в данной точке. Применение спутникового нивелирования создает возможность определения высот на больших расстояниях и труднодоступных участках с меньшими затратами относительно классических методов, что особенно актуально для Казахстана, где значительные расстояния и многообразие рельефа местности требуют применения современных технологий для повышения эффективности геодезических работ.

Важным теоретическим аспектом спутникового нивелирования является необходимость использования модели геоида (квазигеоида) для перехода от эллипсоидальных высот к ортометрическим. На сегодняшний день в Казахстане часто используют глобальную модель геоида EGM2008 [7], она позволяет вычислять значение высоты геоида для любой точки Земли. Однако глобальные модели не учитывают всех особенностей гравитационного поля на конкретную территорию, что может приводить к систематическим погрешностям при определении высот [8].

Для точного спутникового нивелирования требуется использование высокоточной региональной модели (квазигеоида), разработанной с учетом локальных гравиметрических данных. Квазигеоид используется для преобразования отметок высот (эллипсоидальных высот), полученных по результатам спутниковых измерений в физические высоты (ортометрические высоты), более привычные для практического использования. Разработка и внедрение собственного квазигеоида на территории Республики Казахстан – актуальная задача, решение которой позволит учитывать локальные геофизические особенности и значительно повысить точность и надежность спутникового нивелирования. По сути, наличие точной модели квазигеоида даст возможность напрямую получать привычные

высоты (ортометрические) из данных ГНСС, что сделает спутниковое нивелирование полноценной заменой классического метода – геометрическое нивелирование на практике. Спутниковое нивелирование имеет свои особенности, преимущества и недостатки. Преимущество заключается в следующем:

- *точность, которая может варьироваться в зависимости от разных условий (погодных условий, наличие препятствий, применяемого программного обеспечения, продолжительности наблюдений), но в целом обеспечивает высокую точность результатов на больших территориях;*

- *скорость и эффективность, что позволяет в разы ускорить процесс съемки, так как данные можно получать практически в режиме реального времени. Для выполнения работ по спутниковому нивелированию достаточно одного исполнителя в каждую бригаду;*

- *применимость в различных условиях, т. е. менее зависимо от рельефа и может использоваться в различных условиях, включая горные районы и открытые степи, и есть возможность выполнения работ в темное время суток.*

Недостатком являются первоначальные затраты на приобретение оборудования, которые могут быть достаточно высокими, но в долгосрочной перспективе использование ГНСС снижает общие затраты за счет сокращения времени и высокой производительности.

Методы исследования

Для проверки возможностей спутникового нивелирования в условиях Казахстана была создана локальная геодезическая сеть в городе Алматы вдоль улицы Гагарина (между улицами Жандосова и Толе би). Локальная сеть состоит из одного исходного грунтового репера II класса №884, входящего в состав нивелирной сети Алматинского геодезического полигона и четырех дополнительных точек, закрепленных на местности металлическими дюбелями. Схема расположения локальной сети приведена на рис. 2.

На созданной локальной геодезической сети полевые исследования проводились в два сеанса: первый сеанс наблюдений был проведен 20 ноября 2024 года. На каждой из пяти точек сети устанавливались геодезические двухчастотные приемники ГНСС, которые работали в режиме статики. Угол отсечения по высоте спутников был выставлен 0° (т. е. использовались все видимые спутники до горизонта). Производился непрерывный сбор сигналов от всех доступных навигационных созвездий (GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou). Интервал регистрации наблюдений составлял 15 секунд. Данные каждого приемника записывались в файл формата RINEX 3.02, что обеспечивает совместимость при последующей обработке. Продолжительность непрерывных наблюдений на каждой точке составила около 3 часов.

С целью проверки повторяемости результатов был проведен второй сеанс наблюдений 7 декабря 2024 года на тех же самых точках с аналогичными параметрами съемки. Продолжительность сеансов наблюдений – около 4,5 часов.



Рис. 2. Схема расположения локальной сети.
Сурет 2. Жергілікті желінің орналасу схемасы.
Figure 2. Local area network layout diagram.

Камеральная обработка полученных данных выполнялась в два этапа в ПО Leica Infinity 4.0.2. В качестве опорных точек использовались 4 базовые станции, расположенные в Алматы (ALA 1, KAZGEOKART, Almaty, ALMA 3). На первом этапе произведен расчет координат методом PPP (Precise Point Positioning) с использованием точных эфемерид и часов IGS для каждой точки сети независимо. На втором этапе в ходе уравнивания применялся метод двойных разностей (DD) для устранения влияния систематических ошибок – аппаратных задержек приемника и

спутниковых часов, а также для компенсации ионосферных и тропосферных задержек [9]. В программе Leica Infinity по умолчанию используется ионосферно-нечувствительная комбинация (LC) двухчастотных фазовых измерений, что значительно снижает погрешности, вызванные ионосферой. Для учета тропосферной рефракции использована встроенная модель (модель Сааствамойнена), основанная на заданных метеопараметрах. Точные орбиты спутников (файлы SP3) загружались с сервиса IGS (<http://www.igs.org/products>), что повысило надежность решения по высоте. Были учтены индивидуальные калибровки антенн (файлы ANTEX) для коррекции смещения фазового центра. Решение в каждой сессии получено методом наименьших квадратов, при этом программа сравнивала так называемое «фиксированное» решение (при успешном разрешении фазовых неоднозначностей) с «плавающим» решением (без фиксации). Также в процессе пост-обработки к полученным результатам была применена модель глобального геоида EGM2008, с шагом сетки 5 градусов для получения ортометрической высоты, что позволило произвести анализ возможности применения регионального квазигеоида для определения высот, то есть получения конечного результата спутникового нивелирования.

Результаты и обсуждение

В таблице 1 приведены полученные результаты спутникового нивелирования первого и второго сеансов наблюдений.

Как видно из таблицы 1, разница высот на каждом отдельном пункте между сеансами наблюдений ортометрических и эллипсоидальных высот одинаковая, и на всех пунктах наблюдается общая динамика оседания высоты, что может быть обусловлено разностями по времени и температурой окружающей среды в момент выполнения полевых работ в каждом сеансе наблюдений. Также по результатам видно, что точка 3 имеет отрицательную динамику и выбивается от общей картины полученных результатов, что может быть объяснено возможным влиянием человеческого фактора при измерении высоты антенны приемника при производстве полевых работ, так как во время полевых работ не выполнены контрольные

Таблица 1

Результаты спутникового нивелирования первого и второго сеансов наблюдений

Кесте 1

Бірінші және екінші бақылау сеанстарының спутниктік нивелирлеу нәтижелері

Table 1

Results of satellite leveling from the first and second observation sessions

Название точки	Ортометрическая высота, м			Эллипсоидальная высота, м			СКО, м	
	1 сеанс	2 сеанс	ΔН	1 сеанс	2 сеанс	ΔН	1 сеанс	2 сеанс
Гр. рп. 884	839,2527	839,1968	0,0559	795,1158	795,0598	0,0560	0,0035	0,0074
Точка 1	817,4406	817,4148	0,0258	773,2051	773,1793	0,0258	0,0044	0,0094
Точка 2	800,4862	800,3915	0,0947	756,1678	756,0731	0,0947	0,0031	0,0026
Точка 3	788,5752	788,5916	-0,0164	744,1944	744,2108	-0,0164	0,0085	0,0064
Точка 4	782,3190	782,1785	0,1405	737,8970	737,7565	0,1405	0,0081	0,0036

измерения высот по завершению измерений. По полученным значениям СКО можно констатировать, что полученные значения высот подходят под классификацию точных измерений.

Анализ параметров базовых линий показал высокую стабильность сети. Среднеквадратическое отклонение (СКО) оставалось на низком уровне, что свидетельствует о высокой точности измерений (таблица 2). Также на каждой из базовых станций разница высот имеет одинаковое значение, что подтверждает их точность определения, а полученная разница – это результаты деформационных процессов земной поверхности.

Значения DOP (Geometric DOP, Vertical DOP) находились в пределах допустимых значений, что подтверждает высокое качество данных. Все базовые линии имеют фиксированные неоднозначности, что свидетельствует о высокой точности измерений (75–90%). Примененные модели позволили минимизировать ошибки, в частности, использование точных эфемерид IGS обеспечило надежность расчетов. Применение четырех спутниковых систем (GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou) повысило точность обработки данных. Автоматические модели ионосферы и тропосферы эффективно устранили атмосферные искаже-

ния. Отметки фиксированных точек получены с высокой надежностью ($CQ\ 3D \leq 5\text{ мм}$).

Для верификации применения модели геоида к данной геодезической сети были вычислены превышения между пунктами, полученные в процессе обработки ортометрических и эллипсоидальных высот. Превышения между пунктами показаны в таблице 3.

Как видно из таблицы 3, превышения между пунктами ортометрических и эллипсоидальных высот имеют различные значения, не систематичные по своему характеру. Различные значения превышений эллипсоидальных и ортометрических высот подтверждают применение модели геоида к данной геодезической сети, учитывающей различия гравиметрических данных на каждой точке по отдельности.

Анализ результатов показал, что спутниковое нивелирование с применением методик Leica Infinity обеспечивает получение точных высот. Данный метод применим для решения инженерных и прикладных задач, однако для получения высокоточных значений отметок высот, применяемых для научных целей, необходимо внесение корректировок в методику производства спутникового нивелирования [6].

Таблица 2

Значения высот базовых станций и СКО

Кесте 2

Негізгі станциялардың биіктік мәндері және ОТА

Table 2

Elevation values of base stations and RMS

Название точки	Ортометрическая высота, м			Эллипсоидальная высота, м			СКО, м	
	1 сеанс	2 сеанс	ΔH	1 сеанс	2 сеанс	ΔH	1 сеанс	2 сеанс
ALA1	745,9632	745,9654	-0,0022	701,1623	701,1645	-0,0022	0,0002	0,0002
KAZGEOKART	833,8476	833,8497	-0,0021	789,5820	789,5842	-0,0022	0,0005	0,0005

Таблица 3

Вычисленные превышения между пунктами

Кесте 3

Пункттер арасындағы есептелген биіктік айырмашылықтары

Table 3

Calculated elevation differences between points

Название точки	Ортометрическая высота, м				Эллипсоидальная высота, м			
	1 сеанс	Δh	2 сеанс	Δh	1 сеанс	Δh	2 сеанс	Δh
Гр. рп. 884	839,2527	21,8121	839,1968	21,7820	795,1158	21,9107	795,0598	21,8805
Точка 1	817,4406		817,4148		773,2051		773,1793	
Точка 2	800,4862	16,9544	800,3915	17,0233	756,1678	17,0373	756,0731	17,1062
		11,9110						
Точка 3	788,5752	6,2562	788,5916	6,4131	744,1944	6,2974	744,2108	6,4543
Точка 4	782,3190		782,1785		737,8970		737,7565	

Среднеквадратические ошибки высотных значений, полученных в процессе обработки, варьируются в диапазоне от 2,5 мм до 8 мм, по полученным значениям СКО видим, что эти значения больше подходят под классификацию точных и технических значений. На получение более точных значений СКО могут повлиять увеличение времени ГНСС наблюдений на пунктах, что подтверждается значениями СКО базовых станций, а также применение альтернативных программных продуктов научного назначения, таких как GAMIT/GLOBK и Bernese, применяющих более усовершенствованные методы расчетов и применения параметров поправок [10].

Закключение

Сравнительный анализ показывает, что спутниковое нивелирование имеет ряд преимуществ перед традиционным геометрическим нивелированием, особенно учитывая географию Казахстана с ее большими территориями и различными формами рельефа, зачастую с труднодоступными местами.

Однако, как показывают полученные результаты по итогам исследований, применение выбранного нами метода спутникового нивелирования с использованием глобальной модели геоида позволяет достичь точности, подходящей для работ, не требующих высокой точности, для получения высокоточных результатов отметок высот на территории Республики Казахстан. Важно учитывать влия-

ние квазигеоида – физической формы Земли на определенной территории, которая определяет реальные высоты, а также необходимо увеличение времени наблюдений на пунктах – рассмотреть возможность использования альтернативных программных обеспечений для пост-обработки. В этом контексте разработка и внедрение собственного квазигеоида на территории РК становится актуальной задачей.

Разработка и внедрение собственного квазигеоида на территории Республики Казахстан является важным шагом для повышения точности и надежности спутникового нивелирования, которая позволит лучше учитывать локальные геофизические особенности территории.

Использование спутникового нивелирования в Казахстане открывает новые перспективы в геодезии и геодинимическом мониторинге. Проведенные исследования подтвердили актуальность и большой потенциал этого метода, что делает его перспективным для широкого внедрения в инженерных изысканиях и научных исследованиях.

Благодарность

Данное исследование финансируется Комитетом по науке Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № BR21882366 «Разработка модели геоида Республики Казахстан, как основа единой государственной системы координат и высот»).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Обиденко В.И., Оприцова О.А., Решетов А.П. Разработка методики получения нормальных высот на территории Новосибирской области с использованием глобальной геоида EGM2008 // Вестник СГУГиТ. 2016. № 1 (33). С. 14–25 (на русском языке)
2. Определение аномалий высот спутниковым методом / Баландин В. Н. [и др.] // Геодезия и картография. 2016. № 2. С. 11–16 (на русском языке)
3. Shin Moon-Seung, Dong-Ha Lee, In-Tae Yang. Определение отклонения вертикальных компонентов с помощью GPS и нивелирных измерений: пример Чунчоена, Канвондо // Журнал промышленных технологий. 2016. Т. 36. С. 65–69 (на английском языке)
4. Взаимная проверка высотных измерений GNSS и высокоточного геометрически-астрономического нивелирования / Hirt C. [и др.] // GPS решения. 2011. Т. 15. (2). С. 149–159 (на английском языке)
5. Влияние методов съемки между GNSS и прямым нивелированием на значения высоты на больших расстояниях в горной местности / Кубодэра Т. [и др.] // Международный журнал по охране окружающей среды и развитию сельских районов. 2016. Т. 7(1). С. 62–69 (на английском языке)
6. Об определении ортометрических высот по модели корректирующей поверхности на основе нивелирных наблюдений, ГНСС и модели геоида / Ким С.К. [и др.] // Журнал прикладной геодезии. 2018. Т. 12 (4). С. 323–333 (на английском языке)
7. Разработка и оценка гравитационной модели Земли 2008 (EGM2008) / Павлис Н.К. [и др.] // Журнал геофизических исследований. 2012. Т. 117 (B04406). С. 1–38 (на английском языке)
8. Odera P.A., Fukuda Y., Kuroishi Y. Высокорастворимая гравиметрическая модель геоида Японии на основе данных EGM2008 и локальных гравитационных данных // Земля, планеты и космос. 2012. Т. 64. С. 361–368 (на английском языке)
9. Nicolaidis A. GPS и поиск аксионов // Журнал современной физики. 2017. Т. 8. № 8. С. 1470–1477 (на английском языке)
10. Herring T.A., King R.W., McClusky S.C. Программа анализа глобальной системы Калмана и GPS: Справочное руководство: Кембридж, Массачусетский технологический институт, 2010. Вып. 10.4. (на английском языке)

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Обиденко В.И., Оприцова О., Решетов А.П. EGM2008 жаһандық геоидінің көмегімен Новосибирск облысында қалыпты биіктіктерді алу әдістемесін әзірлеу // Сібір мемлекеттік геожүйелер және технологиялар университетінің хабаршысы. 2016. № 1 (33). Б. 14–25 (орыс тілінде)

2. Биіктік ауытқуларын спутниктік әдіспен анықтау / Баландин В.Н. [және т. б.] // Геодезия және картография. 2016. № 2. Б. 11–16 (орыс тілінде)
3. Shin Moon-Seung, Dong-Ha Lee, In-Tae Yang. GPS және нивелирлеу өлшемдерін қолдану арқылы тік құрамдастардың ауытқуын анықтау: Чунчоен, Гангвон-до мысалы // Өнеркәсіптік технологиялар журналы. 2016. Т. 36. Б. 65–69 (ағылшын тілінде)
4. GNSS биіктік өлшемдерін және жоғары дәлдіктегі геометриялық-астрономиялық нивелирлеуді өзара тексеру / Hirt C. [және т. б.] // GPS шешімдері. 2011. Т. 15. (2). Б. 149–159 (ағылшын тілінде)
5. GNSS және тікелей нивелирлеу арасындағы зерттеу әдістерінің таулы аймақтардағы ұзақ қашықтықтағы биіктік мәндеріне әсері / Кубодера Т. [және т. б.] // Қоршаған ортаны қорғау және ауылдық аумақтарды дамыту халықаралық журналы. 2016. Т. 7 (1). Б. 62–69 (ағылшын тілінде)
6. Нивелирлеу бақылауларына, GNSS және геоидтық модельге негізделген түзету бетінің моделін пайдаланып ортометриялық биіктіктерді анықтау туралы / Ким С.К. [және т. б.] // Қолданбалы геодезия журналы. 2018. Т. 12 (4). Б. 323–333 (ағылшын тілінде)
7. Жердің тартылыс моделін әзірлеу және бағалау 2008 (EGM2008) / Павлис Н.К. [және т. б.] // Геофизикалық зерттеулер журналы. 2012. Т. 117 (B04406). Б. 1–38 (ағылшын тілінде)
8. Odera P.A., Fukuda Y., Kuroishi Y. EGM2008 және жергілікті тартылыс деректеріне негізделген жапондық геоидтің жоғары ажыратымдылықтағы гравиметриялық моделі // Жер, планеталар және ғарыш. 2012. Т. 64. Б. 361–368 (ағылшын тілінде)
9. Nicolaidis A. GPS және аксиондарды іздеу // Қазіргі физика журналы. 2017. Т. 8. № 8. Б. 1470–1477 (ағылшын тілінде)
10. Herring T.A., King R.W., McClusky S.C. Бағдарлама жаһандық жүйесін және GPS талдау бағдарламасы: Анықтамалық нұсқаулық: Кембридж, Массачусетс технологиялық институты, 2010. Шығ. 10.4 (ағылшын тілінде)

REFERENCES

1. Obidenko V.I., Opritova O.A., Reshetov A.P. Razrabotka metodiki polucheniya normal'nykh vysot na territorii Novosibirskoi oblasti s ispol'zovaniem global'noi geoida EGM2008 [Development of a methodology for obtaining normal heights in the Novosibirsk region using the global geoid EGM2008], Vestnik SGUGiT [Bulletin of SSUGT]. 2016. No. 1 (33). 14–25 pp. (in Russian)
2. Opredelenie anomalii vysot sputnikovym metodom [Definition of altitude anomalies using the Sputnik method], Balandin V.N. [and others], Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]. 2016. No. 2. 11–16 pp. (in Russian)
3. Shin Moon-Seung, Dong-Ha Lee, In-Tae Yang. Determination of the deflection of vertical components via GPS and leveling measurement: A Case Study of Chunchoen, Gangwon-do // Journal of Industrial Technology. 2016. V. 36. 65–69 pp. (in English)
4. Mutual validation of GNSS height measurements and high-precision geometric-astronomical levelling / Hirt C. [et al.] // GPS solutions. V. 15. Issue 2 (2011). 149–159 pp. (in English)
5. Effects of Surveying Methods between GNSS and Direct Leveling on Elevation Values over Long Distance in Mountainous Area / Kubodera T. [et al.] // International Journal of Environmental and Rural Development. 2016. V. 7 (1). 62–69 pp. (in English)
6. On determining orthometric heights from a corrector surface model based on leveling observations, GNSS, and a geoid model / Kim S.K. [et al.] // Journal of Applied Geodesy. 2018. V. 12 (4). 323–333 pp. (in English)
7. The Development and Evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008) / Pavlis N.K. [et al.] // Journal of Geophysical Research. 2012. V. 117 (B04406). 1–38 (in English)
8. Odera P.A., Fukuda Y., Kuroishi Y. A high-resolution gravimetric geoid model for Japan from EGM2008 and local gravity data // Earth, planets and space. 2012. V. 64. 361–368 pp. (in English)
9. Nicolaidis A. GPS and the Search for Axions // Journal of Modern Physics. 2017. V. 8. No. 8. 1470–1477 pp. (на английском языке)
10. Herring T.A., King R.W., McClusky S.C. Global Kalman Filter VLBI and GPS Analysis Program: Reference Manual: Cambridge, Massachusetts Institute of Technology, 2010. Release 10.4. (на английском языке)

Сведения об авторах:

Касымканова Х.М., д.т.н., профессор кафедры «Маркшейдерское дело и геодезия» Горно-металлургического института им. О.А. Байконурова, Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), k.Kassymkanova@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0002-9590-2079>

Кенбаев Р.А., руководитель службы делимитации и демаркации государственной границы РГП на ПХВ «Национальный центр геодезии и пространственной информации» (г. Астана, Казахстан), Almaskenbayev@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0004-6081-1611>

Ахметов Р., докторант кафедры «Маркшейдерское дело и геодезия» Горно-металлургического института им. О.А. Байконурова, Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), rustemahmetov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0677-6307>

Ибраимова А., гл. менеджер отдела бюджетных проектов КазННТУ им. К.И. Сатпаева, a.ibraimova@satbayev.university; <https://orcid.org/0009-0005-7539-8273>

Авторлар туралы мәліметтер:

Касымканова Х.М., т.ғ.д., Satbayev University, О.А. Байқоңыров атындағы Тау-кен металлургия институты, «Маркшейдерлік іс және геодезия» кафедрасының профессоры (Алматы қ., Қазақстан)

Кенбаев А.А., мемлекеттік шекараны делимитациялау және демаркациялау қызметінің бастығы «Ұлттық геодезия және кеңістіктік ақпарат орталығы» (Астана қ., Қазақстан),

Ахметов Р., Satbayev University О.А. Байқоңыров атындағы Тау-кен металлургия институты, «Маркшейдерлік іс және геодезия» кафедрасының докторанты (Алматы қ., Қазақстан)

Ибраимова А., Қ.И. Сәтбаев атындағы ҚазҰТЗУ бюджеттік жобалар бөлімінің бас менеджері (Алматы қ., Қазақстан)

Information about the authors:

Kassymkanova Kh.M., Doctor of Technical Sciences, Docent, Professor of the Department of Mine Surveying and Geodesy of the Mining and Metallurgical Institute named after O.A. Baikonurov of the Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Kenbaev A.A., Head of the State Border Delimitation and Demarcation Service «National Center of Geodesy and Spatial Information» (Astana, Kazakhstan)

Akhmetov R., Ph.D student at the Department of Mine Surveying and Geodesy, of the Mining and Metallurgical Institute named after O.A. Baikonurov of the Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Ibraimova A., Chief Manager of the Budget Projects Department of K.I. Satpayev KazNTU (Almaty, Kazakhstan)

ДЕСЯТЫЙ МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ

SEYMARTEC
DIGITAL

ЧЕЛЯБИНСК
ОТЕЛЬ «RADISSON BLU»

25–27
НОЯБРЯ

ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ
В ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ
ОТРАСЛИ



seymartec.ru



+7 499 638-23-29



info@seymartec.ru

ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ И ДОКАЗАННАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ



ME Elecmetal обладает знаниями, опытом и производственными возможностями для обеспечения вашего предприятия надежными и эффективными решениями в технологиях дробления и измельчения.



ME FIT Grinding

**Изнашиваемые детали для мельниц
и дробилок всех типов**

- | | |
|-----------------------|----------------|
| ■ Полусамоизмельчения | ■ Гирационных |
| ■ Самоизмельчения | ■ Щековых |
| ■ Шаровых | ■ Конусных |
| ■ Стержневых | ■ Вертикальных |

ME Elecmetal

тел.:

+7 914 880 4545
+7 777 247 0787
+1 778 875 7525

mongolia@me-elecmetal.com
www.me-elecmetal.com

Код МРНТИ 36.16.19

Ф.А. Илиуф, *Т.С. Садыкова, А.Т. Камза, С.Ж. Бейсенбаева
Satbayev University (г. Алматы, Казахстан)

СРАВНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА НА ПРИМЕРЕ СКЛОНА МЕЖДУНАРОДНОГО КОМПЛЕКСА ЛЫЖНЫХ ТРАМПЛИНОВ «СУНКАР»

Аннотация. Оползни – опасные геодинамические процессы, напрямую связанные с движением масс горных пород под действием силы тяжести. В данной статье рассматривается склон МКЛТ «Сункар», находящийся в перечне оползнеопасных территорий с 2016 года. Объект исследования расположен в близости от жилых районов, что повышает его социальную и инфраструктурную значимость. Целью исследования является анализ восприимчивости участка к оползням с использованием цифровых моделей рельефа (ЦМР). В работе рассматриваются различные источники ЦМР (SRTM, ALOS, ASTER), выполнено их сравнение по точности и разрешению применительно к локальному ландшафту. На основе ГИС-анализа и пространственных показателей рельефа (уклон, экспозиция) проведена первичная оценка склоновой неустойчивости. Применение высокоточной ЦМР позволяет точно выявить оползнеопасные зоны и заложить основу для моделирования восприимчивости.

Ключевые слова: оползнеопасный участок, цифровая модель рельефа, сравнение, трамплин, движение масс, оценка точности.

Халықаралық шаңғы трамплиндер кешені «Сұңқар» бөуі мысалында сандық биіктік модельдерді салыстыру
Аңдатпа. Көшкін – ауырлық күшінің әсерінен тау жыныстары массаларының қозғалысымен тікелей байланысты қауіпті геодинамикалық процестер. Бұл мақалада 2016 жылдан бастап көшкін қаупі бар аумақтар тізімінде тұрған «Сұңқар» МКЛТ-ның енісі қарастырылған. Зерттеу нысаны тұрғын үйлерге жақын орналасқан, бұл оның әлеуметтік және инфрақұрылымдық маңызын арттырады. Зерттеудің мақсаты – сандық биіктік модельдерін (СБМ) пайдалана отырып, учаскенің көшкінге бейімділігін талдау. Қағаз әртүрлі СБМ көздерін (SRTM, ALOS, ASTER) зерттейді және оларды жергілікті ландшафтка қатысты дәлдік пен ажыратымдылық тұрғысынан салыстырады. Географиялық ақпараттық жүйе талдауы және кеңістіктік рельеф көрсеткіштері (еніс, аспект) негізінде еністің тұрақсыздығына алғашқы бағалау жүргізілді. Жоғары дәлдіктегі СБМ пайдалану көшкін қаупі бар аймақтарды дәл анықтауға мүмкіндік береді және сезімталдықты модельдеуге негіз береді.

Түйінді сөздер: көшкін қауіпті аймақ, сандық биіктік моделі, салыстыру, трамплиннен трамплин, жаппай қозғалыс, дәлдікті бағалау.

Comparison of Digital Elevation Models on the example of the International ski jump complex «Sunkar» slope

Abstract. Landslides are dangerous geodynamic processes directly related to the movement of rock masses under the action of gravity. This article considers the slope of the Sunkar MKLT, which has been on the list of landslide-prone areas since 2016. The study object is located close to residential areas, which increases its social and infrastructural significance. The aim of the study is to analyze the susceptibility of the site to landslides using digital elevation models (DEM). The paper considers various DEM sources (SRTM, ALOS, ASTER), compares them in terms of accuracy and resolution in relation to the local landscape. Based on GIS analysis and spatial relief indicators (slope, aspect), a primary assessment of slope instability was carried out. The use of a highly accurate DEM allows for accurate identification of landslide-prone areas and lays the foundation for susceptibility modeling.

Key words: landslide-hazardous area, Digital Elevation Model, comparison, ski jump, mass movement, accuracy assessment.

Введение

Район местности, где расположен МКЛТ «Сункар», является комплексом трамплинов, предназначенных для прыжков на лыжах, построенный в 2011 году к зимним Азиатским играм. Сам склон уже был использован в 1956 году для восстановления 55-метрового трамплина для первых республиканских соревнований Казахской ССР по лыжному двоеборью и прыжкам с трамплина¹. Лыжный трамплин в Алматы был возведен на участке, ранее использовавшемся для добычи глины, что само по себе делало его геологически нестабильным. Склоны в этой местности сформированы из лессовых пород – рыхлых и подверженных разрушению при воздействии влаги и механических нагрузок. В советское время строительство на таких грунтах считалось крайне рискованным, и специалисты избегали реализации крупных проектов на подобных территориях. Зеленые насаждения, ранее покрывавшие склоны, играли важную роль в предотвращении эрозии. Деревья, кустарники и травяной покров укрепляли почву, снижая вероятность оползней. Однако во время строительства трамплина значительная часть растительности была удалена, что значительно ослабило структуру грунта и сделало его более подверженным разрушению (рис. 1).

Весной 2016 года ситуация достигла критической точки. Согласно официальному предупреждению ГУ «Казселеза-

чита», сильные и продолжительные осадки привели к массовому сходу оползней в Алматы и Алматинской области. Основными причинами неустойчивости почвы были переувлажнение грунта и искусственное подрезание склонов под строительство зданий и дорог. 18 мая 2016 года в 16:30 в Бостандыкском районе, в южной части трамплина, произошел оползень. В районе садоводческого общества «Дружба» масса грунта сошла на местную дорогу, заблокировав проезд. Специалисты Министерства по чрезвычайным ситуациям отметили, что весь комплекс лыжных трамплинов «Сункар» оказался переувлажненным и представлял угрозу близлежащим частным домам. Организацией, ответственным за эксплуатацию объекта, было рекомендовано немедленно принять меры по предотвращению возможной чрезвычайной ситуации. Таким образом, строительство лыжного трамплина на геологическом нестабильном участке привело к увеличению рисков оползневых процессов. Игнорирование природных особенностей местности и недостаточные инженерные меры способствовали дестабилизации склона, что создало угрозу не только для самого спортивного комплекса, но и для окружающих жилых территорий².

Методы/исследования

Данный участок представляет интерес с точки зрения применения различных цифровых моделей рельефа, так

¹КазТрк: АО «Республиканская телерадиокорпорация «Казахстан», б-ка: сайт. Алматы, 2017. URL: <https://www.kaztrk.kz> (дата обращения: 01.03.2025). Режим доступа: открытый.

²Informburo.kz: новостной сайт. Алматы, 2017. URL: <https://informburo.kz> (дата обращения: 01.03.2025). Режим доступа: открытый.



Рис. 1. Склон района Трамплина. Фото Руслана Минулина.

Сурет 1. Трамплин аймағының еңісі. Суретті түсірген Руслан Минулин.

Figure 1. Slope of the Tramplin area. Photo by Ruslan Minulin.

как на его территории фиксировались активные оползневые смещения. Существуют многочисленные особенности и условия местности, называемые «причинными факторами» [1], влияющие на оценку восприимчивости к оползням, к которым относятся гидрология, рельеф местности, геологическое строение и землепользование, определение которых является важным этапом к оценке восприимчивости [2]. Знание и выявление причинных факторов дает возможность прогнозирования будущих оползней в районах, где уже было зафиксировано движение масс земли, так как данные регионы уже входят в зоны с условиями возникновения новых оползней [2, 3]. Также стоит учитывать факторы-триггеры, к которым относят человеческую деятельность и природные факторы, такие как изменение профиля склона, искусственная подрезка, грунтовые воды, обильные осадки и снеготаяние, вулканическая активность, уничтожение растительности и т. д. [4].

На сегодняшний день проведено несколько сравнительных исследований, оценивающих влияние пространственного разрешения ЦМР на прогнозирование оползневой активности. Например, в исследовании Дитриха и коллег [5] анализировались различные модели рельефа, и было выявлено, что при классификации участков со средней подверженностью оползням качество результатов оставалось схожим вне зависимости от пространственного разрешения.

Несмотря на высокий уровень опасности оползней в отдельных регионах, Алматы и Алматинской области, до сих пор не проводилось исследований, сопоставляющих точность различных ЦМР при прогнозировании восприимчивости к оползням. Данный регион был выбран для исследования из-за высокой частоты оползневых событий в его расположенности на опасном склоне. Настоящее исследование направлено на сравнительный анализ четырех цифровых моделей рельефа (таблица 1): ASTER GDEM (30 м), SRTM (30 м), ЦМР, полученная с Google Earth Pro, и ЦМР, построенная по ортофотоплану.

Изменение высотных отметок может оказывать влияние на геоморфологические процессы, характер растительного покрова и интенсивность эрозии в данной местности. Это, в свою очередь, способно повлиять на уровень вос-

приимчивости территории к оползням [6].

Одним из ключевых факторов, влияющих на возникновение оползней, является уклон поверхности. Как правило, увеличение крутизны склонов приводит к росту касательных напряжений, что повышает вероятность развития оползневых процессов [7]. Анализ уклона был проведен для каждой из рассмотренных ЦМР с применением инструмента расчета уклона в ArcGIS Pro 3.4.0 (см. таблицу 1). В ходе анализа были выявлены различия в максимальных значениях уклонов для разных источников данных: ASTER – 89,77°, SRTM – 40,60°, Google Earth Pro – 33,49°, Ортофотоплан – 49,7°. Эти расхождения обусловлены особенностями алгоритмов обработки рельефа и точностью данных, что привело к различию в диапазонах классов уклонов.

Экспозиция оказывает значительное влияние на поступление солнечного света, направление осадков и силу ветра, что, в свою очередь, определяет условия роста растительности, скорость эрозионных процессов и мощность почвенного покрова [8]. Для дальнейшего анализа направления склонов были распределены по десяти классам (см. таблицу 1).

При изучении склонов, подверженных оползням, важно учитывать не только геоморфологические характеристики (уклон, экспозицию), но и факторы, связанные с растительностью и влажностью почвы. В данном исследовании рассчитаны NDVI (нормализованный разностный вегетационный индекс) и WRI (водный индекс), которые позволяют выявить взаимосвязь между деградацией растительного покрова, увлажненностью грунтов и возникновением оползней.

NDVI дает представление о плотности растительного покрова. Низкие значения характерны для участков с редкой или отсутствующей растительностью, что делает почву уязвимой к эрозии и снижает ее устойчивость. В местах с более высоким NDVI почвенный покров стабилен, что способствует уменьшению риска оползней.

WRI отражает содержание влаги в почве. Высокие значения указывают на переувлажнение грунтов, что может приводить к ослаблению их структуры и, как следствие, к сходу оползней.

Таблица 1

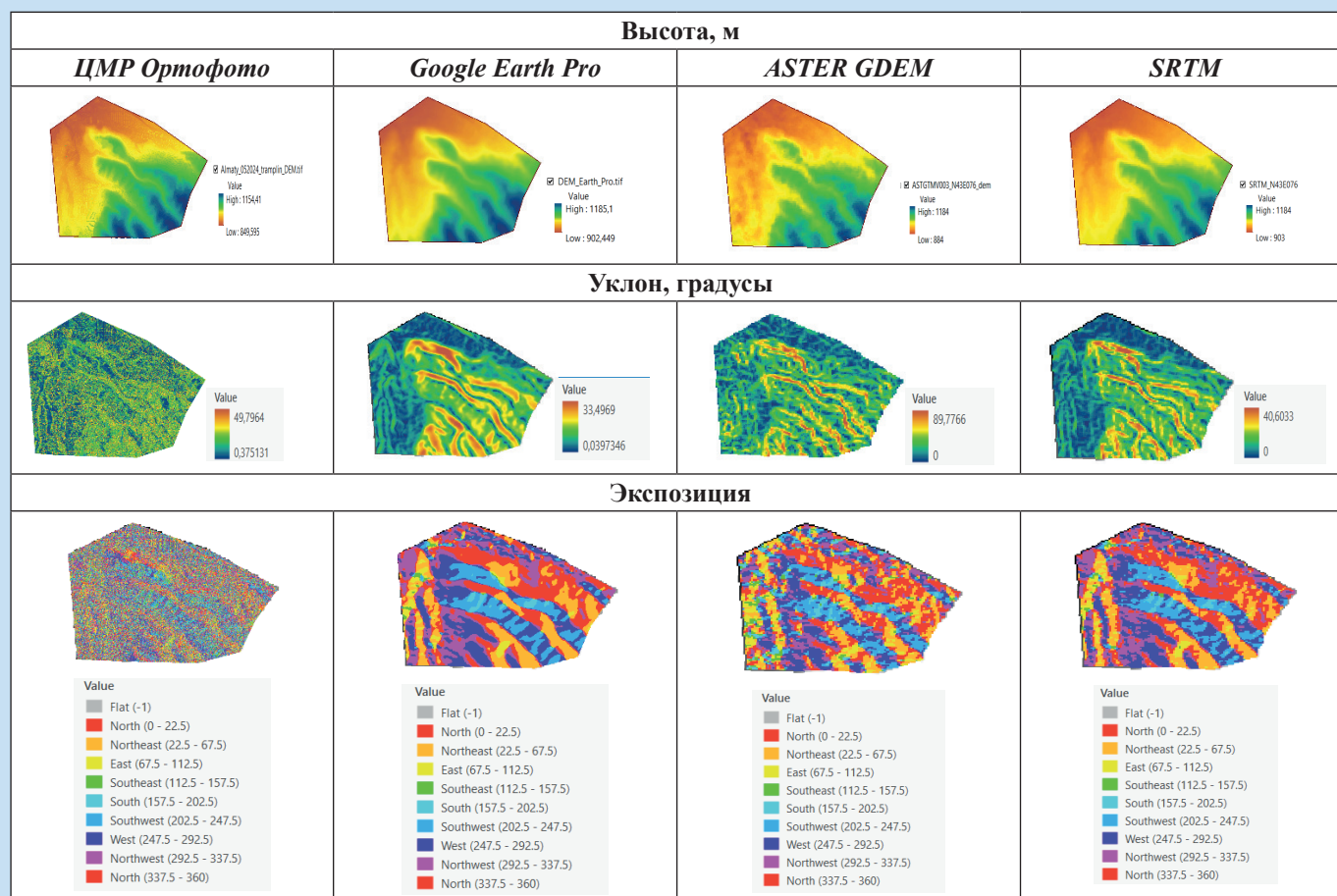
Факторы, способствующие возникновению оползней

Кестме 1

Көшкіндердің пайда болуына ықпал ететін факторлар

Table 1

Factors contributing to the occurrence of landslides



Анализ выполнен на основе спутниковых данных за 2022, 2023 и 2024 годы (см. таблицу 2), что позволило проследить изменения в динамике. Результаты сопоставлены с местами, где фиксировались оползни, и выявлены следующие тенденции:

- Оползни происходили преимущественно в зонах с низким NDVI, что подтверждает роль растительности в стабилизации склонов.
- В оползнеопасных районах фиксировались повышенные значения WRI, что свидетельствует о значительном увлажнении грунтов перед сходом оползней.
- В динамике наблюдается следующая картина: там, где растительный покров уменьшался (снижение NDVI), одновременно увеличивалась влажность (рост WRI). Это способствовало ослаблению грунтов и формированию условий для оползневых процессов.

Полученные результаты показывают, что комплексный анализ NDVI и WRI в сочетании с уклоном и экспозицией склонов позволяет не только идентифицировать уже пострадавшие участки, но и прогнозировать зоны потенциальных оползней. Такой подход может применяться в мониторинговых системах и предупреждающих програм-

мах, особенно в районах, где наблюдаются интенсивные оползневые процессы, вызванные как природными, так и антропогенными факторами.

Для анализа рельефа местности и выявления закономерностей, связанных с развитием оползневых процессов, были использованы различные цифровые модели рельефа (ЦМР), полученные из различных источников. Для оценки точности моделей были выбраны 20 случайных точек в пределах исследуемой территории, по которым произведен сравнительный анализ высотных значений.

Результаты

Анализ полученных значений показывает значительные расхождения между моделями. Разница между высотами, полученными по ортофотоплану и Google Earth Pro, составляет от 38,21 м до 37,44 м, а между ASTER и SRTM – до 15,36 м.

Различия между моделями могут быть обусловлены следующими факторами:

- Различное пространственное разрешение ЦМР – у SRTM оно составляет ~30 м, у ASTER ~30 м, у Google Earth Pro может варьироваться, также значения высот

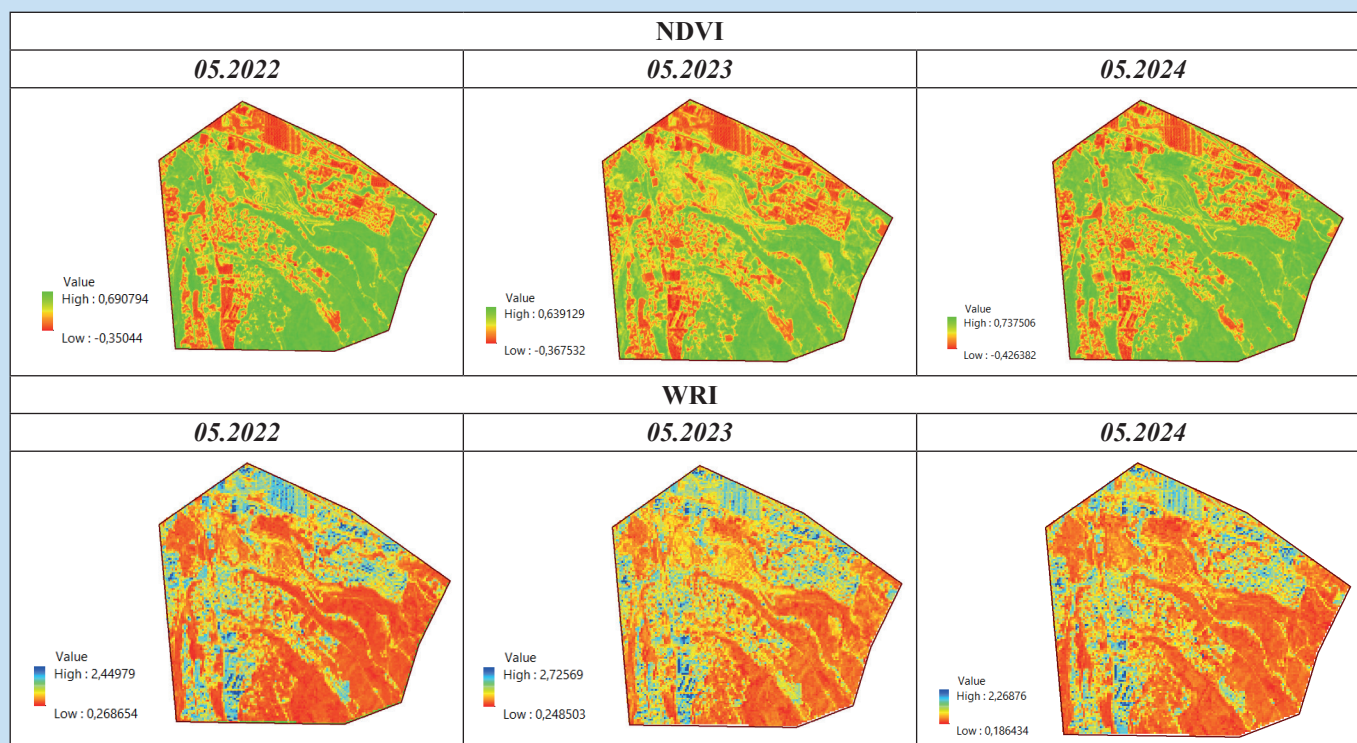
Таблица 2

Характеристики склонов на основе индексов NDVI и WRI

Кесме 2

NDVI және WRI индекстеріне негізделген көлбеу сипаттамалары

Table 2

Slope characteristics based on NDVI and WRI indices

у точек Google Earth Pro (2023) и SRTM (2013) полностью совпадают.

- Разное время получения данных – изменения рельефа за прошедшие десятилетия могли повлиять на высоты, особенно в районах с активными геодинамическими процессами. ЦМР, построенная по ортофотоплану (2024 г.), обладает высокой детализацией, так как создана на основе аэрофотосъемки, что позволяет точно отразить мелкомасштабные формы рельефа и актуальное состояние поверхности на момент съемки. ЦМР Google Earth Pro (2023 г.) предоставляет данные с разрешением, зависящим от качества и источников спутниковых снимков, что делает ее полезной для общего анализа рельефа, однако менее точной по сравнению со специализированными источниками. ЦМР ASTER (2019 г.), построенная на данных спутниковой стереосъемки, имеет среднее пространственное разрешение (около 30 м), что делает ее подходящей для регионального анализа, но недостаточно детализированной для локальных задач. ЦМР SRTM (2000 г., обновления 2013 г.), основанная на радиолокационной интерферометрии, охватывает всю земную поверхность и имеет пространственное разрешение порядка 30 м, что делает ее полезной для макроанализов, но ограниченной в случаях, требующих высокой точности³.

Обсуждение результатов

Кроме того, значительное влияние оказывает наличие растительности. В моделях ASTER и SRTM высотные данные могут включать не только поверхность земли, но и верхушки деревьев или кустарников, что увеличивает значения высот. В отличие от них, ортофотоплан, основанный на более точной аэрофотосъемке и корректировке рельефа, с большей вероятностью отражает реальную высоту поверхности. Это особенно заметно в районах с плотной растительностью, где разница между моделями может достигать десятков метров. Анализ графика (см. рис. 2) показывает различия в высотных значениях, полученных с помощью ЦМР.

Ортофотоплан демонстрирует наиболее стабильные и высокие значения высот, что объясняется высокой точностью аэрофотосъемки и минимальными искажениями при построении модели. ЦМР ASTER и SRTM, обладая меньшим пространственным разрешением, демонстрируют более сглаженные профили высот. Это особенно заметно на сложных участках рельефа, где перепады высот выражены сильнее. Однако стоит отметить, что на отдельных точках (см. рис. 3) – например, на 16-й и 20-й – данные ASTER показывают более высокие значения по сравнению с SRTM. Это может быть связано не с резкими изменениями рельефа, а с особенностями спут-

³LP DAAC: Распределенный активный архивный центр НАСА по наземным процессам: сайт. США, 2019. URL: <https://lpdaac.usgs.gov/> 13827 (дата обращения: 01.03.2025). Режим доступа: открытый.

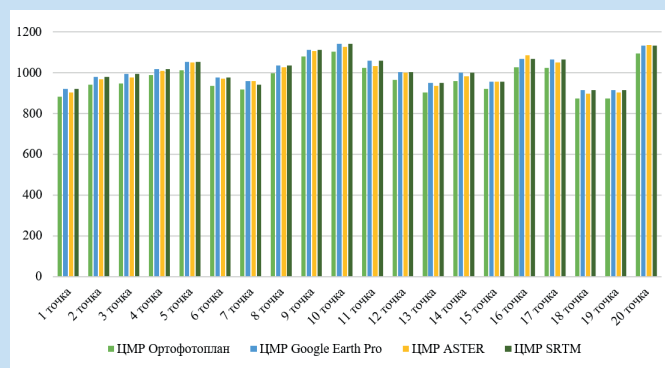


Рис. 2. Вариации высотных значений по данным разных ЦМР.

Сурет 2. Әртүрлі СБМ-не сәйкес биіктік мәндерінің өзгеруі.

Figure 2. Variations in elevation values according to different DEMs.

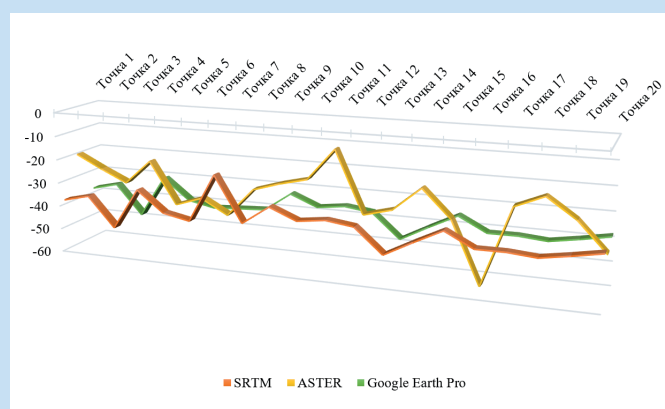


Рис. 3. Разница высот по сравнению с точками по ортофотоплану.

Сурет 3. Ортофотокартадағы нүктелермен салыстырғанда биіктіктердің айырмашылығы.

Figure 3. Difference in heights compared to points on the orthophotomap.

никовой съемки ASTER, где возможно возникновение локальных артефактов из-за угла съемки или облачного покрова в момент сканирования.

В свою очередь, совпадение данных на 5-й и 12-й точках может объясняться тем, что в этих зонах рельеф более равномерный и пологий. На таких участках менее детализированные модели, как ASTER и SRTM, могут давать значения, близкие к высокоточным данным ортофотоплана и Google Earth Pro, поскольку сглаживание незначительно влияет на итоговый результат.

SRTM показывает стабильное отклонение около -35...-48 м. Это говорит о более сглаженном рельефе и недостаточной детализации модели. ASTER демонстрирует меньшие отклонения (в среднем -20...-35 м), но есть выбросы, например, на 16-й и 20-й точках. Это может быть связано с погрешностями модели в сложных участках. Google Earth Pro почти всегда совпадает с SRTM, что говорит о том, что Google использует аналогичные данные, но с дополнительной обработкой. На точках с резкими изме-

нениями рельефа (2, 14) модели дают разные результаты. Это связано с тем, что SRTM и ASTER имеют более низкое разрешение, и они «сглаживают» рельеф. Ортофотоплан остается эталоном за счет высокой детализации аэрофотосъемки.

Проведенный анализ показывает, что ЦМР, созданная на основе ортофотоплана, является наиболее точной и актуальной моделью рельефа. Использование данных ASTER и SRTM допустимо для общего анализа рельефа, но требует корректировки и учета возможных ошибок.

Заключение

Проведенный анализ склоновой территории Международного комплекса лыжных трамплинов «Сункар» позволил выявить совокупность природных факторов, существенно влияющих на формирование и развитие оползневых процессов. Использование различных цифровых моделей рельефа (SRTM, ASTER, ALOS и др.) показало наличие значительных расхождений в высотных отметках, особенно в сложном горном рельефе. Это подчеркивает необходимость их калибровки, а также актуальность использования более детализированных источников, таких как лазерное сканирование (LiDAR), особенно в рамках высокоточной оценки локальных деформаций.

Анализ уклона и экспозиции рельефа позволил установить, что наибольшую склонность к оползням демонстрируют крутые склоны южной и юго-западной ориентации, где инсоляция способствует ускоренному испарению влаги и снижению устойчивости пород. Кроме того, такие склоны чаще испытывают сезонные колебания влажности, что увеличивает механическую нестабильность склоновых материалов. Южные склоны с низким NDVI и повышенным WRI более подвержены деструктивным процессам, особенно в сочетании с интенсивными осадками.

Цифровые модели рельефа, примененные в работе, демонстрируют заметные расхождения по высоте, что требует их калибровки и, при возможности, использования более точных источников (например, LiDAR). В качестве меры повышения устойчивости склонов рекомендуется внедрение методов биоинженерной стабилизации, в том числе озеленение уязвимых участков. Комплексный ГИС-анализ, объединяющий цифровые модели рельефа, показатели растительности, влажности и морфометрии склонов, доказал свою эффективность в задачах диагностики склоновой нестабильности. Предложенный подход может быть масштабирован и адаптирован для других горных районов Алматы с целью формирования устойчивой системы мониторинга и предотвращения оползневых рисков.

Благодарность

Данное исследование профинансировано Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Казахстана (Грант ИРН AP23489830 «Разработка интегрированных технологий ДЗЗ и машинного обучения для мониторинга и оценки оползней»).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Карты инвентаризации оползней: новые инструменты для решения старой проблемы / Гуззетти Ф. [и др.] // *Науки о Земле*. 2012. Т. 112. С. 42–66 (на английском языке)
2. Оптимизация зонирования восприимчивости к оползням: влияние пространственного разрешения ЦМР и разграничения единиц уклона на модели логистической регрессии / Шлогель Р. [и др.] // *Геоморфология*. 2018. Т. 301. С. 10–20 (на английском языке)
3. Аялев Л., Ямагиши Х. Применение логистической регрессии на основе ГИС для картирования подверженности оползням в горах Какуда-Яхико, Центральная Япония // *Геоморфология*. 2005. Т. 65. С. 15–31 (на английском языке)
4. Новая ансамблевая двумерная статистическая доказательная функция убеждения с аналитическим иерархическим процессом на основе знаний и многомерной статистической логистической регрессией для картирования восприимчивости к оползням / Althuwaynee O.F. [и др.] // *Catena*. 2014. Т. 114. С. 21–36 (на английском языке)
5. Dietrich V.E., Bellugi D., De Azua R.R. Проверка модели мелкого оползня SHALSTAB для управления лесами // *Appl.* 2001. Т. 2. С. 195–227 (на английском языке)
6. Сравнительное исследование дерева логистической модели, случайного леса и моделей дерева классификации и регрессии для пространственного прогнозирования восприимчивости к оползням / Chen W. [и др.] // *Catena*. 2017. Т. 151. С. 147–160 (на английском языке)
7. Канвал С., Атиф С., Шафик М. Картографирование оползневой восприимчивости северных районов Пакистана на основе ГИС, пример бассейнов Шигар и Шайок // *Geomat. Nat. Hazards Risk*. 2017. Т. 8. С. 348–366 (на английском языке)
8. Чжан С., Ли Р., Ван Ф., Ино А. Характеристики оползней, вызванных землетрясением Хоккайдо-Восточный Ибури в 2018 году, Северная Япония / Чжан С. [и др.] // *Оползни*. 2019. Т. 16. С. 1691–1708 (на английском языке)

ПАЙДАЛАНҒАН ӘДБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Көшкіндерді есепке алу карталары: ескі мәселені шешудің жаңа құралдары / Гуззетти Ф. [және т. б.] // *Жер туралы ғылымдар*. 2012. Т. 112. Б. 42–66 (ағылшын тілінде)
2. Көшкінге сезімталдықты аймақтарға бөлуді оңтайландыру: DEM кеңістіктік ажыратымдылығының және логистикалық регрессия модельдеріне көлбеу бірлігін анықтаудың әсері / Шлогель Р. [және т. б.] // *Геоморфология*. 2018. Т. 301. Б. 10–20 (ағылшын тілінде)
3. Аялев Л., Ямагиши Х. Орталық Жапониядағы Какуда-Яхико тауларында көшкінге бейімділік картасын жасау үшін ГАЗ негізіндегі логистикалық регрессияны қолдану // *Геоморфология*. 2005. Т. 65. Б. 15–31 (ағылшын тілінде)
4. Көшкінге бейімділік картасын жасау үшін білімге негізделген аналитикалық иерархиялық үдерісі және көп мәнді статистикалық логистикалық регрессиясы бар жаңа қос ауыспалы статистикалық дәлелдер сенімі функциясы / Althuwaynee O.F. [және т. б.] // *Catena*. 2014. Т. 114. Б. 21–36 (ағылшын тілінде)
5. Dietrich V.E., Bellugi D., De Azua R.R. Орман шаруашылығын жүргізу үшін SHALSTAB таяз көшкін үлгісін валидациялау // *Appl.* 2001. Т. 2. Б. 195–227 (ағылшын тілінде)
6. Кеңістіктік көшкінге бейімділігін болжау үшін логистикалық ағашты, кездейсоқ орманды және классификациялық және регрессиялық ағаш үлгілерін салыстырмалы зерттеу / Chen W. [және т. б.] // *Catena*. 2017. Т. 151. Б. 147–160 (ағылшын тілінде)
7. Канвал С., Атиф С., Шафик М. Солтүстік Пәкістанның ГАЗ негізіндегі көшкінге бейімділік картасы, Шигар және Шайок бассейндерінің жағдайын зерттеу // *Geomat. Nat. Hazards Risk*. 2017. Т. 8. Б. 348–366 (ағылшын тілінде)
8. 2018 жылғы Хоккайдо-Шығыс Ибури жер сілкінісі салдарынан болған көшкіндердің сипаттамасы, Солтүстік Жапония / Чжан С. [және т. б.] // *Көшкін*. 2019. Т. 16. Б. 1691–1708 (ағылшын тілінде)

REFERENCES

1. Landslide Inventory Maps: New Tools for Solving an Old Problem / Guzzetti F. [et al.] // *Earth Sciences*. 2012. V. 112. 42–66 pp. (in English)
2. Optimizing Landslide Susceptibility Zoning: Effects of DEM Spatial Resolution and Slope Unit Delineation on Logistic Regression Models / Schlögel R. [et al.] // *Geomorphology*. 2018. V. 301. 10–20 pp. (in English)

3. Ayalev L., Yamagishi H. *Application of GIS-based Logistic Regression for Landslide Susceptibility Mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan* // *Geomorphology*. 2005. V. 65. 15–31 pp. (in English)
4. *A Novel Ensemble Bivariate Statistical Evidence Belief Function with Knowledge-Based Analytic Hierarchy Process and Multivariate Statistical Logistic Regression for Landslide Susceptibility Mapping* / Althuwaynee O.F. [et al.] // *Catena*. 2014. V. 114. 21–36 pp. (in English)
5. Dietrich V.E., Bellugi D., De Azua R.R. *Water Sci. Validation of the SHALSTAB shallow landslide model for forest management* // *Appl.* 2001. V. 2. 195–227 pp. (in English)
6. *Comparative study of logistic tree, random forest, and classification and regression tree models for spatial prediction of landslide susceptibility* / Chen W. [et al.] // *Catena*. 2017. V. 151. 147–160 pp. (in English)
7. Kanwal S., Atif S., Shafiq M. *GIS-based landslide susceptibility mapping of northern Pakistan, a case study of Shigar and Shayok basins* // *Geomat. Nat. Hazards Risk*. 2017. V. 8. 348–366 pp. (in English)
8. *Landslide characteristics triggered by the 2018 Hokkaido-East Iburi earthquake, Northern Japan* / Zhang S. [et al.] // *Landslides*. 2019. V. 16. 1691–1708 pp. (in English)

Сведения об авторах:

Илиуф Ф.А., докторант Ph.D, кафедра «Маркшейдерское дело и геодезия» Горно-металлургического института им. О.А. Байконурова, Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), 990602450644-D@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0002-5198-6370>

Садыкова Т.С., докторант 3-го года обучения кафедры «Информационные системы» Международного университета информационных технологий (г. Алматы, Казахстан), t.sadykova@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0002-6462-3894>

Камза А.Т., доктор Ph.D, старший научный сотрудник Satbayev University (г. Алматы, Казахстан) anzhelikakamza@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-0823-199X>

Бейсенбаева С.Ж., докторант 2-го курса кафедры «Гидрогеология, инженерная и нефтегазовая геология» института геологии и нефтегазового дела им. К. Турысова Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), Beisenbayeva.S@stud.satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0001-9773-928X>

Авторлар туралы мәліметтер:

Илиуф Ф.А., Ph.D докторанты, О.А. Байқоңыров атындағы Тау-кен металлургия институтының «Маркшейдерия және геодезия» кафедрасы, Сәтбаев Университеті (Алматы қ., Қазақстан)

Садыкова Т.С., Халықаралық ақпараттық технологиялар университетінің ақпараттық жүйелер кафедрасының 3-курс Ph.D докторанты (Алматы қ. Қазақстан)

Камза А.Т., Ph.D, Сәтбаев университетінің аға ғылыми қызметкері (Алматы қ., Қазақстан)

Бейсенбаева С.Ж., Қ. Тұрысов атындағы Геология және мұнай-газ ісі институтының «Гидрогеология, инженерлік және мұнай-газ геологиясы» кафедрасының 2-курс докторанты Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан)

Information about the authors:

Iliuf F.A., Ph.D doctoral student, «Mine surveying and geodesy» of the Mining and Metallurgical Institute named after O.A. Baikonurov, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Sadykova T.S., 3rd year Ph.D student of the Department of Information Systems of the International University of Information Technologies (Almaty, Kazakhstan)

Kamza A.T., Ph.D, Senior Researcher at Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Beisenbayeva S.Zh., 2nd year doctoral student of the Department of «Hydrogeology, Engineering and Oil and Gas Geology» of K. Turysov Institute of Geology and Oil and Gas Engineering, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)



TECH MINING RUSSIA

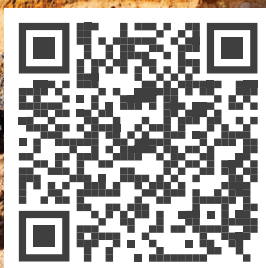
www.techmining.ru

7-Я СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ И ВЫСТАВКА
СТРОИТЕЛЬСТВО, МОДЕРНИЗАЦИЯ И
ЦИФРОВИЗАЦИЯ ГОРНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

17-18 сентября
2025

Москва

Novotel Moscow City



16+

Код МРНТИ 36.23.31

*А. Ильясова¹, Д.Э. Урманова¹, Э.Б. Серикбаева², С.В. Турсбеков¹

¹Satbayev University (г. Алматы, Казахстан),

²Институт Ионосферы (г. Алматы, Казахстан)

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ КАРТИРОВАНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Аннотация. В статье рассматривается геологическое картирование с использованием данных дистанционного зондирования. Проведен сравнительный анализ метода Band Math в средах ENVI и Google Earth Engine. Оценка включала точность выделения объектов, скорость обработки, удобство реализации и визуальное качество карт. Используются данные ASTER для построения минералогических индексов оксидов железа, серицита и карбонатов. Показано, что ENVI обеспечивает более детальное выявление аномалий, в то время как GEE эффективен при масштабной обработке данных. Новизна работы заключается в комплексном количественном сравнении результатов в обоих программных решениях и обосновании комбинированного применения для задач геологического анализа.

Ключевые слова: геологическое картирование, методы спектрального анализа, дистанционное зондирование, ASTER, ENVI, Google Earth Engine, Band Math, минералогические индексы, геоинформационные технологии, обработка спутниковых данных.

Геологиялық нысандарды картаға түсірудің математикалық әдістерінің дәлдігін бағалау

Аннотация. Мақала Жерді қашықтықтан зондтау деректерін пайдалана отырып, геологиялық карталауға арналған. Зерттеу барысында ENVI және Google Earth Engine бағдарламаларында Band Math әдісі қолданылып, нәтижелері салыстырмалы түрде бағаланды. Бағалау критерийлері ретінде объектілерді анықтау дәлдігі, өңдеу жылдамдығы, іске асыру ыңғайлылығы және визуалды сапа қолданылды. ASTER деректері негізінде темір оксидтері, серицит және карбонат аймақтары анықталды. ENVI нақты минералогиялық аномалияларды көрсетуімен ерекшеленсе, GEE кең ауқымды өңдеуде тиімділігімен сипатталады. Мақалада екі бағдарламалық ортаның артықшылықтары мен шектеулері көрсетіліп, оларды біріктіріп қолдану ұсынылады.

Түйінді сөздер: геологиялық карта жасау, спектрлік талдау әдістері, қашықтықтан зондтау, ASTER, ENVI, Google Earth Engine, Band Math, минералогиялық индекстер, геоақпараттық технологиялар, спутниктік деректерді өңдеу.

Assessment of the accuracy of mathematical methods for mapping geological objects

Abstract. This study focuses on geological mapping using remote sensing data processed with the Band Math method in ENVI and Google Earth Engine (GEE) platforms. The main objective was to evaluate the accuracy and effectiveness of each software environment in detecting mineralogical anomalies based on ASTER satellite data. Three key mineral indices were analyzed: iron oxides, sericite, and carbonates. The study assessed the accuracy of object delineation, processing speed, implementation convenience, and visual quality. The results showed that ENVI provides higher spatial detail and better contrast, especially for small-scale anomalies, while GEE demonstrated higher processing speed and efficiency for large-area analyses due to its cloud-based architecture. A pixel-based statistical comparison revealed quantifiable differences between platforms. The study concludes with a recommendation for combined use: GEE for preliminary analysis and ENVI for detailed mineralogical mapping. This dual-platform approach contributes to more flexible and scalable workflows in geological remote sensing.

Key words: geological mapping, mineralogical analysis, Band Math, ENVI, Google Earth Engine, ASTER, remote sensing, spectral indices, satellite data processing, geospatial technologies.

Введение

Актуальность. Современное геологическое картирование все шире использует методы спектрального анализа дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), среди которых метод математических операций над каналами (Band Math) зарекомендовал себя как эффективный инструмент для выделения минералогических аномалий. Однако, несмотря на идентичность алгоритма, реализация одного и того же метода в разных программных средах может давать отличающиеся результаты. Такие различия затрагивают как точность выделения объектов, так и визуальное представление данных, вычислительную нагрузку и удобство реализации. Это обусловлено различиями в технической архитектуре, способах интерполяции, масштабировании и методах нормализации данных.

Таким образом, актуальность настоящего исследования заключается в том, чтобы определить, насколько применение одного и того же метода Band Math в различных программных платформах – при одинаковых исходных данных и параметрах – может привести к расхождениям в результатах геологического картирования. Такой подход позволяет не просто сравнивать программное обеспечение, а глубже понять влияние среды выполнения на итоговые данные и интерпретацию геологических объектов. Это особенно важно при разработке воспроизводимых и надежных технологических процессов обработки данных в прикладной геоинформатике и дистанционном зондировании.

Обзор литературы. Наиболее широко применяемыми методами обработки многоспектральных данных являются анализ главных компонент (PCA), отношение спектральных каналов (Band Ratio) и математические операции над каналами (Band Math). Эти методы реализованы в таких программных продуктах, как ENVI и Google Earth Engine (GEE), и активно используются для геологического картирования. В ряде работ [1–9] показано, что метод Band Math позволяет эффективно выделять зоны литологических изменений, особенно на данных ASTER. При этом, как правило, такие исследования ограничиваются применением одного программного средства, тогда как их сопоставительный анализ встречается крайне редко.

Цель и задачи. Цель настоящего исследования – провести количественное сравнение реализации метода Band Math в средах ENVI и Google Earth Engine (GEE) при идентичных входных параметрах, а также определить влияние программной реализации на результаты минералогического картирования. В задачи входит:

- построение минералогических индексов по данным ASTER с использованием метода Band Math;
- сравнение результатов обработки в ENVI и GEE по визуальным и числовым критериям при одинаковых исходных параметрах;
- выявление оптимальных условий применения каждой среды;
- обоснование возможности комбинированного использования ENVI и GEE для задач минералогического картирования.

Материалы и методы

В настоящем исследовании использовались мульти-спектральные спутниковые данные ASTER, охватывающие 14 каналов в диапазонах VNIR, SWIR и TIR.

Исследуемая территория – Абайская область на востоке Казахстана, включающая Актогайский медный рудник. Регион характеризуется палеозойскими, осадочными и магматическими породами.

Данные обрабатывались в ENVI 5.6 и Google Earth Engine. В ENVI выполнены атмосферная, радиометрическая и геометрическая коррекции. Для пространственного анализа использовался ArcGIS Pro. Метод Band Math основан на анализе спектральных отражений минералов в разных диапазонах VNIR и SWIR. В данной работе использовались три минералогических индекса: оксиды железа (B4/B3), карбонат / хлорит / эпидот (B7+B9/B8) и серицит – глинистые минералы (B5/B7) [10].

Применение Band Math в ENVI осуществлялось через встроенную функцию Band Math, а в Google Earth Engine – через JavaScript API. Для корректного сравнения результатов использовалась нормализация данных: в ENVI применялся метод Stretch Data, а в GEE – приведение значений к диапазону [0,1].

Критерии сравнения

Для оценки эффективности методов, реализованных в ENVI и Google Earth Engine, использовались следующие критерии:

- Точность выделения геологических объектов – степень различимости минералогических особенностей на полученных изображениях.
- Время обработки данных – сравнительный анализ вычислительной нагрузки и скорости выполнения расчетов в обеих программных средах.
- Удобство реализации – сложность настройки параметров, необходимость ручной корректировки и доступность автоматизированных процессов.
- Визуальное качество результатов – анализ интерпретируемости выходных данных, включая уровень детализации и различимость геологических структур.

Применение данных критериев позволило провести всесторонний анализ обоих программных решений и оценить их пригодность для геологического картирования.

Результаты

Анализ индексов минералов. Построенные карты индексов оксидов железа, серицита и карбонатов показали различия в детализации. ENVI обеспечил более четкое разделение минералогических аномалий, в то время как результаты GEE выглядели сглаженными.

По индексу оксидов железа значения в ENVI демонстрировали большую контрастность, особенно на участках с резким изменением состава (рис. 1). Визуально карты из GEE были менее детализированы, что может быть связано с особенностями обработки и интерполяции.

Для количественного анализа были вычислены статистические параметры индексов минералов: минимум, максимум, среднее значение и стандартное отклонение.

Средние значения индексов в обеих средах отличались незначительно (отличие составило около 0.2 DN), при этом стандартные отклонения оказались выше в ENVI, что указывает на лучшее различение мелких особенностей. Расчеты проводились по всей сцене с использованием единых масок для ENVI и GEE, чтобы обеспечить сопоставимость. Значения в GEE были приведены к диапазону [0,1], в то время как в ENVI применялся метод Stretch Data (таблицы 1–3).

Таблица 1

Статистические параметры разницы значений индекса оксидов железа между ENVI и Google Earth Engine (GEE)

Кесте 1

ENVI және Google Earth Engine (GEE) арасындағы темір оксидтері индексінің айырмашылықтарының статистикалық параметрлері

Table 1

Statistical parameters of iron oxide index differences between ENVI and Google Earth Engine (GEE)

Название индекса	Минимальное значение	Максимальное значение	Среднее значение	Стандартное отклонение
Iron Oxide	-3	2	-0.2276	0.8026

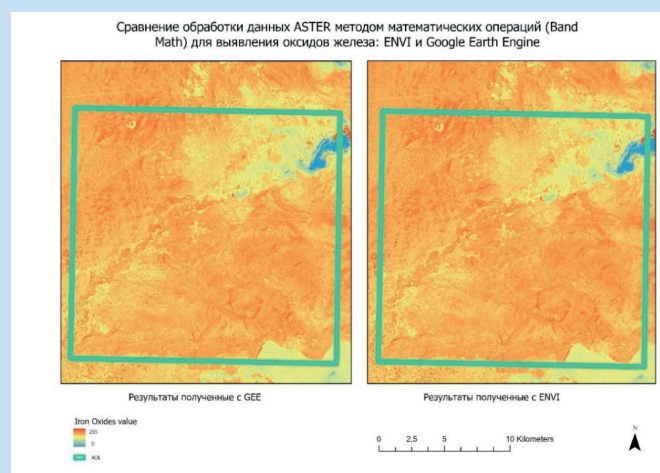


Рис. 1. Сравнение результатов Band Math для выявления оксидов железа.

Сурет 1. Темір оксидтерін анықтау үшін Band Math әдісімен алынған нәтижелерді салыстыру.

Figure 1. Comparison of Band Math results for detecting iron oxides.

На рис. 2 представлено сравнение результатов метода Band Math для выявления серицита. Аналогичная картина наблюдалась и при сравнении серицитового индекса: ENVI более точно выделяет зоны концентрации, в то время как GEE демонстрирует более плавные переходы и размытие контуров. Для объективного анализа была проведена статистическая оценка разницы значений индекса серицита между ENVI и GEE (таблица 2).

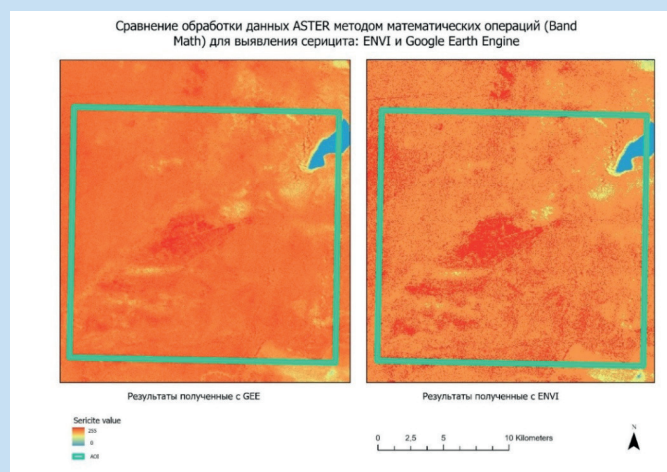


Рис. 2. Сравнение результатов Band Math для выявления глинистых минералов (серицит).

Сурет 2. Серицитті (глинисті минералдарды) анықтау үшін Band Math әдісімен алынған нәтижелерді салыстыру.
Figure 2. Comparison of Band Math results for detecting clay minerals (sericite).

Таблица 2

Статистические параметры разницы значений индекса серицита между ENVI и Google Earth Engine (GEE)

Кесте 2

ENVI және Google Earth Engine (GEE) арасындағы серицит индексінің айырмашылықтарының статистикалық параметрлері

Table 2

Statistical parameters of sericite index differences between ENVI and Google Earth Engine (GEE)

Название индекса	Минимальное значение	Максимальное значение	Среднее значение	Стандартное отклонение
Sericite	-10	4	-2.37	3.04

По карбонатам в ENVI четко прослеживались зоны накопления (рис. 3), в GEE площадь зон была расширена, но с потерей резкости границ. Это также отражено в статистических показателях: ENVI продемонстрировал более высокую вариативность значений индекса, что видно по стандартному отклонению в таблице 3.

Несмотря на схожие статистические показатели, увеличение площади зон с высокими значениями индекса в GEE, вероятно, обусловлено особенностями алгоритмов обработки данных, ориентированных на анализ больших территорий. Это стоит учитывать при интерпретации полученных данных.

Сравнение программных решений по критериям.

Точность выделения геологических объектов. Результаты показали, что метод Band Math, реализованный в ENVI, обеспечивает более четкое выделение границ минералогических аномалий. В GEE наблюдается значительное сглаживание данных, что может снижать контрастность минералогических объектов.

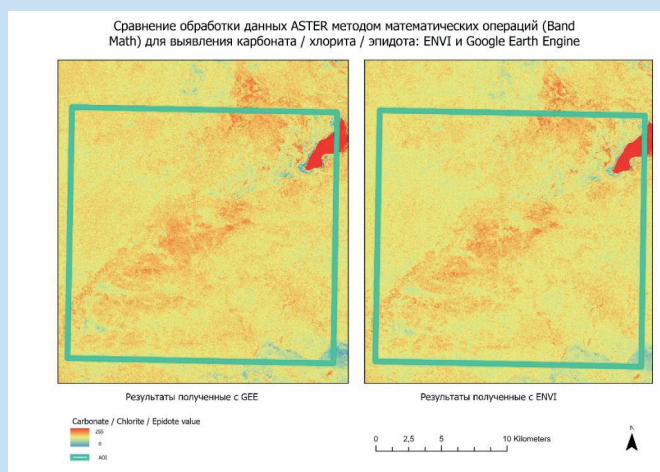


Рис. 3. Сравнение результатов Band Math для выявления карбонатов.

Сурет 3. Карбонаттарды анықтау үшін Band Math әдісімен алынған нәтижелерді салыстыру.
Figure 3. Comparison of Band Math results for detecting carbonates.

Таблица 3

Статистические параметры разницы значений индекса карбонатов между ENVI и Google Earth Engine (GEE)

Кесте 3

ENVI және Google Earth Engine (GEE) арасындағы карбонат индексінің айырмашылықтарының статистикалық параметрлері

Table 3

Statistical parameters of carbonate index differences between ENVI and Google Earth Engine (GEE)

Название индекса	Минимальное значение	Максимальное значение	Среднее значение	Стандартное отклонение
Carbonate	-5	6	-1.35	2.465

Время обработки данных. Google Earth Engine продемонстрировал более высокую вычислительную эффективность при обработке больших объемов данных за счет облачной инфраструктуры. ENVI, несмотря на высокую точность, требует значительных вычислительных ресурсов, что может замедлять процесс обработки при анализе больших территорий.

Удобство реализации. ENVI предоставляет более интуитивно понятный интерфейс для специалистов, не обладающих навыками программирования. GEE, в свою очередь, требует знания JavaScript или Python для написания пользовательских алгоритмов, что может усложнять реализацию для пользователей без опыта работы с кодом.

Визуальное качество результатов. ENVI обеспечивает более детализированное изображение минералогических объектов за счет отсутствия автоматической интерполяции данных. GEE, напротив, демонстрирует сглаженные переходы между зонами, что делает интерпретацию менее четкой, но может быть полезным при крупномасштабном анализе.

Обсуждение результатов

Полученные различия между ENVI и GEE объясняются, прежде всего, особенностями интерполяции, масштабирования и предварительной обработки. Высокая детализация ENVI обусловлена отсутствием автоматического сглаживания, что делает его предпочтительным для анализа локальных аномалий. GEE, в свою очередь, предлагает высокую производительность и удобство автоматизации для крупных территорий. Это делает GEE привлекательным для этапа предварительного картирования.

Сравнение показывает, что применение Band Math в разных средах приводит к значимым различиям как в визуальной интерпретации, так и в статистике пиксельных значений. Однако такие различия могут быть использованы комплементарно: предварительный анализ в GEE может быть дополнен уточнением в ENVI.

Заключение

Проведенное исследование подтвердило, что выбор программного обеспечения существенно влияет на ре-

зультаты геологического картирования методом Band Math. Среда ENVI показала преимущество в детализации и точности, тогда как GEE обеспечила скорость и масштабируемость. Рекомендуется комбинированный подход: использование GEE на этапе первичного анализа и ENVI для последующей детальной интерпретации. Впервые дано количественное сопоставление этих платформ по статистике значений индексов минералов, что расширяет инструментарий исследователя при выборе подхода к интерпретации ДЗЗ. Представленная работа выходит за рамки простого сопоставления программных решений, так как включает в себя количественную оценку различий, теоретическое обоснование методологических расхождений и предложенный комбинированный подход, пригодный для масштабируемого геологического анализа.

Благодарность

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № BR21882179).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Olasunkanmi N., Magawata U., Bayowa O.G. Оценка метода соотношения изображений: определение структурных особенностей и характеристик минерализации в юго-западной части бассейна Сокото в Нигерии с использованием снимков Landsat 8 // *Kuwait Journal of Science*. 2023. Т. 50. № 4. С. 803–811 (на английском языке)
2. Zhu X., Zhang C., Huang X. Анализ главных компонент минерального и элементного состава руд месторождения Баян-Обо Nb-Fe-REE: значение для процесса минерализации и классификации руд // *Обзоры геологии руд*. 2024. Т. 167. С. 105972 (на английском языке)
3. Purwadi I., Van Der Werff H., Lievens C. Нацеливание на шахтные хвосты, содержащие редкоземельные элементы, на острове Банка, Индонезия, с помощью Sentinel-2 MSI // *Международный журнал прикладного наблюдения за Землей и геоинформатики*. 2020. Т. 88. С. 102055 (на английском языке)
4. Madani A.A., Etmad A.A. Соотношения полос SWIR ASTER для литологического картирования и разведки полезных ископаемых: пример из области Эль-Худи, юго-восточная пустыня, Египет // *Arabian Journal of Geosciences*. 2009. Т. 4. № 1–2. С. 45–52 (на английском языке)
5. Yang C., Jia H., Dong L. Выбор оптимальной комбинации полос LANDSAT-8 (OLI) для картирования зон изменений // *Дистанционное зондирование*. 2024. Т. 16. № 2. С. 392 (на английском языке)
6. Сдвиговые золотые руды в поясе сдвига Вади Ходейн, юго-восточная пустыня Египта: анализ данных дистанционного зондирования, полевых и структурных данных / El-Wahed M.A. [и др.] // *Minerals*. 2021. Т. 11. № 5. С. 474 (на английском языке)
7. Van der Meer F. Анализ спектральных характеристик поглощения на гиперспектральных снимках // *Международный журнал прикладных наблюдений Земли и геоинформатики*. 2004. Т. 5. № 1. С. 55–68 (на английском языке)
8. Gad S., Kusky T. Спектральное соотношение ASTER для литологического картирования в Аравийско-Нубийском щите, Вади Куд, Синай, Египет // *Gondwana Research*. 2006. Т. 11. № 3. С. 326–335 (на английском языке)
9. Исследование редкометалльной минерализации с помощью дистанционного зондирования и геофизики структурно-контролируемых гидротермальных изменений / Abdelkader M.A. [и др.] // *Журнал геохимической разведки*. 2024. Т. 267. С. 107598 (на английском языке)
10. Kalinowski A., Oliver S. Руководство по обработке индексов минералов ASTER // *Remote Sensing Applications. Geoscience Australia*, 2004 (на английском языке)

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Olasunkanmi N., Magawata U., Bayowa O.G. Кескіннің корреляциялық әдісін бағалау: Landsat 8 кескіндерін пайдалана отырып, Нигерияның оңтүстік-батыс Сокото бассейнінің құрылымдық ерекшеліктері мен минералдану сипаттамаларын анықтау // *Kuwait Journal of Science*. 2023. Т. 50. № 4. Б. 803–811 (ағылшын тілінде)

2. Zhu X., Zhang C., Huang X. Баян-Обо Nb-Fe-REE кен орны рудаларының минералдық және элементтік құрамының негізгі компоненттерін талдау: минералдану процесі мен кенді жіктеуге әсері // *Ore Geology Reviews*. 2024. Т. 167. 105972 (ағылшын тілінде)
3. Purwadi I., Van Der Werff H., Lievens C. Индонезиядағы Банка аралында сирек жер элементтері бар шахталық қалдықтарды Sentinel-2 MSI арқылы нысанаға алу // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2020. Т. 88. Б. 102055 (ағылшын тілінде)
4. Madani A.A., Emam A.A. Египеттегі Эль-Худи аймағында литологиялық карта жасау және пайдалы қазбаларды барлау үшін SWIR ASTER жолақтарының қатынасы // *Arabian Journal of Geosciences*. 2009. Т. 4. № 1–2. Б. 45–52 (ағылшын тілінде)
5. Yang C., Jia H., Dong L. Өзгеріс аймақтарын картаға түсіру үшін LANDSAT-8 (OLI) операциялық бейнелеуішінің оңтайлы жолақ комбинациясын таңдау // *Remote Sensing*. 2024. Т. 16. № 2. Б. 392 (ағылшын тілінде)
6. Египеттің оңтүстік-шығыс шөліндегі Вади Ходейн ығысым белдеуіндегі ығысыммен байланысты алтын кендері: қашықтықтан зондтау, далалық және құрылымдық деректерді талдау / El-Wahed M.A. [және т. б.] // *Minerals*. 2021. Т. 11. № 5. 474 (ағылшын тілінде)
7. Van der Meer F. Гиперспектралды кескіндердегі спектрлік жұтылу ерекшеліктерін талдау // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2004. Т. 5. № 1. Б. 55–68 (ағылшын тілінде)
8. Gad S., Kusky T. ASTER спектрлік қатынасы арқылы Араб-Нубия қалқаны, Синай, Египеттегі Вади Кид аймағында литологиялық карталау // *Gondwana Research*. 2006. Т. 11. № 3. Б. 326–335 (ағылшын тілінде)
9. Құрылыммен басқарылатын гидротермиялық өзгерістерді кешенді қашықтықтан зондтау және геофизикалық талдау арқылы сирек металдардың минералдануын кеңейтілген зерттеу / Abdelkader M.A. [және т. б.] // *Journal of Geochemical Exploration*. 2024. Т. 267. Б. 107598 (ағылшын тілінде)
10. Kalinowski A., Oliver S. ASTER минералдық индексін өңдеу жөніндегі нұсқаулық // *Remote Sensing Applications. Geoscience Australia*, 2004 (ағылшын тілінде)

REFERENCES

1. Olasunkanmi N., Magawata U., Bayowa O.G. Assessment of image ratio technique: targeting structural features and mineralization characteristics in the southwestern part of the Sokoto Basin in Nigeria using Landsat 8 imagery // *Kuwait Journal of Science*. 2023. V. 50. No. 4. 803–811 pp. (in English)
2. Zhu X., Zhang C., Huang X. Principal component analysis of mineral and element composition of ores from the Bayan Obo Nb-Fe-REE deposit: implication for mineralization process and ore classification // *Ore Geology Reviews*. 2024. V. 167. 105972 p. (in English)
3. Purwadi I., Van Der Werff H., Lievens C. Targeting rare earth element bearing mine tailings on Bangka Island, Indonesia, with Sentinel-2 MSI // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2020. V. 88. 102055 p. (in English)
4. Madani A.A., Emam A.A. SWIR ASTER band ratios for lithological mapping and mineral exploration: a case study from El Hudi area, southeastern desert, Egypt // *Arabian Journal of Geosciences*. 2009. V. 4. No. 1–2. 45–52 pp. (in English)
5. Yang C., Jia H., Dong L. Selection of LANDSAT-8 Operational Land Imager (OLI) optimal band combinations for mapping alteration zones // *Remote Sensing*. 2024. V. 16. No. 2. 392 p. (in English)
6. Shear-related gold ores in the Wadi Hodein Shear Belt, southeastern desert of Egypt: analysis of remote sensing, field and structural data / El-Wahed M.A. [et al.] // *Minerals*. 2021. V. 11. No. 5. 474 p. (in English)
7. Van der Meer F. Analysis of spectral absorption features in hyperspectral imagery // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2004. Vol. 5. No. 1. P. 55–68 (in English)
8. Gad S., Kusky T. ASTER spectral ratioing for lithological mapping in the Arabian–Nubian Shield, the Neoproterozoic Wadi Kid area, Sinai, Egypt // *Gondwana Research*. 2006. Vol. 11. No. 3. P. 326–335 (in English)
9. Advanced exploration of rare metal mineralization through integrated remote sensing and geophysical analysis of structurally-controlled hydrothermal alterations / Abdelkader M.A. [et al.] // *Journal of Geochemical Exploration*. 2024. V. 267. 107598 p. (in English)
10. Kalinowski A., Oliver S. ASTER Mineral Index Processing Manual // *Remote Sensing Applications. Geoscience Australia*, 2004 (in English)

Сведения об авторах:

Ильясова А.К., Ph.D докторант, кафедра «Маркшейдерское дело и геодезия», Институт горного дела и металлургии им. О.А. Байконурова, Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), aiger9106@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-3999-536X>

Урманова Д.Э., Ph.D, старший преподаватель кафедры «Гидрогеология, инженерная и нефтегазовая геология», Институт геологии и нефтегазового дела им. К. Турысова, Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), d.urmanova@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0001-8622-8898>

Серикбаева Э.Б., магистр техн. наук, Институт Ионосферы (г. Алматы, Казахстан), seikbayeva@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0001-3475-8931>

Турсбеков С.В., к.т.н., доцент кафедры «Маркшейдерское дело и геодезия», Институт горного дела и металлургии им. О.А. Байконурова, Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), s.tursbekov@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0001-7320-5689>

Авторлар туралы мәліметтер:

Ильясова А., Ph.D докторанты, О.А. Байқоңыров атындағы Тау-кен металлургия институты, «Маркшейдерлік іс және геодезия» кафедрасы, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан)

Урманова Д.Э., Ph.D докторы, Геология және мұнай-газ ісі институтының «Гидрогеология, инженерлік және мұнай-газ геологиясы» кафедрасының аға оқытушысы (Алматы қ., Қазақстан)

Серикбаева Э.Б., «Пайдалы қазбалар кен орындарын іздеу мен барлаудың геофизикалық әдістері» мамандығы бойынша ғылым магистрі, Ионосфера институты (Алматы қ., Қазақстан)

Турсбеков С.В., т.ғ.к., Satbayev University О.А. Байқоңыров атындағы Тау-кен металлургия институты, «Маркшейдерлік іс және геодезия» кафедрасының қауымдастырылған профессоры (Алматы қ., Қазақстан)

Information about the authors:

Ilyassova A., Ph.D doctoral student of the Department of Mine Surveying and Geodesy, of the Mining and Metallurgical Institute named after O.A. Baikonurov of the Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Urmanova D.E., Ph.D, Senior Lecturer at the Department of Hydrogeology, Engineering and Petroleum Geology, K. Turysov Institute of Geology and Petroleum Engineering (Almaty, Kazakhstan)

Serikbayeva E.B., Master of Engineering Sciences in the specialty «Geophysical methods of prospecting and exploration of mineral deposits», Institute of the Ionosphere (Almaty, Kazakhstan)

Tursbekov S.V., Candidate of Technical Sciences, associate Professor of the Department of Mine Surveying and Geodesy, of the Mining and Metallurgical Institute named after O.A. Baikonurov of the Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

ТРЕТИЙ МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ

SEYMARTEC ТОИР

ЧЕЛЯБИНСК
ОТЕЛЬ «RADISSON BLU»

**16–18
СЕНТЯБРЯ**

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ТОИР НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ТЭК,
ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО
КОМПЛЕКСА И МАШИНОСТРОЕНИЯ



seymartec.ru



+7 499 638-23-29



info@seymartec.ru

Организатор:

окружной выставочный центр

* ЮГОРСКИЕ КОНТРАКТЫ *

Техническая поддержка:

EXROTECH

MEMBER
OF THE RUSSIAN
UNION OF EXHIBITIONS
AND FAIRS



ЧЛЕН
РОССИЙСКОГО
СОЮЗА ВЫСТАВОК
И ЯРМАРОК



30 МЕЖДУНАРОДНАЯ
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ВЫСТАВКА

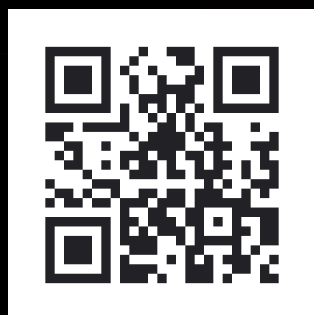
**СУРГУТ.
НЕФТЬ И ГАЗ
2025**



30th INTERNATIONAL
SPECIALIZED
TECHNOLOGICAL EXHIBITION

**SURGUT.
OIL & GAS
2025**

29.09 - 01.10



г. Сургут,
СОК «Энергетик»
ул. Энергетиков, 47

+7 (3462) 94-34-54
sales@yugcont.ru
sngexpo.ru

Код МРНТИ 36.16.19

К.А. Жанакулова¹, *Р.Ж. Мелс¹, Н.Т. Кемербаев², Р.С. Абдыкалыкова¹¹Satbayev University (г. Алматы, Казахстан),²TOO «GeoID» (г. Астана, Казахстан)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ГРАДИЕНТА СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Аннотация. В статье рассматривается экспериментальный метод определения реального вертикального градиента силы тяжести (ВГ). Съёмка проведена в лабораторных условиях с использованием относительных гравиметров CG-6 AutogravTM. Измерения проводились на специально разработанном вертикальном штативе на трех фиксированных высотных уровнях (21, 71 и 121 см). Для повышения надежности и точности измерений было использовано два гравиметра: № 0527, № 0528. Полученные данные показали расхождение между измеренными значениями ВГ и теоретическим нормальным градиентом в 39.6 ± 5 мкГал (396 ± 5 Е) по данным гравиметра № 0527 и 33.6 ± 2 мкГал (336 ± 2 Е) по данным гравиметра № 0528. Результаты подтверждают важность учета локального значения вертикального градиента силы тяжести при редукции измерений в высокоточных гравиметрических исследованиях.

Ключевые слова: вертикальный градиент, Этвеш, гравиметр, CG-6 AutogravTM, сила тяжести, редукция.

Ауырлық күшінің вертикаль градиентін анықтау

Аннотация. Мақалада ауырлық күшінің нақты вертикаль градиентін (ВГ) эксперименттік әдіспен анықтау мәселесі қарастырылған. Түсіріс зертханалық жағдайда CG-6 AutogravTM салыстырмалы гравиметрлерімен жүргізілді. Өлшеулер арнайы жасалған тік штативте үш түрлі белгіленген биіктік деңгейлерінде (21, 71 және 121 см) орындалды. Өлшеу нәтижелерінің сенімділігі мен дәлдігін арттыру мақсатында екі гравиметр қолданылды: № 0527 және № 0528. Алынған деректер бойынша өлшенген ВГ мәндері мен теориялық қалыпты градиент арасындағы айырмашылықтар № 0527 гравиметрінің дерегі бойынша 39.6 ± 5 мкГал (396 ± 5 Е), ал № 0528 гравиметрі бойынша 33.6 ± 2 мкГал (336 ± 2 Е) құрады. Зерттеу нәтижелері жоғары дәлдікті гравиметриялық жұмыстарда өлшеулерді редукциялау кезінде ауырлық күшінің жергілікті вертикаль градиентінің нақты мәнін ескерудің маңыздылығын растайды.

Түйінді сөздер: вертикаль градиент, Этвеш, гравиметр, CG-6 AutogravTM, ауырлық күші, редукция.

Determination of the vertical gravity gradient

Abstract. This article presents an experimental approach for determining the actual vertical gravity gradient (VGG). The survey was carried out under laboratory conditions using CG-6 AutogravTM relative gravimeters. Measurements were performed on a specially designed vertical tripod at three fixed height levels (21, 71, and 121 cm). Two gravimeters (No. 0527, No. 0528) were used simultaneously to enhance the reliability and accuracy of the measurements. The obtained data revealed deviations between the measured VGG values and the theoretical normal gradient: 39.6 ± 5 μ Gal (396 ± 5 E) according to gravimeter No. 0527, and 33.6 ± 2 μ Gal (336 ± 2 E) according to gravimeter No. 0528. The results emphasize the importance of considering local vertical gravity gradient values in the reduction of measurements for high-precision gravimetric surveys.

Key words: vertical gradient, Eötvös, gravimeter, CG-6 AutogravTM, gravity, reduction.

Введение

Вертикальный градиент силы тяжести (ВГ) является одним из ключевых параметров при высокоточных гравиметрических измерениях. Он характеризует изменение значения силы тяжести с высотой и широко используется в задачах высотных поправок, моделировании гравитационного поля Земли и уточнении геоидов [1]. Математическое выражение вертикального градиента силы тяжести $\partial\gamma/\partial H$ или W_{zz} представлено в следующем виде [2, 3]:

$$\frac{\partial g}{\partial H} = \frac{\partial \gamma}{\partial H} + \frac{\partial \Delta g}{\partial H}, \quad (1)$$

$$W_{zz} = U_{zz} + T_{zz}, \quad (2)$$

где:

$\partial\gamma/\partial H$ – теоретическое значение нормального вертикального градиента;

$\partial\Delta g/\partial H$ – аномалия вертикального градиента силы тяжести;

W_{zz} – реальный вертикальный градиент силы тяжести;

U_{zz} – теоретический (нормальный) вертикальный градиент;

T_{zz} – аномалия вертикального градиента.

В гравиметрии за единицу гравитационного градиента силы тяжести принят 1 Этвеш:

$$1 \text{ E} = 10^{-9} \text{ c}^{-2} = 0,1 \text{ мГал/км.}$$

Традиционно в гравиметрических измерениях используется теоретическое значение нормального вертикального градиента силы тяжести, равное ~ 0.3086 мГал/м [4]. Однако в ряде исследований [5–7] показано, что реальное значение вертикального градиента может значительно отличаться от теоретического из-за влияния топографии,

неоднородностей плотности земной коры и локальных геологических условий. Значение ВГ может отклоняться от теоретического на 25–39%, особенно где высоты рельефа более 1000 м [8]. Использование стандартного значения вертикального градиента вместо фактического может приводить к существенным ошибкам при редукции результатов измерений к уровню установки приборов. Это особенно критично для точного определения абсолютного значения ускорения свободного падения на пунктах гравиметрической сети, полигонов.

В исследовании Csaró и Völgyesi (2012) показали, что локальные вариации ВГ могут изменять измеренное значение силы тяжести от нормального на десятки микрогал, что требует учета индивидуально определенного градиента в каждом пункте.

Определение вертикального градиента особенно важно при совместном использовании абсолютных и относительных гравиметров, так как расчет по нормальному значению ВГ может привести к ошибкам при редукции к уровню марок и референсных высот. Как показано на рис. 1, чтобы привести абсолютное значение к марке, необходимо внести поправки за высоту приборов. Для определения вертикального градиента силы тяжести необходимо выбрать референсную высоту как для абсолютных, так и для относительных гравиметров. Опорная высота абсолютных гравиметров, как правило, находится в диапазоне от 80 до 130 см, в зависимости от конструкции прибора. К примеру, абсолютный гравиметр FG-5 имеет референсную высоту 130 см (точка D), в то время как чувствительный элемент относительного гравиметра CG-6 находится на высоте 21 см (точка A). Для приведения абсолютного значения к марке необходимо вычисле-

ние фактического градиента с точностью порядка первых микрогал [9].

Для пересчета измеренного абсолютным гравиметром значения силы тяжести на уровень пункта (марки) необходимо использовать следующую формулу:

$$g_P = g_C + \Delta g_2 + \delta g_1 + \delta g_2, \quad (3)$$

где:

g_P – значение силы тяжести на уровне марки (точка P);

Δg_2 – разность измеренных значений силы тяжести относительным гравиметром на высотных уровнях A и C;

δg_1 – поправка за высоту, связанная с разностью между уровнем чувствительного элемента относительного гравиметра и уровнем марки (между точками A и P);

δg_2 – поправка за высоту, учитывающая разницу между фактической и средней референсной высотой абсолютно гравиметра (между точками B и C).

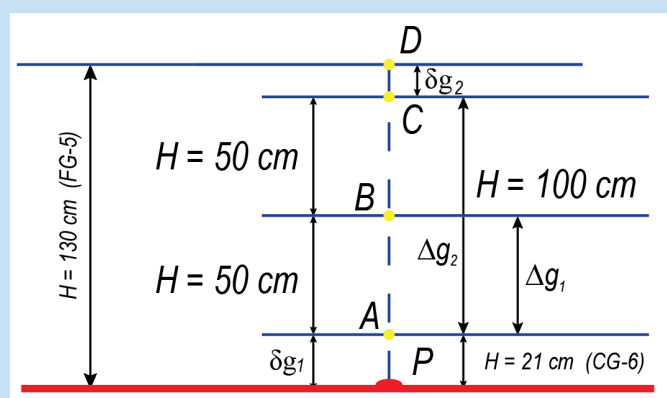


Рис. 1. Схема высотных уровней для пересчета измеренных значений силы тяжести на уровень реперной марки (точки P).

Сурет 1. Өлшенген ауырлық күші мәндерін реперлік белгі деңгейіне (P нүктесі) қайта есептеу үшін биіктік деңгейлерінің схемасы.

Figure 1. Diagram of height levels for converting measured gravity values to the benchmark level (point P).

Вертикальный градиент определяется путем многократных независимых измерений относительными гравиметрами, установленными на вертикальном штативе. В данной работе измерения вертикального градиента были выполнены высокоточными относительными гравиметрами Scintrex CG-6 AutogravTM. В исследовании Liu S. [10] было установлено, что динамическая точность гравиметров CG-6 AutogravTM при измерении вертикального градиента силы тяжести составляет менее 3 мкГал.

Целью данной работы является определение вертикального градиента силы тяжести на основе экспериментальных измерений и его сравнение с теоретическим значением. В работе рассматривается, насколько велико различие между нормальным и измеренным значением ВГ и какое влияние оно оказывает на высокоточные измерения силы тяжести. Полученные результаты будут полезны для коррекции высотных систем, уточнения моделей геоида и гравиметрических редукций.

Методы исследования

Измерения вертикального градиента силы тяжести были проведены в помещении, в лабораторных условиях на территории Satbayev University (г. Алматы, Казахстан) с использованием двух относительных гравиметров CG-6 AutogravTM (серийный номер 0527, 0528). В качестве измерительной установки применен специальный штатив, разработанный канадской компанией Scintrex Ltd, который обеспечивает стабильное положение прибора на разных высотных уровнях (рис. 2). Измерения выполнялись на трех уровнях по высоте: A – нижний уровень (21 см), B – средний уровень (71 см), C – верхний уровень (121 см). Главным условием при выставлении уровней высот штатива является строгая разность между уровнями в 50 см.

Измерения проводились в соответствии со следующей циклической схемой: $A \rightarrow B \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A \rightarrow C \rightarrow A$. Такой порядок позволяет минимизировать систематические ошибки, связанные с временными изменениями силы тяжести и инструментальным дрейфом.

На каждом высотном уровне сила тяжести измерялась 3 раза по 60 секунд. Повторные измерения необходимы для фильтрации случайных ошибок и вычисления инструментального дрейфа, возникающего при перемещении гравиметра между разными высотными положениями. Длительность каждого измерения позволяет получить достаточное количество данных для статистической обработки и снижения влияния кратковременных флуктуаций и повышения точности определения градиента.

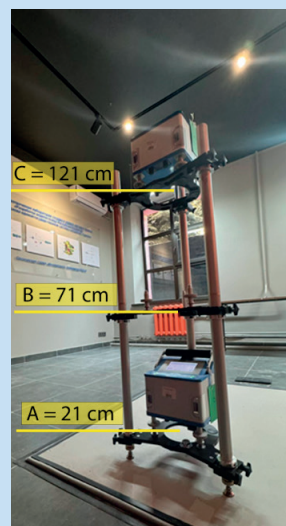


Рис. 2. Экспериментальное измерение вертикального градиента силы тяжести относительными гравиметрами CG-6 AutogravTM.

Сурет 2. CG-6 AutogravTM салыстырмалы гравиметрлері арқылы ауырлық күшінің тік градиентін эксперименттік өлшеу.

Figure 2. Experimental measurement of the vertical gravity gradient using CG-6 AutogravTM relative gravimeters.

Значения вертикального градиента силы тяжести рассчитывается по формуле:

$$W_{zz}^{meas.}(h_i) = \frac{g(h_i) - g(h_0)}{\Delta h}, \quad (4)$$

где:

$g(h_i)$ и $g(h_0)$ – измеренные значения силы тяжести на разных высотах;

Δh – разность высот;

$W_{zz}^{meas.}(h_i)$ – и – измеренное значение вертикального градиента.

Применение данной методики позволяет минимизировать ошибки, связанные с инструментальным дрейфом, а также повысить точность редукции гравиметрических измерений. Полученные значения ВГ будут сопоставлены с теоретическим значением и проанализированы на предмет отклонений, обусловленных локальными аномалиями плотности горных пород.

Результаты и обсуждения

В ходе проведенных гравиметрических измерений было получено распределение значений силы тяжести на трех уровнях: А (21 см), В (71 см) и С (121 см). На основе полученных данных вычислены значения вертикального градиента силы тяжести.

Результаты измерений вертикального градиента силы тяжести на уровнях А, В и С представлены на рис. 3. Отчетливо видны вариации значений силы тяжести. Однако величина этих вариаций остается в пределах ожидаемых значений для лабораторных условий. Измеренные значения ВГ демонстрируют отличия от теоретического значения (таблица 1), что подтверждает влияние локальных факторов, таких как неоднородность плотности подстилающих слоев.

При обработке измерений использован взвешенный метод наименьших квадратов. Этот метод позволяет минимизировать отклонения и учитывать погрешности измерений при нахождении оптимального решения. Как видно на рис. 4, гравиметр № 0528 показал более стабильные результаты по сравнению с прибором № 0527. При этом значения вертикального градиента, полученные с использованием двух приборов, оказались схожими, с допустимыми невязками. Полученные результаты подтверждают необходимость использования минимум двух гравиметров для измерения вертикального градиента, что повышает надежность данных и позволяет выявить и минимизировать систематические и инструментальные ошибки.

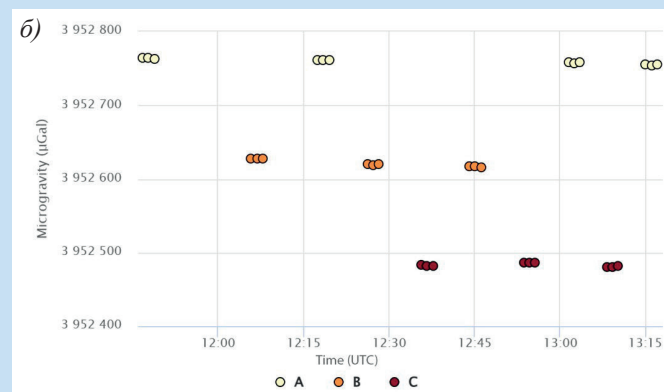
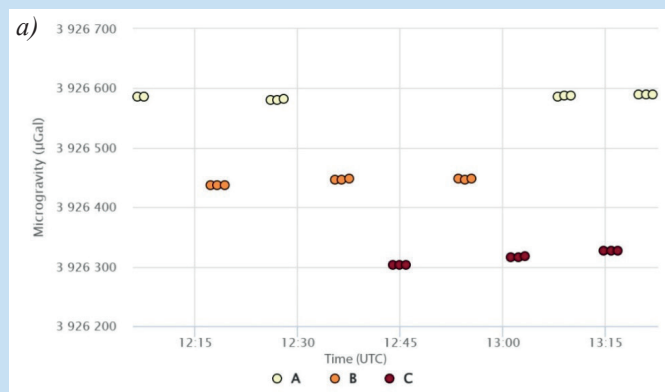


Рис. 3. Измеренные относительные значения силы тяжести: а) гравиметр № 0527; б) гравиметр № 0528.
Сурет 3. Өлшенген салыстырмалы ауырлық күшінің мәндері: а) № 0527 гравиметрі; б) № 0528 гравиметрі.
Figure 3. Measured relative gravity values: a) gravimeter No. 0527; b) gravimeter No. 0528.

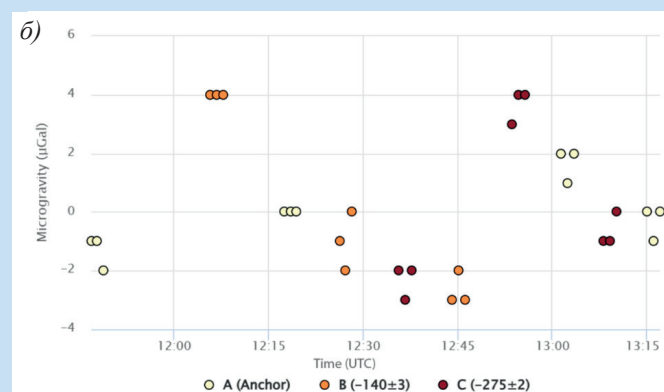
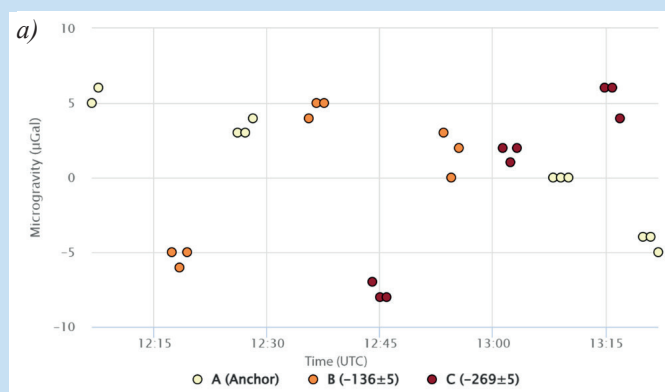


Рис. 4. Приращения силы тяжести между высотными уровнями с учетом невязок измерений:
а) гравиметр № 0527; б) гравиметр № 0528.
Сурет 4. Өлшеу қателіктерін ескере отырып, биіктік деңгейлері арасындағы ауырлық күшінің айырмашылығы: а) № 0527 гравиметрі; б) № 0528 гравиметрі.
Figure 4. Gravity increments between height levels considering residual measurement misclosures:
a) gravimeter No. 0527; b) gravimeter No. 0528.

Таблица 1
Результаты измерений вертикального градиента силы тяжести гравиметрами CG-6 AutogravTM

Кесте 1
CG-6 AutogravTM гравиметрлерімен өлшенген ауырлық күшінің тік градиентінің нәтижелері

Table 1
Results of vertical gravity gradient measurements using CG-6 AutogravTM gravimeters

Серийный № гравиметра	Δg_1 , мкГал	Δg_2 , мкГал	$W_{zz}^{meas.}$, Е (на 1 м)
0527	-136 ± 5	-269 ± 5	-2690 ± 5
0528	-140 ± 3	-275 ± 2	-2750 ± 2

По результатам исследования получены значения вертикального градиента -269 ± 5 мкГал (2690 ± 5 Е) гравиметром № 0527, -275 ± 2 мкГал (-2750 ± 2 Е) гравиметром № 0528, что дает разницу с теоретическим значением нормального градиента в 39.6 ± 5 мкГал (396 ± 5 Е) и 33.6 ± 2 мкГал (336 ± 2 Е) соответственно.

Заклучение

В настоящей работе проведено экспериментальное определение вертикального градиента силы тяжести с использованием двух относительных гравиметров CG-6 AutogravTM и специального штатива в лабораторных ус-

ловиях на территории Satbayev University. Полученные результаты показывают существенные отклонения измеренных значений вертикального градиента (-2690 ± 50 и -2750 ± 20 Е) от стандартного теоретического значения (-3086 Е). Эти отклонения подтверждают необходимость индивидуального определения вертикального градиента на гравиметрических пунктах при проведении высокоточных работ.

Анализ результатов измерений также продемонстрировал важность использования нескольких гравиметров, так как это повышает надежность и точность полученных данных, снижает вероятность систематических ошибок и позволяет проводить кросс-проверку приборов.

Полученные результаты имеют практическую значимость, поскольку могут быть применены для повышения точности редукций силы тяжести, уточнения моделей геоида и коррекции высотных систем, в особенности в сложных геологических условиях.

В дальнейших исследованиях планируется исследовать методики измерений ВГ для достижения сходимости экспериментально измеренных значений не более 1 мкГал.

Благодарность

Данное исследование финансируется Комитетом по науке Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № BR21882366 «Разработка модели геоида Республики Казахстан, как основа единой государственной системы координат и высот»).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Торге В. Гравиметрия: М.: Мир, 1999. 428 с. (на русском языке)
2. Hwang C., Hsiao Y.S. Ортометрические поправки по данным нивелирования, гравитации, плотности и высот: исследование на примере Тайваня // Журнал геодезии. 2003. Т. 77. № 5. С. 279–291 (на английском языке)
3. Hofmann-Wellenhof B., Moritz H. Физическая геодезия: Springer Science & Business Media. 2006. 403 с. (на английском языке)
4. Hofmann-Wellenhof B., Moritz H. Физическая геодезия: Сан-Франциско и Лондон, W.H. Freeman and company, 1967. 374 с. (на английском языке)
5. Csapó G., Völgyesi L. Новые измерения для определения локальных вертикальных градиентов // Отчеты по геодезии. 2004. Т. 69. № 2. С. 303–308 (на английском языке)
6. Csapó G., Völgyesi L. Определение и оценка надежности вертикальных градиентов на основе тестовых измерений // Труды 3-й встречи Международной комиссии по гравитации и геоиду (IAG Section III), Салоники, 2002. С. 26–30 (на английском языке)
7. Rózsa S., Tóth G. Прогнозирование вертикальных градиентов силы тяжести с использованием данных гравиметрии и высот // Окно в будущее геодезии: Труды Генеральной ассамблеи Международной ассоциации геодезии (IAG), Саппоро: Springer Berlin Heidelberg, 2005. С. 344–349 (на английском языке)
8. Моделирование вертикального градиента силы тяжести в свободном воздухе и его валидация / Akdogan Y.A. [и др.] // Бюллетень геофизики и океанографии. 2022. Т. 63. № 2. С. 237–248 (на английском языке)
9. Новая и высокоточная гравиметрическая базисная сеть на юге Тибетского плато / Xing L. [и др.] // Геодезия и геодинамика. 2020. Т. 11. № 4. С. 258–264 (на английском языке)
10. Liu S. и др. Исследование динамических характеристик относительного гравиметра CG-6 для микрогравитационной сети // Труды Десятого международного симпозиума по измерениям и инструментам прецизионной инженерии, Куньмин: SPIE, 2019. Т. 11053. С. 482–488 (на английском языке)

ПАЙДАЛАНҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Торге В. Гравиметрия: М.: Мир, 1999. 428 б. (орыс тілінде)
2. Hwang C., Hsiao Y.S. Нивелирлеу, гравитация, тығыздық және биіктік деректері бойынша ортометриялық түзетулер: Тайваньдағы жағдайды зерттеу // Геодезия журналы. 2003. Т. 77. № 5. С. 279–291 (ағылшын тілінде)
3. Hofmann-Wellenhof B., Moritz H. Физикалық геодезия: Springer Science & Business Media. 2006, 403 б. (ағылшын тілінде)

4. Hofmann-Wellenhof B., Moritz H. Физикалық геодезия: Сан-Франциско және Лондон, W.H. Freeman and company, 1967. 374 б. (ағылшын тілінде)
5. Csapó G., Völgyesi L. Жергілікті тік градиенттерді анықтауға арналған жаңа өлшеулер // Геодезия бойынша есептер. 2004. Т. 69. № 2. Б. 303–308 (ағылшын тілінде)
6. Csapó G., Völgyesi L. Тік градиенттердің анықталуы және сенімділігін бағалау бойынша тестілік өлшеулерге негізделген зерттеу // Халықаралық гравитация және геоид комиссиясының 3-ші кездесуінің еңбектері (IAG Section III), Салоники, 2002. Б. 26–30 (ағылшын тілінде)
7. Rózsa S., Tóth G. Гравитациялық және биіктік деректерін пайдалана отырып, тік гравитациялық градиенттерді болжау // Геодезияның болашағына көзқарас: Халықаралық геодезия қауымдастығының (IAG) Бас ассамблеясының еңбектері, Саппоро: Springer Berlin Heidelberg, 2005. Б. 344–349 (ағылшын тілінде)
8. Еркін ауадағы тік гравитациялық градиенттерді модельдеу және оның валидациясы / Akdoğan Y.A. [және т. б.] // Геофизика және океанография бюллетені. 2022. Т. 63. № 2. Б. 237–248 (ағылшын тілінде)
9. Тибет таулы аймағының оңтүстігінде жаңа және жоғары дәлдіктегі гравиметриялық базалық желі / Xing L. [және т. б.] // Геодезия және геодинамика. 2020. Т. 11. № 4. Б. 258–264 (ағылшын тілінде)
10. Liu S. және т. б. CG-6 салыстырмалы гравиметрінің динамикалық сипаттамаларын зерттеу // Нақтылы инженерлік өлшеулер мен аспаптар бойынша оныншы халықаралық симпозиумның еңбектері, Куньмин: SPIE, 2019. Т. 11053. Б. 482–488 (ағылшын тілінде)

REFERENCES

1. Torge V. Gravimetriya [Gravimetry]: Moskva, Mir, 1999. 428 p. (in Russian)
2. Hwang C., Hsiao Y.S. Orthometric corrections from leveling, gravity, density and elevation data: a case study in Taiwan // Journal of Geodesy. 2003. V. 77. No. 5. 279–291 pp. (in English)
3. Hofmann-Wellenhof B., Moritz H. Physical geodesy: Springer Science & Business Media. 2006, 403 p. (in English)
4. Hofmann-Wellenhof B., Moritz H. Physical geodesy: San Francisco and London, W.H. Freeman and company, 1967. 374 p. (in English)
5. Csapó G., Völgyesi L. New measurements for the determination of local vertical gradients // Reports on Geodesy. 2004. V. 69. No. 2. 303–308 pp. (in English)
6. Csapó G., Völgyesi L. Determination and reliability estimation of vertical gradients based on test measurements // Proceedings of the 3rd Meeting of the International Gravity and Geoid Commission (IAG Section III), Thessaloniki: 2002. 26–30 pp. (in English)
7. Rózsa S., Tóth G. Prediction of vertical gravity gradients using gravity and elevation data // A Window on the Future of Geodesy: Proceedings of the International Association of Geodesy IAG General Assembly, Sapporo: Springer Berlin Heidelberg, 2005. 344–349 pp. (in English)
8. Free-air vertical gravity gradient modelling and its validation / Akdoğan Y. A. [et al.] // Bulletin of Geophysics & Oceanography (BGO). 2022. V. 63. No. 2. 237–248 pp. (in English)
9. A new and high-precision gravity base network in the south of the Tibetan Plateau / Xing L. [et al.] // Geodesy and Geodynamics. 2020. V. 11. No. 4. 258–264 pp. (in English)
10. Liu S et al. Investigation on the dynamic characteristics of CG-6 relative gravimeter for the micro-gravity network // Proceedings of the Tenth International Symposium on Precision Engineering Measurements and Instrumentation, Kunming: SPIE, 2019. V. 11053. 482–488 pp. (in English)

Сведения об авторах:

Жанакулова К.А., научный сотрудник Инновационного центра геомастики, Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), katima.zhanakulova.92@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0001-6920-5675>

Мелс Р.Ж., докторант, Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), Melsruslan.kz@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0003-7381-3379>

Кемербаяев Н.Т., к.т.н., технический директор ТОО «GeoID» (г. Астана, Казахстан), nurgan.kemberbayev@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0002-9868-8087>

Абдыкалыкова Р.С., ведущий инженер кафедры «Маркшейдерское дело и геодезия», Горно-металлургический институт им. О.А. Байконурова, Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), r.abdykalykova@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0002-9588-9601>

Авторлар туралы мәліметтер:

Жанакулова К.А., Геомастика инновациялық орталығының ғылыми қызметкері, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан)

Мелс Р. Ж., докторант, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан)

Кемербаяев Н.Т., т.ғ.к., «GeoID» ЖШС техникалық директоры (Астана қ., Қазақстан)

Абдыкалыкова Р.С., Satbayev University, О.А. Байқоңыров атындағы Тау-кен металлургия институты, «Маркшейдерлік іс және геодезия» кафедрасының жетекші инженері (Алматы қ., Қазақстан)

Information about the authors:

Zhanakulova K.A., Research Fellow of the Geomatics Innovation Center, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Mels R.Zh., Ph.D student, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Kemberbayev N.T., candidate of Technical Sciences, Technical Director of GeoID LLP (Astana, Kazakhstan)

Abdykalykova R.S., lead engineer of the Department of Mine Surveying and Geodesy of the Mining and Metallurgical Institute named after O.A. Baikunurov, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Код МРНТИ 36.23.31

А. Ержанқызы¹, *С. Нурақынов², А. Бермуханова¹, М. Қожахметов¹

¹Satbayev university (г. Алматы, Казахстан),

²ТОО «Институт ионосферы» (г. Алматы, Казахстан)

ПОСТРОЕНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ ГРАВИМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ МОДЕЛИ ГЕОИДА КАЗАХСТАНА

Аннотация. В статье описан процесс разработки геопространственной базы данных для гравиметрической карты масштаба 1:200000 в среде ArcGIS. База данных стандартизирует, интегрирует разнородные гравиметрические данные, включая исторические и современные измерения. Гравиметрические данные играют ключевую роль в моделировании геоида, а разработанная база обеспечивает эффективное хранение, обработку и анализ информации, способствует решению геодезических и геофизических задач на национальном уровне. Основу данных составляют изданные и подготовленные к изданию гравиметрические карты в редукции Буге (бпр. = 2.67 г/см³) или с учетом поправок за рельеф масштаба 1:200000. Для их эффективного использования создана специализированная геопространственная база данных.

Ключевые слова: база данных, геопространственная информация, гравиметрическая карта, гравиметрические данные, геоид, фоновые материалы.

Қазақстан геоид моделін жасау үшін гравиметриялық деректер базасын құру

Аннотация. Мақалада ArcGIS ортасында 1:200000 масштабтағы гравиметриялық карталар үшін геокеңістіктік деректер базасын әзірлеу үдерісі сипатталған. Деректер базасы тарихи және қазіргі өлшеулерді қоса алғанда, әртүрлі гравиметриялық деректерді стандарттап, біріктіруге мүмкіндік береді. Гравиметриялық деректер геоидты модельдеуде шешуші рөл атқарады, ал әзірленген база ақпаратты тиімді түрде сақтауды, өңдеуді және талдауды қамтамасыз етіп, ұлттық деңгейде геодезиялық және геофизикалық міндеттерді шешуге ықпал етеді. Деректердің негізін Буге редукциясында (бпр. = 2.67 г/см³) орындалған немесе жер бедеріне енгізілген түзетулерді ескеретін, 1:200000 масштабтағы басылып шыққан және баспаға дайындалған гравиметриялық карталар құрайды. Бұл деректерді тиімді пайдалану мақсатында арнайы геокеңістіктік деректер базасы жасалды.

Түйінді сөздер: деректер базасы, геокеңістік ақпарат, гравиметриялық карта, гравиметриялық деректер, геоид, қор материалдары.

Building a database of gravimetric information for the geoid model of Kazakhstan

Abstract. The article describes the process of developing a geospatial database for a 1:200,000 scale gravimetric map in the ArcGIS environment. The database standardizes and integrates heterogeneous gravimetric data, including both historical and modern measurements. Gravimetric data play a key role in geoid modeling, and the developed database ensures efficient storage, processing, and analysis of information, contributing to the solution of geodetic and geophysical tasks at the national level. The core of the data consists of published and pre-publication gravimetric maps at a scale of 1:200,000, either in Bouguer reduction (density = 2.67 g/cm³) or with terrain corrections applied. A specialized geospatial database was created to ensure their effective use.

Key words: database, geospatial information, gravimetric map, gravimetric data, geoid, archival materials.

Введение

Для построения точной региональной модели геоида необходима детализированная база гравиметрических данных, включающая современные и архивные измерения. Систематизированный анализ и интеграция разнородных данных позволяют минимизировать ошибки и повысить точность модели геоида. Разработанная база данных уточняет региональную модель геоида Казахстана за счет учета локальных особенностей гравитационного поля. Она также интегрируется с глобальными моделями, такими как EGM2008 [4], EIGEN-6C4 [5] и XGM2019e [6], что улучшает параметры гравитационного поля региона. Международный опыт подтверждает эффективность адаптации глобальных моделей для региональных задач, включая использование WGM2012 [7]. Для повышения точности моделирования важны как современные полевые данные, так и архивные гравиметрические измерения. Качество геоида зависит от полноты и детальности исходных данных [8]. В ряде исследований, проведенных на территории Казахстана, были проведены сравнительные анализы различных глобальных моделей, подтверждающие их применимость для уточнения локальных параметров геоида [8, 9]. Создание специализированной базы данных позволяет интегрировать, обрабатывать и анализировать гравиметрическую информацию. Геоинформационные технологии, такие как ArcGIS, обеспечивают эффективную работу с разнородными данными [10]. Современные исследования подчеркивают важность системного подхода к разработке баз геоданных, включающего стандартизацию и логическую структуру хранения [11, 12]. Внедрение автоматизированных алгоритмов обработки больших мас-

сивов данных повышает точность моделирования геоида и способствует эффективному решению геодезических и геофизических задач. Разработка специализированных платформ для хранения и обработки гравиметрической информации играет ключевую роль в современных исследованиях.

Цель данной статьи заключается в представлении опыта разработки базы данных для оцифровки гравиметрических карт масштаба 1:200000, созданной в среде ArcGIS, и демонстрации ее практической значимости для задач построения высокоточной модели геоида. В работе рассматриваются методики структурирования данных, процессы интеграции различных источников информации и приводится анализ эффективности применения данной базы в национальных проектах по созданию геоида.

Методы исследования

Перед выполнением работ по оцифровке схем была проведена предварительная подготовительная работа, включающая пространственную привязку и улучшение качества растровых карт и схем использованных материалов. Пространственная привязка осуществлена в исходной системе координат с применением программного обеспечения ArcGIS. Точность привязки составила 0.3 мм в масштабе карты, после чего каждый растр был репроецирован в географическую систему координат WGS84.

После выполнения привязки начался процесс векторизации, в рамках которого были оцифрованы контуры съемок, создана единая растровая мозаика и структурированы атрибутивные данные. Поскольку векторизация

является промежуточным этапом обработки гравиметрических данных, следующим важным шагом стало создание детализированной цифровой базы схем использованных материалов. Одним из ключевых этапов подготовки гравиметрических карт масштаба 1:200000 является оцифровка схем и контуров территорий, на которых проводились исходные гравиметрические измерения. Поскольку при составлении и издании гравиметрических карт масштаба 1:200000 были использованы съемки, выполненные в разные годы и с разными масштабами, возникла необходимость детализированной информации по каждой из них. В связи с этим была поставлена задача оцифровки схем использованных материалов.

Для выполнения данного этапа была сформирована единая растровая мозаика схем использованных материалов «Used_material_mosaic_WGS84», охватывающая всю территорию Республики Казахстан, представленная на рис. 1.

Формирование такой мозаики позволило стандартизировать исходные материалы, а также создать качественную информационную основу для последующей векторизации контуров съемок, использованных при издании гравиметрических карт.

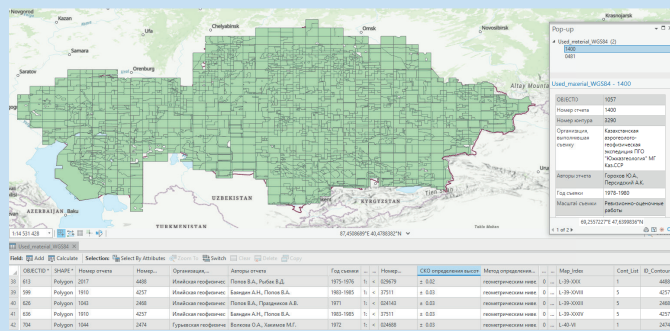


Рис. 1. Схема исходных материалов.

Сурет 1. Бастапқы материалдардың схемасы.

Figure 1. Scheme of Initial Materials.

Процесс оцифровки проводился с использованием геоинформационной среды ArcGIS. Для хранения и анализа результатов оцифровки создан специальный полигональный класс пространственных данных «Used_material». Структура слоя была разработана с учетом требований к детализации и удобству дальнейшего анализа данных и включает следующие атрибутивные поля: уникальный идентификатор полигона, идентификационный номер отчета, номер контура границ съемки, наименование организации, сведения об авторах, год и масштаб исследований, инвентарные номера государственных фондов, среднеквадратические ошибки определения высот и аномалии Буге, метод определения высот, уровень точности съемки, а также дополнительные комментарии, отражающие особенности данных. Основной целью данных работ являлась оцифровка пунктов наблюдений и ввод значений аномалий силы тяжести в редукции Буге (бпр. = 2.67 г/см³) или в редукции Буге (бпр. = 2.67 г/см³) с учетом поправок за рельеф; высоты на пунктах наблюдений и поправок за рельеф при их наличии.

В зависимости от наличия материалов формировалась различная комплектация карт для оцифровки:

1. Изданные или подготовленные к изданию гравиметрические карты (Редукция Буге, бпр. = 2.67 г/см³ или Редукция Буге, бпр. = 2.67 г/см³ с поправкой за рельеф), карта высот и (карта поправок при наличии);

2. Изданные или подготовленные к изданию гравиметрические карты (Редукция Буге, бпр. = 2.67 г/см³ и Редукция Буге, бпр. = 2.30 г/см³);

3. Изданные или подготовленные к изданию гравиметрические карты (Редукция Буге, бпр. = 2.30 г/см³) и карта высот;

4. Изданные или подготовленные к изданию гравиметрические карты (Редукция Буге, бпр. = 2.67 г/см³ с поправкой за рельеф и Редукция Буге, бпр. = 2.30 г/см³), карта аномалий силы тяжести в свободном воздухе;

5. Изданные или подготовленные к изданию гравиметрические карты (Редукция Буге, бпр. = 2.30 г/см³) и карта аномалий силы тяжести в свободном воздухе;

6. Карта аномалий силы тяжести в свободном воздухе и карта высот.

Следующим этапом работ выполнялась оцифровка по каждому номенклатурному листу карты масштаба 1:200000 в базе данных в пространственном классе с точечной геометрией «Grav_point_WGS84», таблица 1. Полученные результаты проверялись и сводились в единую цифровую базу данных в пределах соответствующего миллионного листа.

Для обеспечения полноценного анализа и эффективного использования гравиметрических данных при построении геоида важна корректная классификация всех типов пунктов наблюдений. В структуре атрибутивной таблицы слоя «Grav_point_WGS84» базы данных предусмотрено специализированное поле «Point_type», представленное на рис. 2. В созданном домене базы данных были определены следующие типы гравиметрических пунктов.

Domain Name	Description	Field Type	Domain Type	Split Policy	Merge Policy	Code	Description
Condition	Условия	Text	Coded Value Domain	Default	Default	1	1 - Радиотриггерный пункт
Contour_type	Тип контура	Short	Coded Value Domain	Default	Default	2	2 - Опорный гравиметрический пункт
MosaicAnalysisResultSeventyDomain	Analysis result seventy	Long	Coded Value Domain	Default	Default	3	3 - Пункт государственной гравиметрической сети I класса
MosaicAnalysisResultSeventyDomain	Catalog item category	Long	Coded Value Domain	Default	Default	4	4 - Пункт государственной гравиметрической сети II класса
MosaicAnalysisResultSeventyDomain	Mosaic seamline blend type	Long	Coded Value Domain	Default	Default	5	5 - Пункт государственной гравиметрической сети III класса
MosaicAnalysisResultSeventyDomain	Mosaic seamline blend width units	Long	Coded Value Domain	Default	Default	6	6 - Пункт для подсчета ошибки карты
Point_type	Тип пункта	Double	Coded Value Domain	Default	Default	7	7 - Опорный гравиметрический пункт I класса
Type_point	Тип пункта	Double	Coded Value Domain	Default	Default	8	8 - Опорный гравиметрический пункт II класса
						9	9 - Опорный гравиметрический пункт III класса, включенный в каталог
						10	10 - Пункт полевой опорной сети, включенный в каталог
						11	11 - Пункт полевой опорной сети, включенный в текстовый каталог
						12	12 - Опорный гравиметрический пункт III класса, не включенный в каталог
						13	13 - Пункт государственной гравиметрической сети III класса, включенный в каталог
						14	14 - Пункт полевой опорной сети, включенный в каталог
						15	15 - Пункт полевой опорной сети, не включенный в каталог
						16	16 - Пункт морской опорной сети
						17	17 - Пункты морской опорной сети и полевой опорной сети, включенные в текстовый каталог
						18	18 - Пункты морской опорной сети и полевой опорной сети, включенные в каталог
						19	19 - опорный гравиметрический пункт II класса, включенный в каталог

Рис. 2. Создание домена по типу гравиметрических пунктов.

Сурет 2. Гравиметриялық пункттер түрі бойынша домен құру.

Figure 2. Creating a Domain Based on the Type of Gravimetric Points.

Результаты и обсуждения

На рис. 3 представлен единый векторный массив данных на всю территорию Казахстана.

Структура атрибутивной таблицы точечных гравиметрических данных

Таблица 1

Нүктелік гравиметриялық деректердің атрибуттық кестесінің құрылымы

Кесте 1

Structure of the Attribute Table of Point Gravity Data

Table 1

Имя поля	Содержание	Тип данных
OBJECTID	Номер объекта	Double
Longitude_WGS84	Долгота WGS84 в десятичных градусах	Double
Latitude_WGS84	Широта WGS84 в десятичных градусах	Double
Bouguer_simple_anomaly_267	Аномалия Буге_267	Double
Terrain_correction	Значение поправки за рельеф	Double
H	Значение высоты в Балтийской системе	Double
Depth	Глубина водного бассейна	Double
Free_air_anomaly	Аномалия в свободном воздухе	Double
G0	Нормальное значение силы тяжести	Double
Latitude_Deg_Min_Sec	Долгота WGS84 в десятичных градусах	Text (25)
Longitude_Deg_Min_Sec	Широта WGS84 в десятичных градусах	Text (25)
Point_type	Тип пункта	Double
Map_Index	Номенклатура карты	Text (25)
Map_Type_267	Тип карты для плотности 2.67	Text (25)
Condition_for_observation_point	Условие использования пункта наблюдения для построения матрицы	Double
E_UTM	Значение восточной координаты в проекции UTM соответствующей зоны	Double
N_UTM	Значение северной координаты в проекции UTM соответствующей зоны	Double
Zone	Номер зоны	Text (250)
Remarks	Примечание	Double

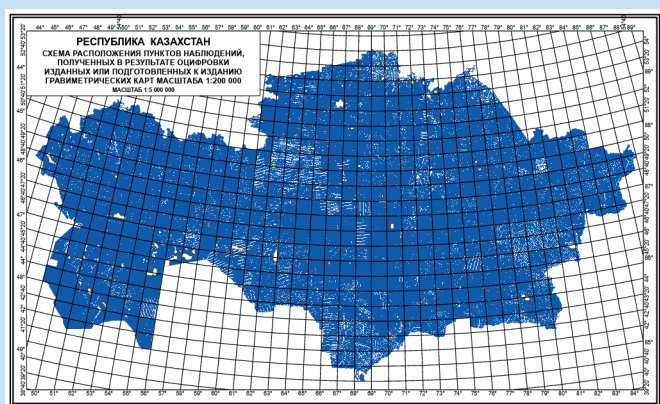


Рис. 3. Схема расположения пунктов наблюдения, полученных в результате оцифровки.

Сурет 3. Цифрландыру нәтижесінде алынған бақылау пункттерінің орналасу схемасы.

Figure 3. Scheme of Observation Points Location Obtained from Digitization.

В растровую мозаику включены растры, полученные КазНИТУ им. К.И. Сатпаева от Национальной Геологической Службы (НГС).

Общее количество оцифрованных пунктов составило 667 790, из них 10 205 пунктов – это пункты, которые не участвовали при подготовке к изданию гравиметрических карт, 5 723 пункта – дополнительно исключенные в результате увязочно-проверочных работ. В процентном соотношении количество пунктов, не использованных при составлении изданных гравиметрических карт, составляет 1,5%, а процент пунктов, исключенных при составлении сводной модели, 0,9%.

В финальную базу данных ArcGIS загружены только пункты, использованные при составлении цифровых моделей, в количестве 651 862 пункта. Такая структура базы данных обеспечивает высокую точность моделирования геоида и возможность последующего расширения и актуализации данных.

Результаты работ в рамках каждого миллионного листа сведены в единую базу цифрового массива гравиметрических данных по территории республики «Geoid.gdb», структура представлена в рис. 4.

Материалы, полученные и структурированные в результате выполненных работ, успешно использованы при создании сводной цифровой модели аномалий силы тяжести в свободном воздухе на всю площадь Республики Казахстан. На основе полученной модели впервые была

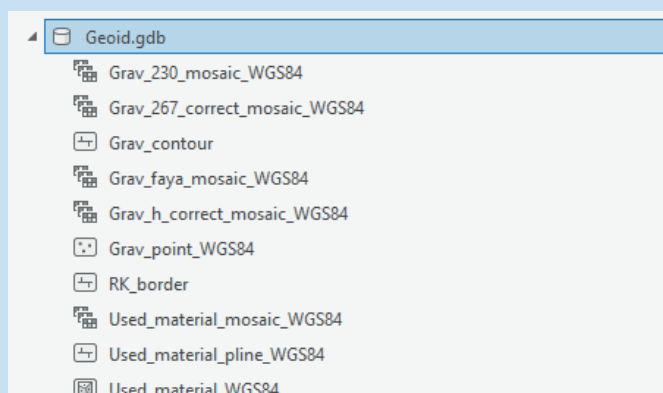


Рис. 4. Финальная база данных ArcGIS «Geoid.gdb».
Сурет 4. ArcGIS «Geoid.gdb» соңғы деректер базасы.
Figure 4. Final ArcGIS database «Geoid.gdb».

составлена карта аномалий силы тяжести в свободном воздухе масштаба 1:1000000 в цифровом формате в среде географической информационной системы ArcGIS.

Полученная база данных благодаря ее структуре и информативности может быть успешно использована при решении вопросов как геолого-геофизических, так и задач геодезии.

Заключение

В рамках проведенного исследования разработана геопространственная база данных гравиметрической информации, предназначенная для построения высокоточной

модели геоида Казахстана. Созданная цифровая платформа в среде ArcGIS обеспечила стандартизацию, интеграцию и систематизацию разнородных гравиметрических данных. Итоговый массив данных включает пункты наблюдений, прошедших предварительную верификацию и увязку, что гарантирует их высокую достоверность и согласованность.

Разработанная база данных представляет собой основу для различных геодезических и геофизических исследований, включая уточнение параметров геоида.

Перспективы дальнейшего развития включают расширение массива данных за счет новых гравиметрических измерений, интеграцию со спутниковыми гравитационными данными и применение усовершенствованных алгоритмов интерполяции и сглаживания для повышения точности моделирования. Разработанная база данных обладает высокой научной и практической значимостью и может служить основой для последующих исследований в области геодезии и геофизики, направленных на совершенствование методов построения и уточнения моделей гравитационного поля Земли.

Благодарность

Данное исследование финансируется Комитетом по науке Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № BR21882366 «Разработка модели геоида Республики Казахстан, как основа единой государственной системы координат и высот»).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Торге В., Мюллер Й. Геодезия. 4-е изд. Берлин: Walter de Gruyter GmbH, 2012. 433 с. (на английском языке)
2. Подготовка гравиметрической основы для создания модели геоида Казахстана / Касымканова Х.М. [и др.] // Вестник ВКТУ. 2024. № 3. С. 62–67 (на русском языке)
3. Оценка глобальных моделей гравитационного поля высокой степени на территории Казахстана / Косарев Н. [и др.] // International Journal of Engineering and Geosciences. 2025. Т. 10. № 1. С. 14–21 (на английском языке)
4. Разработка и оценка глобальной модели гравитационного поля Земли 2008 (EGM2008) / Павлис Н.К. [и др.] // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2012. Т. 117. С. 1–38 (на английском языке)
5. Актуализированная комбинированная глобальная модель гравитационного поля, включающая данные GOCE до степени и порядка 2190 (EIGEN-6C4) / Förste C. [и др.] // GFZ Data Services. 2014. С. 1–8 (на английском языке)
6. Цингерле П., Пайл Р., Грубер Т., Ойконониду Х. Комбинированная глобальная модель гравитационного поля XGM2019e // GFZ Data Services. 2019. С. 1–10 (на английском языке)
7. Оценка глобальных геопотенциальных моделей в Казахстане на основе высот геоида и аномалий силы тяжести / Шоганбекова А. [и др.] // Вестник Казахской ведущей академии архитектуры и строительства. 2024. Т. 92. № 2. С. 194–209 (на английском языке)
8. Оценка точности цифровых моделей рельефа для локального моделирования геоида // Научный вестник Национального горного университета. 2024. С. 151–156 (на английском языке)
9. Ли Цзин, Цзян Чжи. Достижения в обработке геопространственных данных на основе ArcGIS // International Journal of Geographic Information Science. 2018. Т. 32. № 4. С. 635–654 (на английском языке)
10. Матчин В.Т. Геоданные и базы данных // Прикладная геоинформатика. 2017. Т. 20. № 3. С. 100–102 (на русском языке)
11. Дзюба О.В., Демидов В.К., Данилов А.В. Сравнительная характеристика систем управления базами данных для построения сервера геологической БД // Геоинформационные технологии. 2019. № 2. С. 45–50 (на русском языке)

12. К вопросу создания единой базы геолого-геофизической информации по нефтегазовым месторождениям Казахстана / Жылкыбаева Г.А. [и др.] // Вестник Атырауского института нефти и газа. 2017. Т. 41. № 1. С. 14–19 (на русском языке)

ПАЙДАЛАНҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Torge W., Müller J. Геодезия. 4-бас. Берлин: Walter de Gruyter GmbH, 2012. 433 б. (ағылшын тілінде)
2. Қазақстан геоиды моделін жасау үшін гравиметриялық негізді дайындау / Касымқанова Х.М. [және т. б.] // ШҚТУ Хабаршысы. 2024. № 3. Б. 62–67 (орыс тілінде)
3. Қазақстан аумағындағы жоғары дәрежелі жаһандық гравитациялық өріс модельдерін бағалау / Kosarev N. [және т. б.] // International Journal of Engineering and Geosciences. 2025. Т. 10. № 1. Б. 14–21 (ағылшын тілінде)
4. Pavlis N.K., Holmes S.A., Kenyon S.C., Factor J.K. Жердің гравитациялық моделі 2008 (EGM2008) әзірлеу және бағалау // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2012. Т. 117. Б. 1–38 (ағылшын тілінде)
5. GOCE деректері негізінде 2190 дәрежеге дейінгі GFZ Potsdam және GRGS Toulouse (EIGEN-6C4) біріктірілген жаһандық гравитациялық өріс моделі / Förste C. [және т. б.] // GFZ Data Services. 2014. Б. 1–8 (ағылшын тілінде)
6. Zingerle P., Pail R., Gruber T., Oikonomidou X. XGM2019e біріктірілген жаһандық гравитациялық өріс моделі // GFZ Data Services. 2019. Б. 1–10 (ағылшын тілінде)
7. Қазақстанда геоид биіктіктері мен гравитациялық аномалиялар негізінде жаһандық геопотенциал модельдерін бағалау / Shoganbekova A. [және т.б.] // Қазақ бас сәулет-құрылыс академиясының Хабаршысы. 2024. Т. 92. № 2. Б. 194–209 (ағылшын тілінде)
8. Жергілікті геоид моделін құруға арналған сандық биіктік модельдерінің дәлдігін бағалау // Украин Ұлттық Тау-кен университетінің Ғылыми хабаршысы. 2024. Б. 151–156 (ағылшын тілінде)
9. Li J., Jiang Z. ArcGIS негізіндегі геокеңістіктік деректерді өңдеудің жаңа бағыттары // International Journal of Geographic Information Science. 2018. Т. 32. № 4. Б. 635–654 (ағылшын тілінде)
10. Матчин В.Т. Геодеректер базалары // Қолданбалы геоақпараттану. 2017. Т. 20. № 3. Б. 100–102 (орыс тілінде)
11. Дзюба О.В., Демидов В.К., Данилов А.В. Геологиялық деректер базасы серверін құру мақсатында деректер базасын басқару жүйелерінің салыстырмалы сипаттамасы // Геоақпараттық технологиялар. 2019. № 2. Б. 45–50 (орыс тілінде)
12. Қазақстандағы мұнай-газ кен орындары бойынша геологиялық-геофизикалық ақпараттың бірыңғай деректер базасын құру мәселесі / Жылқыбаева Г.А. [және т. б.] // Атырау мұнай және газ институтының Хабаршысы. 2017. Т. 41. № 1. Б. 14–19 (орыс тілінде)

REFERENCES

1. Torge W., Müller J. Geodesy. 4th ed. Berlin: Walter de Gruyter GmbH, 2012. 433 p. (in English)
2. Podgotovka gravimetricheskoy osnovy dlya sozdaniya modeli geoida Kazakhstana [Preparation of gravimetric base for creating Kazakhstan's geoid model], Kasymkanova Kh.M. [et al.], Vestnik VKTU [Bulletin of East Kazakhstan Technical University]. 2024. No. 3. 62–67 pp. (in Russian)
3. Evaluation of the high-degree global gravity field models in the territory of Kazakhstan / Kosarev N. [et al.] // International Journal of Engineering and Geosciences. 2025. V. 10. No. 1. 14–21 pp. (in English)
4. The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008) / Pavlis N.K. [et al.] // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2012. V. 117. 1–38 pp. (in English)
5. The latest combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 2190 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse (EIGEN-6C4) / Förste C. [et al.] // GFZ Data Services. 2014. 1–8 pp. (in English)
6. Zingerle P., Pail R., Gruber T., Oikonomidou X. The combined global gravity field model XGM2019e // GFZ Data Services. 2019. 1–10 pp. (in English)
7. Evaluation of Global Geopotential Models in Kazakhstan Based on Geoid Heights and Gravity Anomalies / Shoganbekova A. [et al.] // Bulletin of Kazakh Leading Academy of Architecture and Construction. 2024. V. 92. No. 2. 194–209 pp. (in English)
8. Assessment of Digital Elevation Models Accuracy for Local Geoid Modeling // Scientific Bulletin of the National Mining University. 2024. 151–156 pp. (in English)
9. Li J., Jiang Z. Advances in ArcGIS-based Geospatial Data Processing // International Journal of Geographic Information Science. 2018. V. 32. No. 4. 635–654 pp. (in English)
10. Matchin V.T. Bazy geodannykh [Geodatabases], Prikladnaya geoinformatika [Applied Geoinformatics]. 2017. V. 20. No. 3. 100–102 pp. (in Russian)
11. Dzyuba O.V., Demidov V.K., Danilov A.V. Sravnitel'naya kharakteristika sistem upravleniya bazami dannykh s tsel'yu postroeniya servera geologicheskoy bazy dannykh [Comparative characteristics of

database management systems for building a geological database server], *Geoinformatsionnye tekhnologii [Geoinformation Technologies]*. 2019. No. 2. 45–50 pp. (in Russian)

12. K voprosu sozdaniya edinoi bazy dannykh geologo-geofizicheskoy informatsii po neftegazovym mestorozhdeniyam Kazakhstana [On the issue of creating a unified database of geological and geophysical information on Kazakhstan's oil and gas fields], Zhilkybaeva G.A. [et al.], *Vestnik Atyrauskogo instituta nefti i gaza [Bulletin of the Atyrau Institute of Oil and Gas]*. 2017. V. 41. No. 1. 14–19 pp. (in Russian)

Сведения об авторах:

Ержанқызы А., Ph.D, старший преподаватель Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), a.yerzhankyzy@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0003-2559-3220>

Нұрақынов С.М., ведущий научный сотрудник, ТОО «Институт ионосферы» (г. Алматы, Казахстан), snurakynov@ionos.kz; <https://orcid.org/0000-0001-9735-7820>

Бермуханова А.М., Ph.D докторант по специальности «Геопространственная цифровая инженерия», Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), aigerimbermukhanova@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-4260-9637>

Қожахметов М.С., научный сотрудник в лаборатории спутниковых и геодинамических исследований, ТОО «Институт ионосферы»; Ph.D докторант по специальности «Геопространственная цифровая инженерия» Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), magzhan.kozhakhmetov@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0004-9433-8674>

Авторлар туралы мәліметтер:

Ержанқызы А., Ph.D, аға оқытушы Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан)

Нұрақынов С.М., «Ионосфера институты» ЖШС Жетекші ғылыми қызметкері (Алматы қ., Қазақстан)

Бермуханова А.М., Геокеңістіктік цифрлық инженерия мамандығы бойынша Ph.D докторанты, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан)

Қожахметов М.С., «Спутниктік және геодинамикалық зерттеулер» зертханасының ғылыми қызметкері, «Ионосфера институты» ЖШС; «Геокеңістіктік цифрлық инженерия» мамандығы бойынша Ph.D докторанты, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан)

Information about the authors:

Yerzhankyzy A., Ph.D, Senior Lecturer, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Nurakynov S.M., Leading researcher at the «Institute of Ionosphere» LLP (Almaty, Kazakhstan)

Bermukhanova A.M., Ph.D candidate in «Geospatial Digital Engineering» at Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Kozhakhmetov M.S., Researcher at the Laboratory of Satellite and Geodynamic Research, LLP «Institute of Ionosphere»; Ph.D candidate in «Geospatial Digital Engineering» at Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

ВЫСТАВКА

24-26 сентября 2025

23-я международная выставка-форум



ПРОМЫШЛЕННЫЙ САЛОН

Ваше оборудование — наши покупатели

18+

ПРИ ПОДДЕРЖКЕ:



МИНИСТЕРСТВА
ПРОМЫШЛЕННОСТИ
И ТОРГОВЛИ
САМАРСКОЙ ОБЛАСТИ



СОЮЗ
МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ
РОССИИ



ТОРГОВО-ПРОМЫШЛЕННОЙ
ПАЛАТЫ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



ТОРГОВО-ПРОМЫШЛЕННОЙ
ПАЛАТЫ
САМАРСКОЙ ОБЛАСТИ



ЭКСПО-ВОЛГА
организатор выставок с 1986 г.

г. Самара, ул. Мичурина, 23а
тел.: (846) 207-11-24

www.expo-volga.ru

Код МРНТИ 36.33.27

A. Kenesbayeva, *E.I. Kuldeev, E.O. Shalenov, T.B. Nurpeissova
Satabayev University (Almaty, Kazakhstan)

APPLICATION OF THE KRIGING METHOD FOR GRAVITY DATA INTERPOLATION

Abstract. This article examines the application of the kriging method for the interpolation of gravimetric data. Three approaches are analyzed – Ordinary Kriging, Universal Kriging, and Empirical Bayesian Kriging – with the aim of constructing spatially continuous models of gravity anomalies. The methodology is implemented using the ArcGIS Pro toolkit. Particular attention is given to comparing the interpolation accuracy based on cross-validation indicators, including root mean square error and mean prediction error. The results show that EBK and UK with a linear trend provide the highest accuracy under various data characteristics, especially in the presence of trends and sparse observations. Kriging demonstrates high robustness, interpretability, and adaptability to the spatial distribution of gravimetric measurements, making it an effective tool in gravimetry and geoid modeling.

Key words: gravimetry, kriging, spatial interpolation, variogram, geostatistics, geoid, gravitational field.

Гравиметриялық деректерді интерполяциялау үшін кригинг әдісін қолдану

Аннотация. Бұл мақалада гравиметриялық деректерді интерполяциялау үшін кригинг әдісін қолдану қарастырылады. Гравитациялық аномалиялардың кеңістіктік үздіксіз модельдерін құру мақсатында үш тәсіл талданады – Ordinary Kriging, Universal Kriging және Empirical Bayesian Kriging. Әдістеме ArcGIS Pro бағдарламалық құралы негізінде жүзеге асырылған. Интерполяция дәлдігін кросс-валидация көрсеткіштері (орташа квадраттық қате мен болжам қатесінің орташа мәні) бойынша салыстыруға ерекше назар аударылады. Нәтижелер EBK және сызықтық тренді бар UK әдістері әртүрлі деректер сипаттамаларында, әсіресе трендтер мен сирек өлшемдер жағдайында, жоғары дәлдік қамтамасыз ететінін көрсетеді. Кригинг әдісі гравиметриялық өлшемдердің таралу ерекшеліктеріне жоғары тұрақтылық, түсініктілік және бейімділік танытады, бұл оны гравиметрия мен геоидты модельдеуде тиімді құрал етеді.

Түйінді сөздер: гравиметрия, кригинг, кеңістіктік интерполяция, вариограмма, геостатистика, геоид, гравитациялық өріс.

Применение метода кригинг для интерполяции гравиметрических данных

Аннотация. В статье рассматривается применение метода кригинга для интерполяции гравиметрических данных. Исследуются три подхода – Ordinary Kriging, Universal Kriging и Empirical Bayesian Kriging – с целью построения пространственно-непрерывных моделей гравиметрических аномалий. Методология реализована с использованием инструментария ArcGIS Pro. Особое внимание уделено сравнению точности интерполяции на основе показателей кросс-валидации, включая среднеквадратичную ошибку и среднюю ошибку предсказания. Результаты показывают, что EBK и UK с линейным трендом обеспечивают наилучшую точность при различных характеристиках данных, особенно в условиях наличия трендов и разреженных наблюдений. Метод кригинга демонстрирует высокую устойчивость, интерпретируемость и адаптивность к особенностям распределения гравиметрических измерений, что делает его эффективным инструментом в гравиметрии и моделировании геоида.

Ключевые слова: гравиметрия, кригинг, пространственная интерполяция, вариограмма, геостатистика, геоид, гравитационное поле.

Introduction

Kriging is one of the most effective geostatistical interpolation methods, widely used in gravimetry for modeling the gravity field and constructing geoid models. Its popularity stems from its ability to account for the spatial autocorrelation of data and to provide optimal estimates with minimal error variance [1]. Modern software platforms such as ArcGIS Pro offer various kriging techniques, including Ordinary Kriging, Universal Kriging, and Empirical Bayesian Kriging. These methods allow for adaptation to different data characteristics, including trends and heterogeneities, making them particularly valuable for analyzing gravity anomalies and constructing geoid models¹.

Recent research on the application of machine learning methods for predicting gravity anomalies highlights the potential of these approaches to enhance interpolation accuracy, particularly in regions with sparse or irregular observation networks. For instance, Zhanakulova et al. (2025) compared the performance of various machine learning algorithms with traditional interpolation techniques, including kriging, and found that in mountainous regions, kriging provided higher accuracy and greater stability than other methods². Luther (2025) examined the performance of machine learning and kriging in modeling gravity anomalies. When a sufficient amount of training data was available, neural network models – such as XGBoost and CNN – demonstrated superior accuracy in capturing complex patterns. However, kriging proved to be more robust to local noise and offered better interpretability. Wang et al. (2019) proposed using convolutional neural networks to reconstruct gravity and magnetic data with large missing areas.

While neural networks were successful in handling datasets with significant gaps, kriging yielded better results in cases with fewer missing values and the presence of spatially autocorrelated noise [2].

At the same time, foundational works in the field of geodesy – such as the study by Torge and Müller (2012) – emphasize the importance of accurately modeling the Earth's gravity field and the role of various interpolation methods in this process. The authors examine different aspects of gravimetric measurements and their application in geoid modeling, highlighting the relevance of selecting an appropriate interpolation method depending on the specific characteristics of the task at hand [3]. Tóth and Völgyesi (2006) investigated the capabilities of kriging and least-squares collocation (LSC) for predicting gravity field values based on gradient data. They concluded that under limited resource conditions, kriging is preferable, as it requires less computational effort and is more robust to sparse observation networks [4].

The choice of interpolation method – whether traditional kriging or modern machine learning approaches – should be guided by the characteristics of the input data, the required level of accuracy, and the specific nature of the problem being addressed. An integrated approach that leverages the strengths of various methods can yield optimal results in gravity field modeling and geoid construction [5, 6, 7].

Fedorchuk (2024) conducted a comparative analysis of different interpolation techniques using data from WGM2012. The study found that kriging provides high accuracy when constructing regular grids of gravity anomalies, particularly when data points are evenly distributed. Kriging outperformed

¹ESRI. (2022). Kriging methods in ArcGIS Pro [Help documentation]. URL: <https://pro.arcgis.com> (retrieved May 29, 2025). Access mode: open.

²K. Zhanakulova. Application of machine learning methods for gravity anomaly prediction // Geosciences. 2025. V. 15. No. 5. Article 175. URL: <https://doi.org/10.3390/geosciences15050175> (retrieved May 29, 2025). Access mode: open.

inverse distance weighting, minimum curvature, and radial basis function methods, especially in scenarios with moderate to high-density GNSS-gravimetric observations. The author emphasizes that kriging serves as a reliable tool for local refinement of geoid models based on global models such as EGM2008 and WGM2012, particularly in mountainous and transitional regions where topographic effects are most pronounced [8].

Yang et al. (2024) applied kriging to assess the resolving power of satellite-derived gravity anomaly models. Their research demonstrated that kriging enables local refinement of global datasets (e.g., DTU17 and SIOv32.1), especially in areas where satellite data lack sufficient density and precision³. In this context, kriging was essential for restoring residual anomalies and estimating the effective elastic thickness of the lithosphere, thereby facilitating the interpretation of uplift mechanisms in active tectonic regions.

Liu et al. (2019) developed a modified kriging technique incorporating «topographic weighting» to enhance accuracy in marine gravimetry. This method significantly improved results in areas with limited bathymetric data and substantially reduced discrepancies when reconciling satellite altimetry data with navigational measurements [9].

Materials and Methods

One of the most widely applied approaches to spatial interpolation is geostatistical modeling based on the kriging method. Kriging is an optimal linear unbiased interpolator that relies on the assumption of spatial autocorrelation among observed values. It provides weighted predictions in continuous space, allowing for the incorporation of both the structure of spatial variability and the level of confidence in the input data.

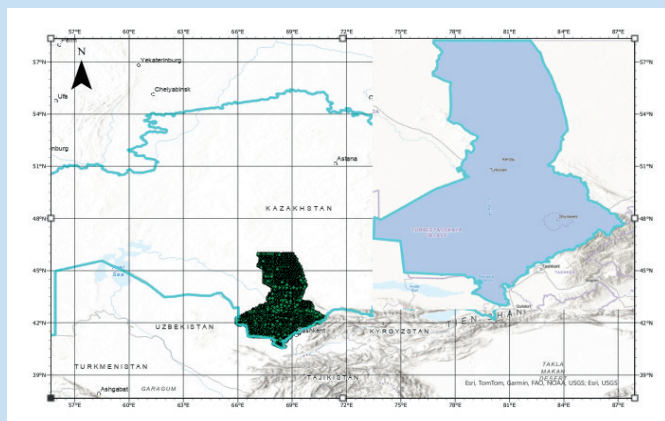


Figure 1. Study Area Map.

Сурет 1. Зерттеу аумағының картасы.

Рис. 1. Карта территории исследования.

In kriging, the predicted value at any location is computed as a linear combination of the values obtained at sampled points, with corresponding weights. These kriging weights are selected to minimize the variance of the predicted value. They depend on the choice of the variogram model, the distances between the measured and predicted points, and the overall

spatial structure of the data distribution.

Ordinary kriging is a widely used interpolation method that assumes a stationary random process with a known semivariogram and an unknown but constant mean, which is either estimated or ignored in the modeling process. It ensures unbiased estimation of spatial variables.

The study area is presented on the map and covers the Turkistan Region of the Republic of Kazakhstan, where digitized gravity anomaly measurement points were collected for subsequent analysis.

As part of this study, three types of kriging were applied: Ordinary Kriging, Empirical Bayesian Kriging, and Universal Kriging. All of these methods are based on variational analysis, but they differ in their approaches to variogram modeling and in how they handle uncertainty in model parameters.

Ordinary Kriging assumes first-order stationarity, meaning that the mean is constant but unknown throughout the study area. Constructing an interpolation model requires a priori selection and parameterization of a theoretical variogram model – commonly spherical, exponential, or Gaussian. The variogram describes how the variance between values changes with distance and serves as the foundation for computing interpolation weights. Key parameters include the sill (the variance at which the variogram levels off), the range (the distance beyond which spatial correlation becomes negligible), and the nugget effect (representing microscale variation or measurement error). This method is sensitive to the choice of variogram model and typically requires manual adjustment, particularly in the presence of anisotropy or spatial trends in the data.

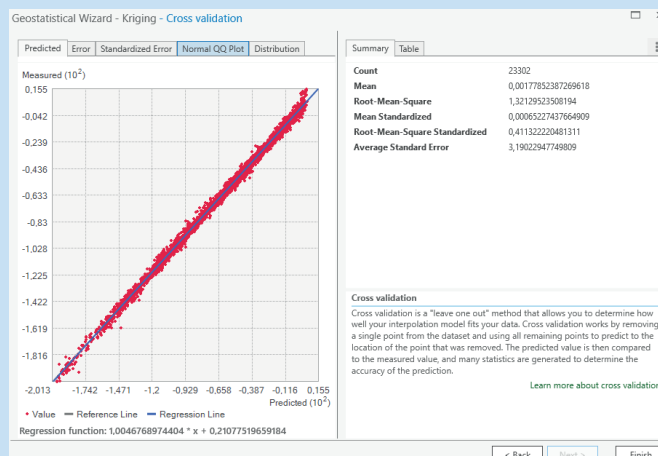


Figure 2. Kriging cross-validation results.

Сурет 2. Кригинг әдісінің кросс-валидация нәтижелері.

Рис. 2. Результаты кросс-валидации метода крикинга.

Empirical Bayesian Kriging (EBK) is a modification of the classical kriging approach in which variogram parameters are treated as random variables and are estimated through repeated simulations. The method employs a Bayesian approximator that allows for the automatic incorporation of uncertainty in modeling spatial correlation. This makes EBK particularly well-suited for handling heterogeneous, noisy, or sparsely

³Yang, D., Zhang, L., & Chen, X. Using kriging to assess resolution of satellite gravity models. *Remote Sensing*. 2024. V.16(3). Article 423. URL: <https://doi.org/10.3390/rs16030423> (retrieved May 29, 2025). Access mode: open.

sampled datasets – conditions frequently encountered in the interpolation of gravity anomalies.

EBK eliminates the need for manual variogram fitting and can deliver more robust results under similar conditions. Its ability to model parameter uncertainty directly enhances its performance in cases where classical kriging methods may be less reliable due to data limitations or non-stationarity.

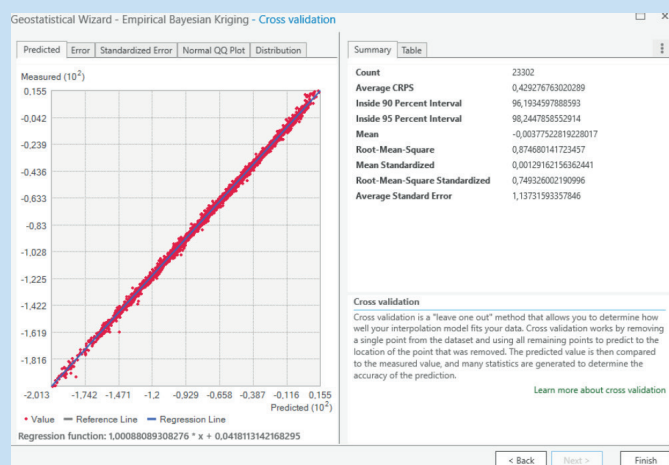


Figure 3. Empirical Bayesian kriging cross-validation results.

Сурет 3. Эмпирикалық байес крикингі әдісінің кросс-валидация нәтижелері.

Рис. 3. Результаты кросс-валидации метода Эмпирического байесовского крикинга.

Universal Kriging (UK) is a variant of kriging that accounts for the presence of a global trend in the spatial distribution of data. Unlike Ordinary Kriging, which assumes a constant mean throughout the study area, Universal Kriging allows the mean to vary – typically as a linear or polynomial function of spatial coordinates.

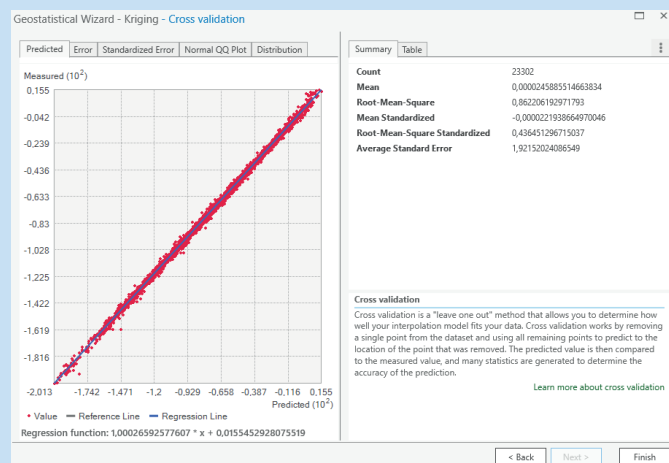


Figure 4. Universal Kriging cross-validation results.

Сурет 4. Универсалды крикингі әдісінің кросс-валидация нәтижелері.

Рис. 4. Результаты кросс-валидации метода универсального крикинга.

Universal Kriging with a linear trend represents an optimal compromise between deterministic and stochastic modeling, offering high-quality interpolation of gravimetric data in the presence of weak global directional trends. This makes UK particularly suitable for scenarios where the data exhibit gradual spatial drift or underlying systematic variation across the region of interest.

The methods under consideration are based on linear interpolation models and, on average, provide accurate approximations of values without systematic bias. However, they differ in terms of automation, trend incorporation, and robustness to sampling characteristics. A comparative analysis of these methods using the same set of gravimetric data enables not only the evaluation of differences in spatial prediction accuracy but also a reasoned justification for selecting the most appropriate geostatistical model for subsequent applications in gravimetry and geoid modeling.

In spatial analysis, three functional models are commonly used: spherical, exponential, and Gaussian. In this study, the spherical model was selected, and is represented by the following equation:

$$\gamma(h) = c_0 + c \left\{ \frac{3h}{2r} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{r} \right)^3 \right\} \text{ for } 0 < h \leq r = c_0 + c$$

$$\text{for } h > r = 0 \text{ for } h = 0,$$

where

c – spatially correlated variance;

r is the correlation radius.

The quantity $c_0 + c$ is known as the «threshold».

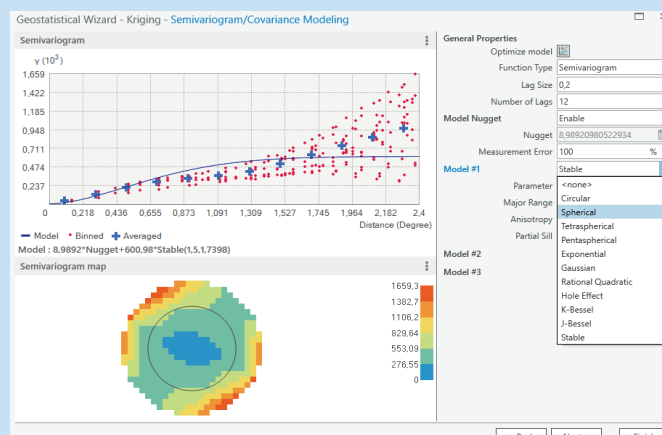


Figure 5. Selection of the Spherical Variogram Model.

Сурет 5. Сфералық вариограмма моделін таңдау.

Рис. 5. Выбор сферической вариограммной модели.

Results and discussion

As part of the study, three geostatistical interpolation methods were tested: Ordinary Kriging (OK), Empirical Bayesian Kriging (EBK), and Universal Kriging (UK) with a first-order trend. All methods were implemented in the ArcGIS Pro software environment using a digitized database of Bouguer anomalies, followed by validation through cross-validation.

Table 1
Comparative Analysis of Kriging Methods Based on Cross-Validation Metrics for Gravity Anomaly Interpolation

Гравитациялық anomалияларды интерполяциялау үшін кросс-валидация метрикалары негізінде кригаж әдістерінің салыстырмалы талдауы

Таблица 1

Сравнительный анализ методов кригинга на основе метрик перекрестной проверки для интерполяции аномалий гравитации

Interpolation Method	Root Mean Square Error (RMSE)	Standardized RMSE	Average Standard Error (ASE)	Comment
Ordinary Kriging (OK)	1.3213	0.4113	3.1902	Simple and robust model without trend consideration
Empirical Bayesian Kriging (EBK)	0.8749	0.7493	1.1373	Automated model accounting for local variability
Universal Kriging (UK)	0.8622	0.4365	1.9215	Takes into account the global trend, provides a high level of accuracy and stability

The simplest model – Ordinary Kriging (OK) – demonstrated stable but less accurate results (RMSE = 1.32). The standardized RMSE was 0.41, indicating a moderate underestimation of variance and an acceptable prediction error. As this method does not account for a global trend in the spatial data, it is most suitable for cases with isotropic distributions of anomalies.

Empirical Bayesian Kriging (EBK) achieved higher accuracy (RMSE = 0.87) and offered a better balance between predicted values and estimated errors. The automatic generation of semivariograms and the inclusion of localized models make EBK particularly effective under conditions of weak stationarity and heterogeneous spatial structure.

Universal Kriging (UK) with a first-order trend produced the highest interpolation quality among the methods tested (RMSE = 0.86), with a standardized RMSE of 0.43. This suggests that incorporating a global linear trend allows for the modeling of systematic variations in Bouguer anomalies across the study area without compromising physical interpretability. However, applying a second-order trend led to model overfitting and a loss of geostatistical significance, as evidenced by an extremely high standardized error (exceeding 37). Therefore, this variant was excluded from further analysis.

In conclusion, EBK and UK with a first-order trend are the most optimal approaches for the spatial interpolation of gravimetric data in this study. The choice between them should be guided by the analytical objective: Universal Kriging is more

appropriate for modeling global spatial patterns, whereas Empirical Bayesian Kriging provides more robust results in the presence of local heterogeneity.

Conclusion

The conducted study confirms that kriging remains one of the most reliable and accurate tools for the spatial interpolation of gravimetric data. The analysis of its three variants – Ordinary Kriging, Universal Kriging, and Empirical Bayesian Kriging – highlighted their respective strengths depending on the structure of the input data. The highest accuracy under conditions of spatial trends and heterogeneity was achieved by EBK and UK. EBK proved particularly effective when the number of observations was limited, while UK excelled in the presence of a global trend.

Kriging provides statistically sound estimates, demonstrates robustness to noise, and adapts well to various spatial characteristics. These features affirm its applicability as a key technique in gravity field modeling and the construction of refined geoid models, especially in regions with sparse observation networks and complex topography.

Acknowledgments

This research was funded by the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. BR21882366 «Development of a geoid model of the Republic of Kazakhstan as the basis of a unified state coordinate system and heights»).

REFERENCES

1. Oliver M.A., Webster R. *A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging* // *Catena*. 2014. V. 113. 56–69 pp. (in English)
2. Wang Y., Li J., Zhao X. *Convolutional neural networks for gravity and magnetic field restoration* // *Geophysical Journal International*. 2019. V. 218 (2). 1172–1188 pp. (in English)
3. Torge W., Müller J. *Geodesy (4th ed.)*. Berlin: De Gruyter. 2012. 416 p. (in English)
4. Tóth G., Völgyesi L. *Prediction of gravity field using kriging and least squares collocation* // *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*. 2006. V. 41 (2). 193–202 pp. (in English)

5. Gruber T., Rummel R., Yi W. Evaluation of GOCE-based gravity field models // *Journal of Geodesy*. 2011. V. 85. 845–860 pp. (in English)
6. Baur O., Kuhn M., Featherstone W. E. Comparison of global gravity field models // *Surveys in Geophysics*. 2014. V. 35 (3). 713–743 pp. (in English)
7. Combined satellite-only gravity field model GOCO01S derived from GOCE and GRACE / Pail R. [et al.] // *Geophysical Research Letters*. 2011. V. 37 (20). 5–10 pp. (in English)
8. Fedorchuk A. Evaluation of interpolation methods using WGM2012 gravity data // *Geophysical Bulletin*. 2024. V. 1. 28–35 pp. (in English)
9. Liu Q., Zhou Y., Hu J. Topography-weighted kriging for marine gravimetry // *Marine Geodesy*. 2019. V. 42 (1). 20–35 pp. (in English)

ПАЙДАЛАНҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Оливер М.А., Вебстер Р. Геостатистика бойынша оқулық нұсқаулық: вариограммалар мен крикингті есептеу және үлгілеу // *Catena*. 2014. Т. 113. Б. 56–69 (ағылшын тілінде)
2. Ван Ю., Ли Ц., Чжао С. Гравитациялық және магниттік деректерді қалпына келтіру үшін конволюциялық нейрондық желілерді қолдану // *Geophysical Journal International*. 2019. Т. 218 (2). Б. 1172–1188 (ағылшын тілінде)
3. Торге В., Мюллер Й. Геодезия. 4-басылым. Берлин: De Gruyter, 2012. 416 б. (ағылшын тілінде)
4. Том Г., Вельгеси Л. Крикинг пен ең кіші квадраттар әдісін қолдану арқылы гравитациялық өрісті болжау // *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*. 2006. Т. 41 (2). Б. 193–202 (ағылшын тілінде)
5. GOCE деректеріне негізделген гравитациялық өріс модельдерін бағалау / Грубер Т. [және т. б.] // *Journal of Geodesy*. 2011. Т. 85. Б. 845–860 (ағылшын тілінде)
6. Баур О., Кун М., Фезерстоун У.Е. Жаһандық гравитациялық өріс модельдерін салыстыру // *Surveys in Geophysics*. 2014. Т. 35 (3). Б. 713–743 (ағылшын тілінде)
7. GOCE және GRACE негізіндегі GOCO01S біріктірілген спутниктік гравитациялық модель / Пайл Р. [және т. б.] // *Geophysical Research Letters*. 2010. Т. 37 (20). Б. 5–10 (ағылшын тілінде)
8. Федорчук А. WGM2012 деректеріне негізделген интерполяция әдістерін бағалау // *Геофизикалық бюллетень*. 2024. № 1. Б. 28–35 (ағылшын тілінде)
9. Лю Ц., Чжоу Ю., Ху Ц. Теңіз гравиметриясында дәлдікті арттыруға арналған бедерлік салмақталған крикинг // *Marine Geodesy*. 2019. Т. 42 (1). Б. 20–35 (ағылшын тілінде)

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Оливер М.А., Вебстер Р. Руководство по геостатистике: расчет и моделирование вариограмм и крикинга // *Catena*. 2014. Т. 113. С. 56–69 (на английском языке)
2. Ван Ю., Ли Цз., Чжао С. Применение сверточных нейронных сетей для восстановления гравитационных и магнитных данных // *Geophysical Journal International*. 2019. Т. 218 (2). С. 1172–1188 (на английском языке)
3. Торге В., Мюллер Й. Геодезия. 4-е изд. Берлин: De Gruyter, 2012. 416 с. (на английском языке)
4. Том Г., Вельгеси Л. Прогнозирование гравитационного поля с использованием крикинга и метода наименьших квадратов // *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*. 2006. Т. 41 (2). С. 193–202 (на английском языке)
5. Оценка моделей гравитационного поля, основанных на данных GOCE / Грубер Т. [и др.] // *Journal of Geodesy*. 2011. Т. 85. С. 845–860 (на английском языке)
6. Баур О., Кун М., Физерстоун У.Е. Сравнение глобальных моделей гравитационного поля // *Surveys in Geophysics*. 2014. Т. 35 (3). С. 713–743 (на английском языке)
7. Объединенная спутниковая модель гравитационного поля GOCO01S на основе данных GOCE и GRACE / Р. Пайл [и др.] // *Geophysical Research Letters*. 2010. Т. 37 (20). С. 5–10 (на английском языке)
8. Федорчук А. Оценка методов интерполяции на основе данных WGM2012 // *Геофизический вестник*. 2024. № 1. С. 28–35 (на английском языке)
9. Лю Ц., Чжоу Ю., Ху Цз. Крикинг с учетом топографии для морской гравиметрии // *Marine Geodesy*. 2019. Т. 42 (1). С. 20–35 (на английском языке)

Information about the authors:

Kenesbayeva A., Ph.D, Associate Professor of the Department of Mine Surveying and Geodesy, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan), a.kenesbayeva@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0002-0869-5762>

Kuldeev E.I., candidate of technical sciences, professor, Vice-Rector for Science and Corporate Development, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan), e.kuldeev@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0001-8216-679X>

Shalenov E.O., Ph.D, Associate Professor of the Department of «General Physics», Satbayev University (Almaty, Kazakhstan), e.shalenov@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0001-6469-6623>

Nurpeisova T.B., Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Mine Surveying and Geodesy, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan), t.nurpeisova@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0001-8162-6053>

Авторлар туралы мәліметтер:

Кенесбаева А., Ph.D, «Маркшейдерлік іс және геодезия» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан)

Кольдеев Е.И., т.ғ.к., профессор, ғылым және корпоративтік даму жөніндегі проректор, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан)

Шаленов Е.О., Ph.D, «Жалпы физика» кафедрасы қауымдастырылған профессоры, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан)

Нурпеисова Т.Б., т.ғ.к., «Маркшейдерлік іс және геодезия» кафедрасының профессоры, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан)

Сведения об авторах:

Кенесбаева А., Ph.D, ассоциированный профессор кафедры «Маркшейдерское дело и геодезия», Satbayev University (г. Алматы, Казахстан)

Кульдеев Е.И., к.т.н., профессор, проректор по науке и корпоративному развитию, Satbayev University (г. Алматы, Казахстан)

Шаленов Е.О., доктор Ph.D, ассоциированный профессор кафедры «Общая физика», Satbayev University (г. Алматы, Казахстан)

Нурпеисова Т.Б., к.т.н., профессор кафедры «Маркшейдерское дело и геодезия», Satbayev University (г. Алматы, Казахстан)

ГОРНЫЙ ЖУРНАЛ КАЗАХСТАНА



ПОДПИСКА' 2025 РЕКЛАМНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОТРУДНИЧЕСТВО

POST-DTS@YANDEX.KZ / +7 747 343 15 02 / MINMAG.KZ

АММ 2025. КАК ПРОШЛО ГЛАВНОЕ СОБЫТИЕ КАЗАХСТАНСКОГО ГМК

2 892 профессионалов горно-металлургической отрасли из 20 стран мира, 19 деловых сессий и три форума со 172 спикерами, 387 встреч предпринимателей и выставка из 50 компаний с передовыми технологиями.

Все эти цифры показывают масштаб 15-го Юбилейного Международного горно-металлургического конгресса Astana Mining & Metallurgy AMM 2025, который прошел в Астане 4 и 5 июня.

Главной темой юбилейного мероприятия стала «Трансформация ГМК: ответы на глобальные вызовы и изменения рынка». В первый день акцент был сделан на диалог на международном уровне. По традиции площадка сохранила за собой статус стратегической для диалога государственных органов и бизнеса из горнодобывающей и металлургической отраслей не только Казахстана, но и всего Евразийского региона. Были организованы национальные делегации Канады в составе 22 компаний (Hatch, CRIRSCO, B2Gold, NeoPerformance, First Quantum), Великобритании в составе 5 компаний (Maritime House, Mkango, Hypromag, UKEF), Швеции в составе 7 компаний (Sandvik, Epiroc, Atlas Copco, Olofsfors, Ericsson) и КНР в составе 6 компаний (NFC, Sanny, Xi'an Center of China, CCCMC, CUTES).

Ключевыми спикерами AMM 2025 стали Лю Юй – Председатель Правления NFC (КНР); Тина Армстронг – Глобальный управляющий директор, Hatch (Канада); Родриго Кабэллос – Старший Вице-президент Molymet (Чили); Виктор Кинг – Старший Вице-президент B2Gold (Канада); Гарт Киркхэм – Председатель CRIRSCO (Канада); Жоаким Нуньес Де Алмейда – Директор Генерального директората по внутреннему рынку и промышленности Европейской комиссии; Бадринат Велури – Президент глобальной ассоциации индустрии редкоземельных металлов REIA (Бельгия).

Открывая Конгресс, Вице-министр промышленности и строительства Казахстана Иран Шархан рассказал о текущих достижениях ГМК республики. Так, в 2024 году доля этой отрасли в ВВП составила 8%, а объем произведенной продукции превысил 14,3 трлн тенге. При этом инвестиции увеличились на 12% и достигли уровня 3,6 млрд долларов, а экспорт составил 21,4 млрд. Отрасль продолжает активно развиваться: уже в ближайшей перспективе планируется реализовать пять крупных инвестиционных проектов стоимостью в более чем 3,5 трлн тенге с созданием 8 тысяч рабочих мест. В целом за последнее десятилетие добыча золотосодержащих руд выросла в 2,2 раза, а производство аффинированного золота – в два раза. Это позволило Казахстану войти в «двадцатку» крупнейших стран мира по золотым запасам.

«Данные показатели указывают на высокий уровень развития отрасли и ее серьезной интеграции с мировой экономикой», – сказал Иран Шархан.

Аналогично развитие продолжается и в сфере геологоразведки. С 2018 года в нее удалось привлечь более 420 млрд тенге инвестиций, а площади геологоразведки пла-

нируют увеличить с нынешних с 1,9 млн квадратных километров до 2,2 млн уже к 2026 году. Акцент будет делаться на оцифровке геоданных и внедрении международного стандарта CRIRSCO, который даст прозрачность и равные условия для всех инвесторов.

В целом же приоритетом для ГМК становится локализация химических и технологических переделов, а также выпуск компонентов стратегической важности. Казахстан планомерно движется к всестороннему развитию отрасли.

Именно будущее и возможности – не только текущие проблемы – отрасли были в центре внимания на всех сессиях AMM. Они охватили самые разные – но все без исключения важные – аспекты горно-металлургического комплекса. Например, прошли сессии по темам «Техногенные минеральные образования и переработка отходов: лучшие кейсы эффективного управления ресурсами», «Роль геополитических изменений на тенденции ESG», «ГМК Казахстана – преодолевая вызовы», «Стратегический хаб Центральной Азии: Казахстан как часть глобальной цепочки поставок критических сырьевых минералов», «Обеспечение промышленной безопасности на горнодобывающих предприятиях Республики Казахстан» и «Геологоразведка в Казахстане – современное состояние, вызовы и решения».

Отраслевые специалисты – от государственных регуляторов до бизнеса – смогли обсудить системные вызовы, трансформационные процессы и приоритеты в устойчивом развитии ГМК.

Параллельно с тематическими сессиями работали и международные площадки. Например, прошло заседание геологических служб стран-партнеров, диалог с представителями отрасли из Швеции, Канады, Великобритании, Китая. Инвестиционное Road Show CNMC и NFC стало важной платформой для демонстрации инвестиционного потенциала и углубления производственно-технологического сотрудничества между Казахстаном и Китаем.

Таким образом AMM 2025 смог выйти за пределы казахстанского горно-металлургического комплекса, создавая условия для обмена опытом на международном уровне.

Важно отметить, что результатом активного участия игроков отрасли из Казахстана и зарубежья стало большое число проведенных b2b-встреч. Всего за два дня состоялось 387 b2b-встреч, каждая из которых может стать началом для новых партнерств или реализации совместных проектов.

Параллельно с Конгрессом, напомним, работала и отраслевая выставка. Она была представлена 50 компаниями из 12 стран, включая Германию, Казахстан, Канаду, Кипр, Китай, Россию, США, Турцию, Францию, Швейцарию, Швецию, Японию. В числе экспонентов были Qarmet,

Казахмыс, Казцинк, ERG, Solidcore, NFC, Sandvik, Epiroc, Atlas Copco, Ericsson и другие. Примечательно, что из общего числа участников **35 были казахстанскими предприятиями**, что показывает стабильное развитие местного производства и технологий. Остальные компании – из зарубежья – представили свои решения по автоматизации, «цифровым двойникам», системам охраны труда и технологиям устойчивой переработки.

Второй день был акцентирован на отраслевых форумах и подведении итогов Конгресса. Отличительной чертой АММ остается организация отраслевых форумов, где можно точно обсудить важные для них проблемы. Так, **5 июня** прошли Форум золотопромышленников Казахстана, Форум угольной промышленности и Конгресс ювелиров Казахстана. На **Форуме угольной промышленности** было подписано Отраслевое соглашение угольной отрасли, которое направлено на решение социально-экономических вопросов, развитие партнерства между профсоюзами, работодателями и профильным министерством. На основе этого документа угледобывающие предприятия смогут разработать и принять новые коллективные договоры.

В контент второго дня вошли панельные сессии по темам «ГМК в эру искусственного интеллекта: новые открытия», «Смежные технологии в горной и металлургической промышленности – повышение эффективности добычи», «Внутристрановая ценность и межотраслевая кооперация» и «Раскрытие инвестиционных возможностей: финансирование горнодобывающего сектора Казахстана». Были и специализированные мероприятия для специалистов сфер **GR, HR и PR**, где они обменялись кейсами и опытом по своим направлениям. К примеру, GR meet-up стал площадкой для обсуждения антикризисных мер совместно с представителями госсектора.

Ключевым событием АММ 2025 стало включение проекта по производству графита «Сарытоган» в перечень стратегических проектов Европейского союза (список является одной из мер реализации Закона о

критически важных сырьевых материалах (CRMA), который вступил в силу 23 мая 2024 года). Это позволит проекту «Сарытоган» получить как финансовую, так и торговую поддержку со стороны фонда КСМ ЕС (общие капитальные затраты по Проекту оцениваются в размере **\$344 млн**).

В целях создания отсутствующего в стране молибденового производства между Министерством промышленности и чилийской компанией «Molybmet» (самый крупный производитель молибдена в мире) подписан Меморандум по производству молибденовой продукции. Региональным партнером по обеспечению сырья проекта «Molybmet» выступает компания ТОО «Qaz Mining Company» (владелец Дрожиловского месторождения – крупнейшее вольфрам-молибденовое месторождение РК (Костанайская область), запасы 263 тыс. тонн молибдена, 64,3 тыс. тонн вольфрама).

Важной традицией для Конгресса АММ стала церемония награждения победителей Национального отраслевого конкурса «**Золотой Гефест**». В этом году мероприятие прошло в стенах государственного театра оперы и балета «Астана Балет». Независимые эксперты из профильных ассоциаций и Министерства промышленности и строительства рассмотрели все заявки и определили победителей в **15 номинациях**.

Организатором события выступила **Казахстанская выставочная компания ITECA** и ее международный партнер Группа Компаний **ICA Events**.

Государственный партнер: Министерство промышленности и строительства РК.

Золотые Партнеры: Евразийская Группа (ERG), Solidcore resources, KAZ Minerals, Kazzinc, CoreX Holding, Kazakhmys.

Серебряные Партнеры: Komatsu Central Asia, Hatch, Qarmet.

Бронзовые Партнеры: Telko Central Asia, SGS Kazakhstan, Fakoor Sanat Tehran Engineering, Dassault Systemes, Beeline Business Kazakhstan, TURANINDUSTRIAL.

ЮБИЛЕЙНЫЙ «ЗОЛОТОЙ ГЕФЕСТ»: В ГОД РАБОЧИХ ПРОФЕССИЙ СТРАНА ЧЕСТВУЕТ ЛУЧШИХ СПЕЦИАЛИСТОВ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

4 июня в государственном театре оперы и балета «Астана Опера» состоялась торжественная церемония награждения победителей 15-го национального отраслевого конкурса «Золотой Гефест», ежегодно проводимого в рамках горно-металлургического конгресса АММ.



Событие прошло при поддержке Министерства промышленности и строительства Республики Казахстан и Генерального партнера – Eurasian Resources Group (ERG).

«Золотой Гефест» считается одним из самых ожидаемых событий отрасли и является самой почитаемой наградой республиканского значения для специалистов ГМК. Юбилейный, 15-й по счету, конкурс проходит в Год рабочих профессий в Казахстане, что придает мероприятию особую значимость. Именно сейчас, когда стране особенно важно подчеркнуть значимость труда, мастерства и инженерной мысли, «Золотой Гефест» становится ярким символом признания достижений специалистов ГМК – фундамента отечественной индустрии. Конкурс не только чествует выдающихся профессионалов, но и вдохновляет новые поколения выбирать рабочие профессии, видеть в них престиж и перспективу.

В торжественной церемонии награждения приняли участие Заместитель Председателя Мажилиса Парламента Республики Казахстан Альберт Павлович Рау, Вице-министр промышленности и строительства РК Олжас Сапарбекович Сапарбеков, Заместитель генерального директора по финансам Eurasian Resources Group в Казахстане Данияр Равшанович Рахматуллаев.

Конкурс «Золотой Гефест» остается главным профессиональным событием года в горно-металлургической отрасли. Это не просто награда – это признание высочайшего уровня квалификации, трудолюбия и приверженности профессии. В этом году церемония вновь собрала лучших представителей отрасли: геологов, горняков, металлургов, педагогов, инженеров и управленцев.

Всего за годы проведения было подано 1 957 заявок на участие, этот год не стал исключением, вновь независимому жюри было непросто сделать свой выбор. Участники были выдвинуты как коллективами предприятий, так и путем самовыдвижения, что сделало участие максимально открытым и инклюзивным.

Независимые эксперты из профильных ассоциаций и Министерства в составе жюри рассмотрели все заявки и определили победителей в 15 номинациях. Каждый победитель показал свой профессионализм, усердный труд и высокую квалификацию. **Впервые** за всю историю конкурса в номинации «Профессионал года. Женщины в ГМК» были награждены сразу две победительницы, каждая из которых продемонстрировала выдающиеся профессиональные достижения и значительный вклад в развитие своих предприятий и всей отрасли. **Имена победителей Конкурса «Золотой Гефест» 2025 года:**

- «Профессионал года. Геолог года» – Битимбаев Марат Жакупович; Главный научный сотрудник, Институт геологических наук им. К.И. Сатпаева;
- «Профессионал года. Горняк года» – Петрунин Сергей Александрович, начальник горного участка, Акционерное общество «Варваринское»;
- «Профессионал года. Шахтер года» – Серикпаев Тимур Кумарбекович, Проходчик (горнорабочий очистного забоя), ТОО «Востокцветмет»;
- «Профессионал года. Обогачитель года» – Кожобеков Бауржан Болатович, Главный обогачитель Горно-обогательного комплекса Управления обогащения ТОО «Корпорация Казахмыс»;

- **«Профессионал года. Metallург года»** – Жумабеков Елдос Муратович, Мастер смены Серии электролиза Цеха электролиза алюминия, АО «Казахстанский электролизный завод» (КЭЗ), входящего в состав Eurasian Resources Group;
- **«Профессионал года. Женщины в ГМК»** – Заурбекова Зауре Галимовна, Член Правления – Заместитель Председателя Правления по финансам и стратегическому развитию, АО «Qarmet»;
- **«Профессионал года. Женщины в ГМК»** – Алексеева Светлана Сергеевна, Коммерческий директор, ТОО «Maker»;
- **«Лучший социальный проект года»** – Группа KAZ Minerals.

Строительство и оснащение средней общеобразовательной IT-школы-лицея №50 в городе Семее на 1200 мест;

- **«Лидер года по промышленной безопасности»** – ТОО «Kazzinc», комплексная платформа OneApp;
- **«Лучшая ESG стратегия»** – Solidcore Resources plc, Комплексная долгосрочная ESG-стратегия Solidcore Resources plc;
- **«Лучшее digital-решение в ГМК»** (специальная номинация от Генерального партнера премии ERG) – АО «Qarmet», Диспетчерско-аналитический центр Угольного департамента и интегрированная система позиционирования персонала и техники;
- **«Наставник года»** – Дагилова Кулкен Тургановна, Флотатор, ТОО «KAZ Minerals Aktogay»;
- **«Педагог года»** – Кузьмин Сергей Львович, Декан Высшей школы Metallургии и горного дела, кандидат технических наук, НАО «Рудненский индустриальный университет»;
- **«Дипломная работа года»** – Гизатов Асылбек Серикович, дипломная работа «Разработка модели прогнозирования рентабельности в ключевых секторах экономики для предотвращения стагнации рынка труда и обеспечения устойчивого развития Республики Казахстан»;
- **«Медиа проект года. Лучшая журналистская работа о ГМК в печати и интернет-ресурсах»** – KURSIV MEDIA, Творческая группа – Билык Дмитрий (ген. продюсер), Гаухар Алдибекова (автор),

Фролов Станислав (оператор-постановщик). Название проекта: «Цена за медь: как живут и работают казахстанские шахтеры»;

- **«Медиа проект года. Лучшая журналистская работа о ГМК на ТВ»** – Ветлугин Вячеслав Юрьевич, АО «Агентство «Хабар», телеканал «24KZ». Собственный корреспондент телеканала «24KZ», материал «Поиск месторождений лития и оценка его запасов в РК».

Также особой наградой за развитие отрасли, за многолетний упорный труд был отмечен ветеран производства, профессионал с большой буквы – Муханов Толеген Муханович, Первый заместитель исполнительного директора «Республиканской ассоциации горнодобывающих и горно-металлургических предприятий», почетный горняк, член Национального научного совета, Академик международной инженерной Академии.

Четыре профессионала отрасли К.М. Жанабеков («Востокцветмет»), Д.С. Укибаев (ТОО «Корпорация Казахстан»), А.Т. Кадиркулова (ТОО «Казцинк-ТемирТранс») были отмечены особой государственной наградой за трудовые достижения почетных профессионалов ГМК – Нагрудным знаком **«Енбек даңқы»**. В торжественной атмосфере вечера награды им вручили Николай Владимирович Радостовец, Исполнительный директор Республиканской ассоциации горнодобывающих и горно-металлургических предприятий и Асылбек Жамашулы Нуралин, председатель Профсоюза трудящихся горно-металлургической промышленности РК.

Незабываемую атмосферу вечера смогли создать музыкальные номера от артистов театра «Астана Балет», работников предприятий Eurasian Resources Group, а также хэдлайнер вечера – ALEM.

«Золотой Гефест» – не просто награда. Это символ признания человеческого труда, инженерной мысли и корпоративной ответственности. В юбилейный год он еще раз доказал: профессии ГМК остаются востребованными, уважаемыми и перспективными, а их представители – настоящие герои индустриального Казахстана.

Конкурс **«Золотой Гефест»** проводится в рамках горно-металлургического **Конгресса АММ**. Организаторы мероприятия – **Казахстанская выставочная компания Itesa** и ее международный партнер Группа Компаний ICA Events.



Electronica Expo
Kazakhstan

UNITED EXPO
INTERNATIONAL EXHIBITION COMPANY

Все лучшее на одной выставке!

«Electronica Expo Казахстан» — крупнейшая по количеству участников и посетителей в Центральной Азии международная выставка электроники, которая объединяет всю цепочку производства от изготовления компонентов до разработки и сборки последних электронных систем.

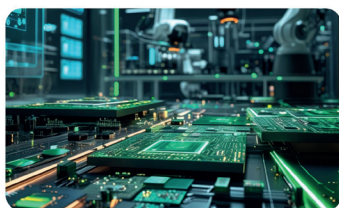
9-11 июля 2025

Астана, Казахстан

Международный Выставочный Центр «EXPO»



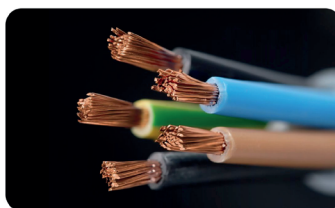
Тематические разделы выставки



Электромеханические и электронные компоненты



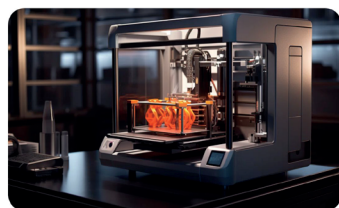
Автоматизация и робототехника



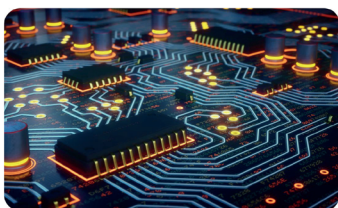
Кабели и проводники



Экологические технологии



Силовая электроника



Потребительская электроника



Бытовая техника



Автоэлектроника, электромобили



Электротехническое оборудование



Цифровые технологии



Дроны, беспилотные летательные аппараты



Решения для различных отраслей

Посетите Electronica Expo Kazakhstan 2025 совершенно бесплатно!

По любым вопросам, свяжитесь с нами:

LLC «united expo»

+ 90 536 810 68 98

electronica-expo.com

unitedexpou@gmail.com



ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ И УСЛОВИЯ ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ СТАТЕЙ в редакцию периодического печатного издания «Горный журнал Казахстана»

1. «Горный журнал Казахстана» принимает к публикации оригинальные статьи научного и научно-технического содержания, отражающие результаты исследовательской и научной деятельности, имеющие рекомендации к практическому применению решаемых вопросов, а также статьи обзорного характера, отвечающие критериям первичной научной публикации (полный перечень рубрик указан на сайте *minmag.kz*).

2. Основные требования к статьям, представленным для публикации в журнале:

- набор статьи производится в текстовом редакторе Word шрифтом Times New Roman 12 кеглем с полуторным интервалом;
- общий объем статьи, включая рисунки, таблицы, метаданные не должен превышать 8 печатных страниц;
- статьи (за исключением обзоров), должны содержать новые научные результаты;
- статья должна соответствовать тематике (см. п. 1), научному уровню журнала;
- статья должна быть оформлена в полном соответствии с требованиями, отраженными в п. 3;
- статья может быть представлена на казахском, русском или английском языке;
- в редакцию представляется окончательный, **тщательно выверенный вариант** статьи, исключающий необходимость постоянных доработок текста на этапах издательского процесса;
- перед отправкой статьи в редакцию журнала авторам необходимо проверить текст на предмет отсутствия плагиата.

3. Структура статьи должна содержать следующие разделы:

- код МРНТИ (ГРНТИ <http://grnti.ru/?pl=52>) – шестизначный;
- название статьи (сокращения не допускаются, не допускается использование аббревиатур и формул; максимальное количество слов 10-12) должно быть информативным, соответствовать научному стилю текста, содержать основные ключевые слова, характеризующие тему (предмет) исследования и содержание работы, предоставляется на казахском, русском и английском языках;
 - инициалы и фамилии авторов; статья должна иметь не более 4 авторов; знаком «*» указывается автор-корреспондент;
 - сведения о каждом авторе (ученая степень, ученое звание, должность, место основной работы, город, страна, контактные данные (адрес электронной почты), ORCID ID) предоставляются на казахском, русском и английском языках;
 - полное название организации (-й), где работают авторы (с указанием ведомственной принадлежности);
 - аннотация в соответствии с требованиями международных баз данных должна достаточно полно раскрывать содержание статьи, включая характеристику основной темы, проблемы объекта, цели исследования, основные методы, результаты исследования и главные выводы. В аннотации необходимо указать, что нового несет в себе статья в сравнении с другими, родственными по тематике и целевому назначению материалами. Аннотация предоставляется на казахском, русском и английском языках объемом не менее 700 и не более 900 символов (примерно 150...200 слов);
 - ключевые слова в количестве 6...10 устойчивых словосочетаний, по которым в дальнейшем будет выполняться поиск статьи (сокращения и аббревиатуры не допускаются): ключевые слова отражают специфику темы, объект и результаты исследования и предоставляются на казахском, русском и английском языках;
 - текст статьи, содержащий следующие разделы (введение, методы/исследования, результаты, обсуждение результатов, заключение/ выводы);
 - список использованных источников (10...12), в том числе не менее 3 зарубежных не ранее 2015 года, предоставляется на казахском, русском и английском языках.

РИСУНКИ должны иметь расширение графических редакторов CorelDraw, Photoshop, Illustrator и т. п.). Фотографии должны быть предельно четкими в графическом формате (TIFF, JPEG, CDR) с разрешением не менее 300 dpi. Все буквенные и цифровые обозначения на рисунках необходимо пояснить в основном или подрисуночном текстах. Надписи и другие обозначения на графиках и рисунках должны быть четкими и легко читаемыми. **ПОДПИСИ К РИСУНКАМ и ЗАГОЛОВКИ ТАБЛИЦ ОБЯЗАТЕЛЬНЫ.** Оформляются отдельным блоком на казахском, русском и английском языках.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ФОРМУЛЫ следует набирать в формульном редакторе MathTypes Equation или MS Equation, греческие и русские буквы в формулах набирать прямым шрифтом (опция текст), латинские – курсивом. **Обозначения величин и простые формулы в тексте и таблицах набирать как элементы текста** (а не как объекты формульного редактора). Нумеровать следует только те формулы, на которые есть ссылки в последующем изложении. Нумерация формул сквозная.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ составляется в порядке цитирования и оформляется в строгом соответствии с ГОСТ Р 7.05-2008. Ссылки на литературу в тексте отмечаются по мере их появления порядковыми номерами в квадратных скобках. Список приводится на казахском, русском и английском языках с указанием в скобках оригинала публикации. Образец оформления литературы и транслитерации размещен на сайте *minmag.kz*.

4. Условия приобретения журналов авторами.

С автором(ами) заключается договор о приобретении 10 (десяти) экземпляров журнала согласно установленным расценкам на текущий год, которые он(они) имеют право распространять среди горной общественности. После оплаты статья публикуется в номере журнала согласно очередности. Если существует необходимость опубликовать статью в одном из ближайших номеров журнала, авторы оплачивают ускорение в размере 50000 (пятьдесят тысяч) тенге.