

Код МРНТИ 38.49.17

Е. Т. Ескалиев¹, *М. Е. Рахымбердина¹, К. Вах^{2,1}, Р. Шульц³¹Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева (г. Усть-Каменогорск, Казахстан),²ООО «EuroGV» (г. Прага, Чешская Республика),³Университет нефти и минералов им. короля Фахда (г. Дахран, Королевство Саудовская Аравия)

КАРТИРОВАНИЕ ПЕГМАТИТОВЫХ ИЗМЕНЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЕКТРАЛЬНЫХ СООТНОШЕНИЙ ASTER В КАЛБА-НАРЫМСКОЙ ЗОНЕ ВОСТОЧНОГО КАЗАХСТАНА

Аннотация. Исследование направлено на оценку эффективности стандартных спектральных соотношений каналов ASTER для картирования пегматитов в Калба-Нарымской металлогенической зоне Казахстана. Применены стандартные соотношения каналов Kalinowski и Oliver для выявления зон альтерации, ассоциированных с пегматитовой минерализацией. В данной работе представлена методология, основанная на анализе спектров VNIR и SWIR каналов ASTER с применением существующих спектральных соотношений. Полученные результаты подтверждают эффективность данных стандартных соотношений каналов в идентификации зон *Al-OH* и *Mg-OH* глин, которые коррелируют с уже известными пегматитовыми месторождениями. Применение стандартных соотношений каналов может быть рекомендовано для предварительной оценки перспективности территорий на редкометалльные пегматиты в схожих геологических условиях.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, соотношение каналов, Калба-Нарым, пегматиты, космические снимки, картирование.

ASTER спектрлік арналар қатынастарын қолданумен Шығыс Қазақстандағы Қалба-Нарым аймағында пегматиттік өзгерістерді картаға түсіру

Аннотация. Зерттеу Қазақстандағы Қалба-Нарым металлогендік аймағында ASTER деректерін пайдалана отырып, гидротермалды өзгерістерді картаға түсіру үшін стандартты спектрлік арналар қатынастардың тиімділігін бағалауға бағытталған. Пегматиттік минерализациямен байланысты өзгеріс аймақтарын анықтау үшін Kalinowski және Oliver стандартты арналар қатынастары қолданылды. Бұл жұмыста қолданыстағы спектрлік қатынастарды қолдана отырып, ASTER арналарының VNIR және SWIR спектрлерін талдауға негізделген әдістеме ұсынылады. Нәтижелер белгілі пегматиттік кен орындарымен корреляцияланатын *Al-OH* және *Mg-OH* саз аймақтарын анықтау үшін стандартты арналар қатынастар деректерінің тиімділігін растайды. Ұқсас геологиялық жағдайларда сирек металл пегматиттеріне қатысты аумақтардың перспективасын алдын-ала бағалау үшін стандартты арналар қатынастарды қолдану ұсынылуы мүмкін.

Түйінді сөздер: қашықтықтан зондтау, спектрлік арналар қатынасы, Қалба-Нарым, пегматиттер, ғарыштық суреттер, картаға түсіру.

Pegmatite alteration mapping using Band Ratios with ASTER in Kalba-Narym, East Kazakhstan

Abstract. This study evaluates the effectiveness of standard ASTER spectral ratios for alteration mapping in the Kalba-Narym metallogenic zone of Kazakhstan. Standard Kalinowski and Oliver band ratios were applied to identify alteration zones associated with pegmatite mineralization. This study presents a methodology based on the analysis of VNIR and SWIR spectra from ASTER channels using existing spectral ratios. The results confirm the effectiveness of these standard ratios in identifying *Al-OH* and *Mg-OH* clay zones that correlate with known pegmatite deposits. Standard ratios can be recommended for preliminary assessment of rare-metal pegmatite prospects in similar geological conditions.

Key words: remote sensing, band ratios, Kalba-Narym, pegmatite exploration, satellite images, mapping.

Введение

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) стало неотъемлемым инструментом в геологических исследованиях, особенно для картирования гидротермальных изменений и связанной с ними минерализации. Спутниковые данные ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) с их уникальными спектральными возможностями в VNIR (0,52–0,86 мкм) и SWIR (1,6–2,43 мкм) диапазонах обеспечивают эффективное выявление минералов, содержащих гидроксильные группы и карбонаты [1].

Калба-Нарымская металлогеническая зона в Восточном Казахстане представляет собой ключевой регион для поиска редкометалльных пегматитов, содержащих *Li*, *Ta*, *Nb*, *Be*, *Cs*, *Sn*, *W*. Регион характеризуется наличием позднегерцинских гранитоидов (295–285 млн лет) и ассоциированных с ними пегматитовых зон [2]. Калба-Нарым является относительно изученной зоной [3, 4]. В результате имеем полный профиль зоны: классификация металлов, оруденение и минералы [5, 6]. Нашей задачей является использование результатов исследований в качестве параметров поиска перспективным участком с помощью ДЗЗ, в частности пегматитов.

Современные методы дистанционного зондирования, основанные на анализе спектральных данных ASTER, популярны среди научного сообщества по всему миру [7].

Однако применение этих методов для поиска месторождений полезных ископаемых остается недостаточно освещенным в контексте Казахстана.

Целью данного исследования является использование методологии картирования пегматитов в Калба-Нарымской зоне с использованием стандартных спектральных соотношений каналов ASTER, и тем самым показать потенциал спутниковых технологий для геологии [8].

Материалы и методы исследования

1. Геологические данные собраны по результатам проведенных в прошлом исследований [2, 3, 5]. В Калба-Нарымской зоне редкометалльные пегматиты обычно представлены альбит-кварцевыми разновидностями с участием слюд (мусковит/лепидолит) и турмалина. Редкие элементы (*Li*, *Ta*, *Nb*, *Sn*, *Be*, *Cs*) сосредоточены не в «массе» породы, а в отдельных минералах-носителях: сподумене, колумбите-танталите и микролите, касситерите, а также в фосфатах и бериллии. Наиболее продуктивные по редким металлам типы связаны со сподумен-содержащими и альбитизированными (альбит-мусковитовыми) пегматитами, где минерализация часто проявляется в виде гнезд, прожилков и мелких вкраплений рудных минералов. Выбраны эталонные месторождения для применения ДЗЗ и создания спектрального профиля по месторождениям.

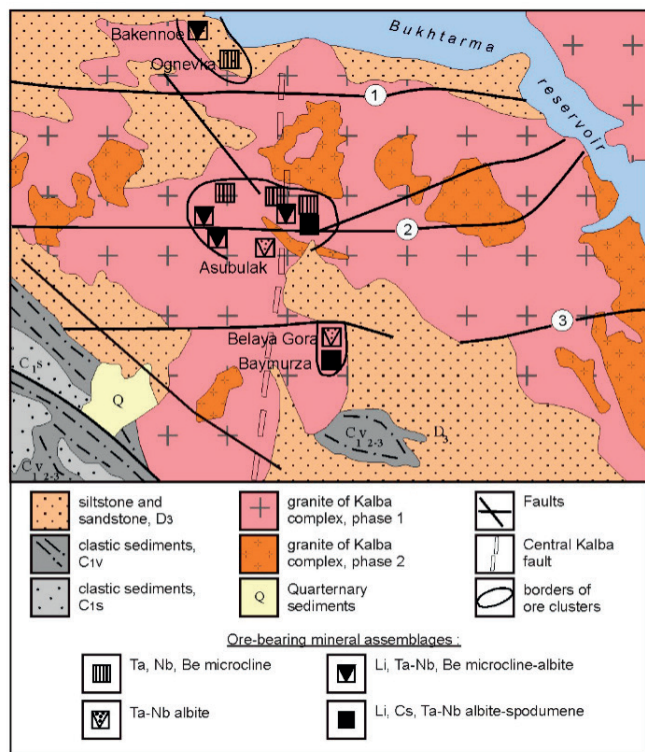


Рис. 1. Геологическая карта Центрально-Калбинского рудного района и расположение месторождений редкометалльных пегматитов [5].

Сурет 1. Орталық Қалба кенді ауданының геологиялық картасы және сирек металды пегматиттік кен орындарының орналасуы [5].

Figure 1. Geological map of the Central Kalba ore district and location of rare-metal pegmatite deposits [5].

2. Исследование основано на анализе данных ASTER, полученных 2 мая 2002 года (сцена AST_07_00405302002053830). Использованы VNIR (B01-B03N) и SWIR (B04-B09) каналы с пространственным разрешением 15 м и 30 м соответственно. Данные предварительно обработаны до уровня AST_07 (Surface Reflectance) с коррекцией атмосферных эффектов. Спутниковые снимки ASTER от 2002 года были выбраны для анализа из-за минимального облачного покрова, что является критическим фактором для мультиспектральных дистанционных

исследований, поскольку облачность значительно влияет на качество данных и точность спектрального анализа [9]. Применены стандартные спектральные соотношения каналов для выявления различных типов гидротермальных изменений. Эти соотношения каналов широко используются в геологических исследованиях и показали высокую эффективность для картирования минеральных ассоциаций [10].

Процесс обработки данных включает несколько этапов:

1. Сбор геологических данных. По результатам исследований [2, 3, 5, 6] собрана информация о минерализации эталонных месторождений редкометалльных пегматитов Юбилейный и Белая Гора Центрально-Калбинского рудного района. Калба-Нарымская зона характеризуется позднегерцинскими гранитоидами (295–285 млн лет) и пегматитами альбит-кварцевого типа с мусковитом/лепидолитом и турмалином. Редкие элементы (*Li, Ta, Nb, Sn, Be, Cs*) сосредоточены в минералах-носителях: сподумене, колумбите-танталите, микролите, касситерите [5, 6]. На основе этой минералогии выполнен подбор целевых минералов для спектральных соотношений каналов: **Al-OH** (мусковит, серицит), **Li-Al-OH** (пегматит/сподумен), **Fe-Mg-Al-OH** (турмалин), что соответствует грейзеновым и слюдястым изменениям в пегматитовых системах района.

2. Предварительная обработка. Удаление пикселей NoData (черные границы сцены), геометрическая коррекция и приведение к единой системе координат UTM Zone 44N (EPSG:32644), соответствующей центральной части Восточного Казахстана [1, 5]. Коррекция обеспечивает совмещение снимков с геологическими картами Центрально-Калбинского рудного района [5] и корректное наложение границ разломов (Гремячинско-Киинский, Асубулак, Первомайско-Белогорский) для анализа пространственной связи минерализации с тектоникой.

3. Удаление растительности. Расчет NDVI и применение маски ($NDVI < 0,3$) для исключения влияния растительного покрова [1, 7]. Спектральные сигнатуры растительности в VNIR и SWIR маскируют полосы поглощения OH-групп в целевых минералах (мусковит, сподумен, хлорит). Очистка данных от растительности позволяет выделить сигнатуру обнажений пегматитов и зон гидротермальных изменений, особенно в районах с развитой слюдястой и грейзеновой альтерацией [10].

Таблица 1

Стандартные соотношения каналов ASTER (часть содержащая силикаты)

Кесте 1

ASTER стандартты арналар қатынастары (құрамында силикаттар бар бөлік)

Table 1

ASTER standard Band Ratio (the part containing silicates)

Минерал	Спектральное соотношение каналов (CCK)	Целевой элемент	Источник
Серицит/мусковит/иллит	(5+7)/6	Fe-Mg-Al-OH	Rowan&Hewson
Мусковит усиленный	5/6	Al-OH	Hewson
Пегматит	7/6	Li-Al-OH	Hewson
Алтерация	4/5	Al-OH-переходы	Volsky

4. Расчет спектральных соотношений каналов (ССК). Применение стандартных формул Kalinowski и Oliver [10], основанных на соотношениях Rowan и Mars [7], для выявления гидротермальных изменений (таблица 1) с использованием QGIS. Рассчитаны соотношения: $(5+7)/6$ – **Fe-Mg-Al-OH** (турмалин ± сподумен); $5/6$ – **Al-OH** (мусковит, грейзены); $7/6$ – **Li-Al-OH** (ядро пегматитов со сподуменом/лепидолитом); $4/5$ – **Al-OH** переходы. Эти ССК согласованы с минералогией Калбинских пегматитов (кварц – альбит – мусковит ± турмалин) и нацелены на картографирование слюдисто-грейзеновых и альбитизированных зон, ассоциированных с редкометалльной минерализацией.

Результаты

Анализ спектральных соотношений каналов выявил выраженные пегматитовые зоны в исследуемом районе. Соотношение каналов показало высокие значения ($> 1,0$) в зонах, типичных для пегматитовых систем, таких как мусковит, сподумен, турмалин.

В ходе выполнения исследования выявлены три зоны с различными спектральными характеристиками (рис. 2). Во всех зонах выделяются сильные сигнатуры B07/B06 (средние значения от 1,359 до 1,456), что указывает на преобладание **OH** богатых пегматитовых систем. Зоны 1 и 2 характеризуются умеренными значениями B05/B06 и B04/B05, в то время как в Зоне 3 выделяются наиболее высокие значения по всем спектральным соотношениям каналов, что делает ее наиболее перспективной для дальнейшего изучения.

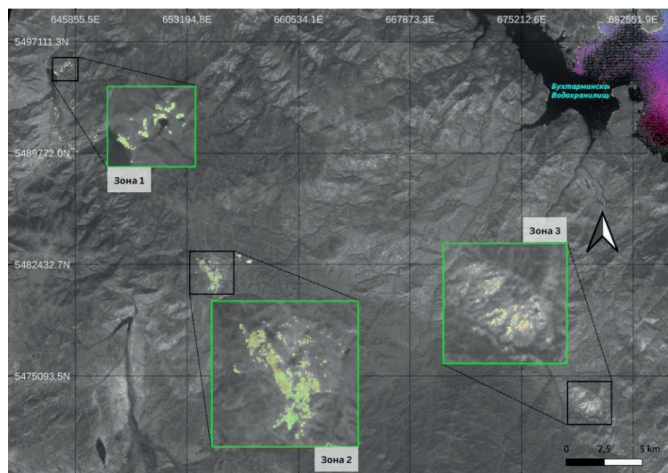


Рис. 2. Участки пегматитов, выявленные спектральным соотношением каналов.

Сурет 2. Спектрлік арналар қатынастарымен анықталған пегматиттердің учаскелері.

Figure 2. Zones of pegmatites identified by spectral Band Ratio.

Мусковит в пегматитах Юбилейного месторождения (Зона 1) (рис. 3) является типичным минералом слюдисто-грейзенового (**Al-OH**) изменения, которое нередко сопровождается формированием редкометалльной (**Li-Ta-Nb-Sn**) пегматитовой минерализации и поэтому может рассматриваться как косвенный индикатор ее проявлений. Месторождение Белая Гора (Зона 2) относится к такому

же типу месторождений, как Юбилейное и Асубулак, но в настоящее время законсервировано. При обработке спутниковых снимков проводится спектральный анализ для выявления мусковитизации в окрестностях Белой Горы, где ожидается высокая пространственная концентрация соответствующего отражения.

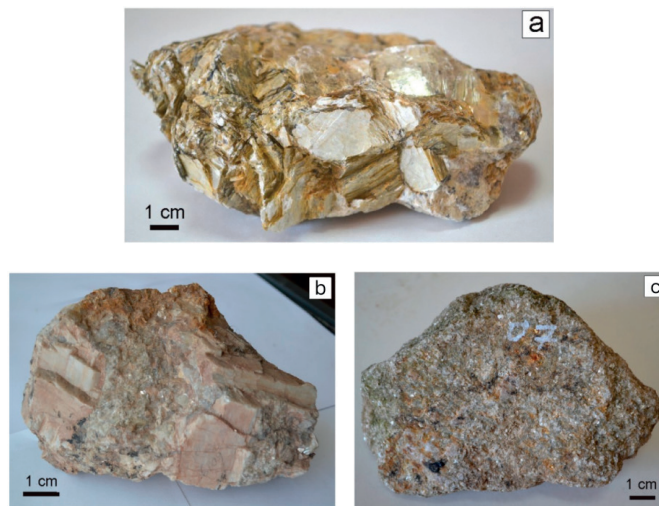


Рис. 3. Минералы из Асубулакского рудного поля: а) микроклин с мусковитом и кварцем; б) кварц-альбит-мусковит; в) кристаллы сподумена и кварц в слюде [5].

Сурет 3. Асубұлақ кенді ауданының минералдары:

а) микроклин мусковитпен және кварцпен бірге; б) кварц-альбит-мусковит; в) сподумен кристалдары және слюдадағы кварц [5].

Figure 3. Minerals from the Asubulak ore field:

а) microcline with muscovite and quartz; б) quartz-albite-muscovite; в) spodumene crystals and quartz in mica [5].

Анализ Зоны 1 (месторождение Юбилейное) показал повышенные значения B07/B06 (среднее = 1,359) при умеренных значениях B05/B06 (0,971) и B04/B05 (0,940), что указывает на развитие **OH**-содержащих изменений, прежде всего **Al-OH** (слюды/мусковитизация – серицитизация). Это согласуется с опубликованными данными о преобладании в пегматитах Юбилейного кварц-полевошпат-мусковитовых ассоциаций и локальной альбитизации/грейзенизации, характерных для пегматитовых систем района.

Зона 2 характеризуется высокими значениями B07/B06 (среднее = 1,465) при умеренных значениях B05/B06 (0,992) и B04/B05 (0,985), что отражает более контрастный **Al-OH**-отклик и/или более «чистую» экспозицию слюдистых изменений по сравнению с Зоной 1. С учетом минералогического разнообразия Калбинских пегматитов (кварц-альбит, мусковит ± турмалин и др.) такая картина может соответствовать участкам с более развитой слюдистой (грейзеновой) составляющей и требует проверки по геологическим данным и положению относительно известных пегматитовых тел.

Анализ Зоны 3 показал наиболее высокие значения по всем спектральным соотношениям каналов: B05/B06 (среднее = 1,052), B07/B06 (среднее = 1,456) и B04/B05 (среднее = 1,001), что свидетельствует о наиболее перспектив-

Таблица 2

Глобальная и зональная статистика ASTER

Кесте 2

ASTER жаһандық және аймақтық статистикасы

Table 2

ASTER Global and Zonal Statistics

Спектральный признак	ССК	Глобальный min-max	Зоны интереса	Среднее значение	Интерпретация
Мусковит усиленный	B05/B06	0,64–1,19	0,82–1,13	$1,02 \pm 0,03$	Филлическая альтерация, мусковитовые грейзеновые зоны
Tourmaline <i>Fe-Mg-Al-OH</i>	(B05 + B07)/ B06	0,79–1,90	1,07–1,71	$1,39 \pm 0,07$	Комплексы турмалина $\pm$ сподумена, <i>Fe-Mg-Al-OH</i>
Пегматит (<i>Li-Al-OH</i>)	B07/B06	0,00–1,50	0,83–1,06	$0,99 \pm 0,02$	Ядра литийсодержащих пегматитов (сподумен, лепидолит)

ном пегматитовом объекте с выраженными сигнатурами гидротермальных изменений. Результаты по третьей зоне не уступают известным месторождениям в отражательной способности на пегматит и мусковит (таблица 2).

Обсуждение

Гранитные поверхности и антропогенные материалы могут демонстрировать спектральные характеристики, схожие с гидротермальными изменениями, что требует осторожного подхода к интерпретации данных. Для минимизации таких ошибок необходимо углубленное знание геологической обстановки и объектов исследования [8].

В данном исследовании проведена гомогенизация пространственного разрешения VNIR (15 м) и SWIR (30 м) каналов до 30 м. Хотя геодезические задачи требуют максимально точного пространственного разрешения, для геологических исследований такое разрешение является адекватным, поскольку минеральные образования пегматита и мусковита занимают значительные площади, что позволяет эффективно выявлять необходимые отражательные характеристики даже при пониженном пространственном разрешении. Для пегматитовых минералов, которые наиболее эффективно различаются в SWIR диапазоне, выбранное разрешение 30 м обеспечивает достаточную детальность анализа.

Гиперспектральное картографирование позволит выявить тонкие спектральные различия и улучшить точность идентификации пегматитовых минералов. Исследования показывают, что гиперспектральные данные обеспечивают возможность прямого сравнения со спектральными библиотеками и более точного картирования изменений минералов [11].

Заключение

Использование стандартных соотношений каналов ASTER продемонстрировало высокую эффективность в определении перспективных зон пегматитовой минерализации

в Калба-Нарымской металлогенической зоне. Ключевые достижения:

1) Подтверждена эффективность стандартных соотношений каналов Kalinowski и Oliver (2004) для картирования гидротермальных изменений в пегматитовых системах на участках месторождений Юбилейный и Белая Гора Калба-Нарымского пояса.

2) Выявлена одна перспективная зона с высокими значениями соотношений каналов в отношении B06 ($> 1,0$), сравнимая с показателями по вышеуказанным месторождениям.

3) Установлена применимость стандартных соотношений каналов для пегматитовой минерализации при выявлении мусковитовых изменений.

4) Обоснована необходимость интеграции с гиперспектральными данными для повышения точности минералогической идентификации, как в пространственном, так и в спектральном разрешении.

Стандартные соотношения каналов могут быть рекомендованы для поиска пегматитовых месторождений в аналогичных геологических условиях и способствуют повышению эффективности геологоразведочных работ в регионе. Метод особенно эффективен для предварительной оценки больших территорий и оптимизации затрат на разведку. Полученные результаты подтверждают перспективность применения дистанционного зондирования для решения задач геологоразведки в условиях ограниченных финансовых ресурсов.

Благодарность

Исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках проекта «Жас Ғалым» грантового финансирования научных исследований МНВО по теме AP25795761 «Разработка комбинированного метода для прогнозирования золоторудных МПИ на основе спутниковых технологий, ГИС и ИИ глубокого обучения».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Abrams M., Hook S., Ramachandran B. Руководство пользователя ASTER. Версия 2. – Калифорния, 2002. – 135 с. (на английском языке)

2. D'yachkov B. A. и др. (10 июня 2022 г.). Геологическая история Большого Алтая: значение для изучения полезных ископаемых. *Minerals*. <https://doi.org/10.3390/min12060744> (на английском языке)
3. Oitseva T. A. и др. (15 июля 2025 г.). Редкометалльное оруденение (Li-Ta-Nb) и возраст кварцевого месторождения пегматитов (Восточный Казахстан). *Minerals*. <https://doi.org/10.3390/min15070737> (на английском языке)
4. Shen P. и др. (14 мая 2025 г.). Крупномасштабное пермско-юрское редкометалльное оруденение в Алтайском орогенном поясе: обзор. *Ore Geology Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2025.106669> (на английском языке)
5. Khrutukh S. V. и др. (16 ноября 2020 г.). Месторождения редкометалльных пегматитов в Калбинском районе Восточного Казахстана: возраст, состав и петрогенетические особенности. *Minerals*. <https://doi.org/10.3390/min10111017> (на английском языке)
6. Zimanovskaya N. A. и др. (22 ноября 2022 г.). Геология, минералогия и возраст литий-содержащих пегматитов: на примере месторождения Точка (Восточный Казахстан). *Minerals*. <https://doi.org/10.3390/min12121478> (на английском языке)
7. Rowan L. C., Mars J. C. Литологическое картографирование в районе Маунтин-Пасс, Калифорния, с использованием данных передового космического радиометра теплового излучения и отражения (ASTER) // *Remote Sensing of Environment*. – 2003. – № 84 (3). – С. 350–366 (на английском языке)
8. Библиотека спектральных данных ASTER, версия 2.0 / A. M. Baldridge [и др.] // *Remote Sensing of Environment*. – 2009. – № 113 (4). – С. 711–715 (на английском языке)
9. Topinka H., Tachikawa T. (26 ноября 2019 г.). Оценка облачного покрытия ASTER и анализ операций миссии с использованием продуктов Terra/MODIS Cloud Mask. *Remote Sensing*. <https://doi.org/10.3390/rs11232798> (на английском языке)
10. Kalinowski A., Oliver S. Руководство по обработке минерального индекса ASTER. – Австралия, 2004. – 36 с. (на английском языке)
11. Asadzadeh S. и др. (1 января 2024 г.). Картирование минеральных изменений в медно-золотом порфировом месторождении Шадан (Иран) с использованием данных аэрофотосъемки: последствия для разведочного бурения. *Economic Geology*. <https://doi.org/10.5382/econgeo.5009> (на английском языке)

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Abrams M., Hook S., Ramachandran B. ASTER пайдаланушы нұсқаулығы. 2-нұсқа. – Калифорния, 2002. – 135 б. (ағылшын тілінде)
2. D'yachkov B. A. және т.б. (10 маусым 2022 ж.). Үлкен Алтайдың геологиялық тарихы: пайдалы қазбаларды зерттеудің маңызы. *Minerals*. <https://doi.org/10.3390/min12060744> (ағылшын тілінде)
3. Oitseva T. A. және т.б. (15 шілде 2025 ж.). Сирек металды кендеу (Li-Ta-Nb) және пегматит кварц кен орнының жасы (Шығыс Қазақстан). *Minerals*. <https://doi.org/10.3390/min15070737> (ағылшын тілінде)
4. Shen P. және т. б. (14 мамыр 2025 ж.). Алтай орогендік белдеуіндегі кең ауқымды Пермь-Юра сирек металды кендеу: шолу. *Ore Geology Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2025.106669> (ағылшын тілінде)
5. Khrutukh S. V. және т.б. (16 қараша 2020 ж.). Шығыс Қазақстанның Қалба ауданындағы сирек металды пегматит кен орындары: жасы, құрамы және петрогенетикалық ерекшеліктері. *Minerals*. <https://doi.org/10.3390/min10111017> (ағылшын тілінде)
6. Zimanovskaya N. A. және т. б. (22 қараша 2022 ж.). Құрамында литий бар пегматиттердің геологиясы, минералогиясы және жасы: Точка кен орнының мысалында (Шығыс Қазақстан). *Minerals*. <https://doi.org/10.3390/min12121478> (ағылшын тілінде)
7. Rowan L. C., Mars J. C. Жылу сәулеленуі мен шағылысудың озық ғарыштық радиометрінің деректерін (ASTER) пайдаланумен Калифорния штатындағы Маунтин-Пас ауданындағы литологиялық картаға түсіру // *Remote Sensing of Environment*. – 2003. – № 84 (3). – Б. 350–366 (ағылшын тілінде)
8. ASTER спектрлік деректер кітапханасы, 2.0 нұсқасы / A. M. Baldridge [және т. б.] // *Remote Sensing of Environment*. – 2009. – № 113 (4). – Б. 711–715 (ағылшын тілінде)
9. Topinka H., Tachikawa T. (26 қараша 2019 ж.). ASTER бұлтты қамтуды бағалау және Terra/MODIS Cloud Mask өнімдерін қолданумен миссия операцияларын талдау. *Remote Sensing*. <https://doi.org/10.3390/rs11232798> (ағылшын тілінде)
10. Kalinowski A., Oliver S. ASTER минералды индексін өңдеу бойынша нұсқаулық. – Австралия, 2004. – 36 б. (ағылшын тілінде)
11. Asadzadeh S. және т. б. (1 қантар 2024 ж.). Аэрофототүсіріс деректерін пайдаланумен Шадан (Иран) мыс-алтын порфир кен орнындағы минералды өзгерістерді картаға түсіру: барлау бұрғылауының салдары. *Economic Geology*. <https://doi.org/10.5382/econgeo.5009> (ағылшын тілінде)

REFERENCES

1. Abrams M., Hook S., Ramachandran B. *ASTER User Handbook. Version 2.* – California, 2002. – 135 p. (in English)
2. D'yachkov B. A. et al. (10 June 2022). Geological history of the Great Altai: Implications for mineral exploration. *Minerals*. <https://doi.org/10.3390/min12060744> (in English)
3. Oitseva T. A. et al. (15 July 2025). Rare metal (Li–Ta–Nb) mineralization and age of the Kwartsevoye pegmatite deposit (Eastern Kazakhstan). *Minerals*. <https://doi.org/10.3390/min15070737> (in English)
4. Shen P. et al. (14 May 2025). Large-scale Permian–Jurassic rare-metal mineralization in the Altai Orogenic Belt: A review. *Ore Geology Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2025.106669> (in English)
5. Khromykh S. V. et al. (16 November 2020). Rare-metal pegmatite deposits of the Kalba region, Eastern Kazakhstan: Age, composition and petrogenetic implications. *Minerals*. <https://doi.org/10.3390/min10111017> (in English)
6. Zimanovskaya N. A. et al. (22 November 2022). Geology, mineralogy, and age of Li-bearing pegmatites: Case study of Tochka deposit (East Kazakhstan). *Minerals*. <https://doi.org/10.3390/min12111478> (in English)
7. Rowan L. C., Mars J. C. Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data // *Remote Sensing of Environment*. – 2003. – No. 84 (3). – P. 350–366 (in English)
8. The ASTER spectral library version 2.0 / A. M. Baldridge et al. // *Remote Sensing of Environment*. – 2009. – No. 113 (4). – P. 711–715 (in English)
9. Tonooka H., Tachikawa T. (26 November 2019). ASTER cloud coverage assessment and mission operations analysis using Terra/MODIS cloud mask products. *Remote Sensing*. <https://doi.org/10.3390/rs11232798> (in English)
10. Kalinowski A., Oliver S. *ASTER Mineral Index Processing Manual. Remote Sensing Applications.* – Australia, 2004. – 36 p. (in English)
11. Asadzadeh S. et al. (1 January 2024). Alteration mineral mapping of the Shadan porphyry Cu–Au deposit (Iran) using airborne imaging spectroscopic data: Implications for exploration drilling. *Economic Geology*. <https://doi.org/10.5382/econgeo.5009> (in English)

Сведения об авторах:

Ескалиев Е. Т., постдокторант по образовательной программе 8D07201 – Геология и разведка месторождений полезных ископаемых, Школа наук о Земле, ВКТУ им. Д. Серикбаева (г. Усть-Каменогорск, Казахстан), uyeskaliyev@edu.ektu.kz; <https://orcid.org/0000-0003-0899-601X>
Рахымбердина М. Е., доктор Ph.D, ассоциированный профессор, декан школы наук о Земле, ВКТУ им. Д. Серикбаева (г. Усть-Каменогорск, Казахстан), MRahymberdina@edu.ektu.kz; <https://orcid.org/0000-0002-2196-6512>

Вач К., доктор Ph.D, директор ООО «EuroGV» (г. Прага, Чешская Республика), профессор школы наук о Земле, ВКТУ им. Д. Серикбаева (г. Усть-Каменогорск, Казахстан), vach@eurogv.cz; <https://orcid.org/0009-0001-7575-9105>

Шульц Р., д. т. н., доктор Ph.D, ассоциированный профессор, научный сотрудник, заведующий лабораторией дистанционного зондирования и анализа, Междисциплинарный исследовательский центр авиации и космических исследований, Университет нефти и минералов им. короля Фахда (г. Дахран, Королевство Саудовская Аравия), roman.shults@kfupm.edu.sa; <https://orcid.org/0000-0003-2581-517X>

Авторлар туралы мәліметтер:

Ескалиев Е. Т., постдокторант, 8D07201 – Геология және пайдалы қазба кен орнын барлау білім беру бағдарламасы бойынша докторант, Жер туралы ғылымдар мектебі (Өскемен қ., Қазақстан)

Рахымбердина М. Е., Ph.D докторы, қауымдастырылған профессор, Жер туралы ғылымдар мектебінің деканы, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті (Өскемен қ., Қазақстан)

Вач К., Ph.D докторы, «EuroGV» ЖШС директоры (Прага қ., Чех Республикасы), Жер туралы ғылымдар мектебінің профессоры, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті (Өскемен қ., Қазақстан)

Шульц Р., т. ғ. д., Ph.D докторы, қауымдастырылған профессор, ғылыми қызметкер, қашықтықтан зондтау және талдау зертханасының меңгерушісі, авиация және ғарышты игеру пәнаралық ғылыми-зерттеу орталығы, Фахд Патша атындағы мұнай және пайдалы қазбалар университеті (Дахран қ., Сауд Аравия Патшалығы)

Information about the authors:

Yeskaliyev Ye. T., Postdoctoral fellow in the educational program 8D07201 – Geology and Exploration of Mineral Deposits at the School of Earth Sciences, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University (Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan)

Rakhymberdina M. Ye., Ph.D, Associate Professor, Dean of School of Earth Sciences, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University (Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan)

Vach K., Ph.D, EuroGV, spol. s r.o. (Praga, Czech Republic), Professor of School of Earth Sciences, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University (Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan)

Shults R., DSc, Ph.D, Associate Professor, Research Scientist, Head of the Remote Sensing and Analysis Lab, Interdisciplinary Research Center for Aviation and Space Exploration, King Fahd University of Petroleum and Minerals (Dhahran, Kingdom of Saudi Arabia)