

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ
КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Горно-металлургический институт имени О.А.Байконурова

УДК 528.854.2

На правах рукописи

Кожухметов Мағжан Серікжанұлы

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

На соискание академической степени магистра

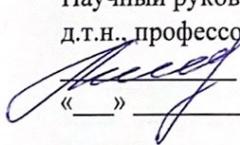
Название диссертации

Геодезическое обеспечение магниторазведки в
сложных горно-геологических условиях

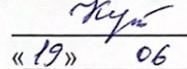
Направление подготовки

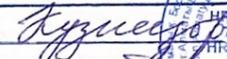
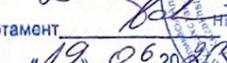
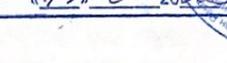
7М07306 – «Геопространственная цифровая
инженерия»

Научный руководитель
д.т.н., профессор

 Касымханова Х.М.
« » 2023 г.

Рецензент к.т.н. асоц. профессор

 Кузнецова И.А.
«19» 06 2023 г.

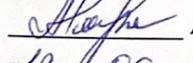
Подпись 
завещаю 
HR департамент 
«19» 06 2023 г.



ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

Нормоконтролер

доктор PhD, асоц. профессор

 Айтказинова Ш.К.
«19» 06 2023 г.

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ  зав. кафедрой "МДиГ"
наименование должности и должности  доктор PhD, асоц. профессор
наименование организации  Горно-металлургический институт
им. О.А. Байконурова  Орынбасарова Э.О.
«19» 06 2023 г.

Алматы 2023

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ
КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И. Сатпаева»

Горно-металлургический институт имени О.А. Байконурова

Маркшейдерское дело и геодезия

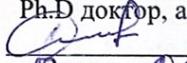
7М07306 – «Геопространственная цифровая инженерия»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

«Маркшейдерское дело и геодезия»

Ph.D доктор, ассоц. проф.

 Орынбасарова Э.О.

«19» 06 2023 ж.

ЗАДАНИЕ

на выполнение магистерской диссертации

Магистрант Кожаметов Магжан Серікжанұлы

Тема: «Геодезическое обеспечение магниторазведки в сложных горно-геологических условиях»

Утверждена приказом «02» ноябрь 2021 год №1779-М.

Срок сдачи законченной диссертации «19» июнь 2023 ж.

Исходные данные к магистерской диссертации: Снимки Landsat8, Sentinel2, технические отчеты инженерно-геодезических и геологических изысканий

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов:

а) Изучение существующих методов разведки полезных ископаемых методом ГИС;

б) Определение существующих проблем в современных методах;

в) Разработка нового метода для поиска железной руды;

Рекомендуемая основная литература:

1. Классификация запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых (приложение 1 к Инструкции о проведении геологоразведочных работ по стадиям

(твердые полезные ископаемые). Министерство энергетики и минеральных ресурсов РК, 2006
2. Van Buren I R., Turner G., and Hird G. - Modern seismic is illuminating the depths (DOI
https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1952_27_van_Buren)

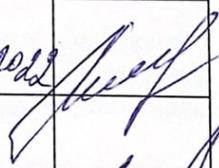
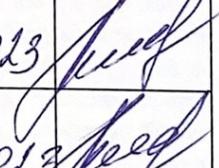
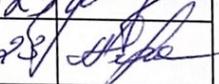
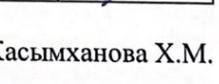
3. Лурье И. К. Геоинформационное картографирование. Методы геоинформатики и
цифровой обработки космических снимков: учебник. 2-е изд., испр. М.: КДУ, 2010.

ГРАФИК
подготовки магистерской диссертации

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Аналитический обзор существующих методов поиска железной руды	д.т.н., профессор Х.М. Касымханова	—
Определение взаимосвязей между индексами. Разработка модели для выполнения функции определения взаимосвязей	д.т.н., профессор Х.М. Касымханова	—
Разработка собственного метода по поиску железной руды методами ГИС	д.т.н., профессор Х.М. Касымханова	—

Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченную магистерскую диссертацию с указанием относящихся к ним разделов диссертации

Наименование разделов	Консультанты, Ф.И.О. (уч. степень, знание)	Дата подписания	Подпись
Аналитический обзор существующих методов поиска железной руды	д.т.н., профессор Х.М. Касымханова	20.10.2023	
Определение взаимосвязей между индексами. Разработка модели для выполнения функции определения взаимосвязей	д.т.н., профессор Х.М. Касымханова	20.01.2023	
Разработка собственного метода по поиску железной руды методами ГИС	д.т.н., профессор Х.М. Касымханова	20.04.2023	
Нормоконтролер	доктор PhD, ассоц. профессор Айтказинова Ш.К.	19.06.23	

Научный руководитель

Касымханова Х.М.

Задание принял к исполнению обучающийся

Қожахметов М.С.

Дата

«10» 11 2021 г

АННОТАЦИЯ

Технологии по сбору и анализу геопространственных данных развивается с каждым днем. Появляются новые методы, формулы по обработке данных. В свою очередь это поспособствовало расширению области применения спутниковых изображений, к примеру разведка полезных ископаемых.

Данная работа посвящена изучению существующего метода поиска железной руды методами ГИС, а также созданию собственного способа поиска и разведки. В ходе исследования были обнаружены ряд проблем связанные с неполноценностью, а также отсутствием пояснительной части в полученных результатах расчетов индекса железистых минералов. Исправление которых, позволило создать собственный метод по поиску железной руды на основе космоснимков. Актуальность данной работы заключается в изучении методов, которые в ближайшем будущем заменят или же дополнят существующие способы разведки.

В ходе исследования были обнаружены ряд проблем в методе предлагаемой источником ESRI. Речь идет об индексе железистых минералов (Ferrous Minerals Ratio). Данный индекс позволяет выделить все железосодержащие минералы на снимке. Звучит многообещающе. Однако, как и было замечено существует множество проблем, которые не позволяют использовать полученные

АНДАТПА

Геокеңістіктік деректерді жинау және талдау технологиялары күн сайын дамып келеді. Деректерді өңдеудің жаңа әдістері, формулалары пайда болып жатыр. Бұл өз кезегінде спутниктік кескіндерді қолдану аясын кеңейтуге ықпал етті, мысалы пайдалы қазбаларды барлау.

Бұл жұмыс темір рудасын ГАЗ әдістерімен іздеудің қолданыстағы әдісін зерттеуге, сондай-ақ іздеу мен барлаудың өзіндік әдісін жасауға арналған. Зерттеу барысында темір минералдар индексінің есептеулерінің нәтижелерінде деректердің жеткіліксіздігіне, сондай-ақ түсіндірме бөлігінің болмауына байланысты бірқатар проблемалар анықталды. Оларды түзету ғарыштық суреттер негізінде темір рудасын іздеудің өзіндік әдісін жасауға мүмкіндік берді. Бұл жұмыстың өзектілігі жақын арада барлаудың қолданыстағы әдістерін алмастыратын немесе толықтыратын әдістерді зерттеу болып табылады.

Зерттеу барысында ESRI ұсынған әдісте, темір минералдардың индексіне қатысты бірқатар мәселелер табылды (Ferrous Minerals Ratio). Бұл индекс суреттегі барлық темір бар минералдарды бөліп көрсетуге мүмкіндік береді. Бұл перспективалы болып көрінеді. Алайда, байқалғандай, алынған мәселелерді пайдалануға мүмкіндік бермейтін көптеген мәселелер бар

ANNOTATION

Technologies for the collection and analysis of geospatial data are developing every day. New methods and formulas for data processing are emerging. In turn, this contributed to the expansion of the field of application of satellite images, for example, mineral exploration.

This work is devoted to the study of the existing method of searching for iron ore by GIS methods, as well as the creation of its own method of search and exploration. During the study, a number of problems were found related to inferiority, as well as the lack of an explanatory part in the obtained results of calculations of the index of ferrous minerals. The correction of which allowed us to create our own method for searching for iron ore based on satellite images. The relevance of this work lies in the study of methods that in the near future will replace or supplement existing methods

of exploration.

During the study, a number of problems were found in the method proposed by the ESRI source. We are talking about the index of ferrous minerals (Ferrous Minerals Ratio). This index allows you to highlight all the iron-containing minerals in the image. Sounds promising. However, as noted, there are many problems that do not allow the use of the received

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
1 Объект исследования	9
1.1 Проведенные на местности полевые работы	10
1.2 Физико-географическое описание района исследования	15
2 Аналитический обзор существующих методов поиска железной руды	20
2.1 Результаты расчетов существующего метода FMR	43
2.2 Разведка местности способом определения индексов: MNDWI, NDVI, WRI, CMR, LST	46
3 Определение взаимосвязей между индексами	50
3.1 Разработка модели для выполнения функции определения взаимосвязей	50
3.2 Результаты в таблицах	51
3.3 Полученные результаты	52
3.4 Сравнительный анализ результатов проведенных расчетов на участках Чумекского и Кокбулакского месторождения	53
4 Выводы на основе анализа	57
4.1 Разработка собственного метода по поиску железной руды методами ГИС	58
Заключение	62
Список использованной литературы	64

ВВЕДЕНИЕ

Согласно данным интернет-источников, в сегодняшний день на мировом рынке начинается рост цен на основные металлы. Как известно, любая возникающая проблема сказывается на изменении способов или же появлению новых методов её решения. В данном случае речь идёт о технологиях разведки полезных ископаемых.

Множество организации сокращают объем бурения с получением керна материала, с целью перехода на более экономичные виды бурения. Таким образом популярность набирает геофизические методы исследования межскважинного пространства (магниторазведочные работы), с постоянным геодезическим сопровождением всех геофизических работ [8].

Достижения в области получения, обработки и анализа гиперспектральных снимков позволяют получить множество информации, полезной для разведки и разработки запасов полезных ископаемых. Кроме того, сочетание данных дистанционного зондирования и широкого спектра возможностей географических информационных технологий (ГИС) может обеспечить значительные преимущества для развития бизнеса организаций, занятых в этих областях экономической деятельности, таких как горнодобывающие и нефтегазовые компании. В данной статье представлен успешный опыт компании, которая предоставляет услуги и проводит тематические исследовательские проекты на основе многоточечных спутниковых снимков высокого разрешения и платформы ГИС ArcGIS [11].

Технологии дистанционного зондирования быстро развиваются, но не все спутники могут обеспечить качество снимков, необходимое для поиска месторождений меди, цинка, железа и других полезных ископаемых. Космические технологии постоянно развиваются и становятся все более распространенными, но до сих пор существует лишь несколько спутников, которые могут предоставить полезные для разведки изображения с точки зрения качества, разрешения и спектрального диапазона.

Появившееся новое направление – это, разведка полезных ископаемых методами ГИС на основе космоснимков. В качестве исходных данных можно использовать, как и бесплатные источники вроде снимков Landsat и Sentinel, так и платные, к примеру данные миссии World View. Последнее в свою очередь отличается своей точностью и тем, что используется целенаправленно в разведке полезных ископаемых [12].

Актуальность данной работы заключается в изучении методов, которые в ближайшем будущем заменят или же дополняют существующие способы разведки.

В ходе исследования были обнаружены ряд проблем в методе предлагаемой источником ESRI. Речь идет об индексе железистых минералов (Ferrous Minerals Ratio). Данный индекс позволяет выделить все

железосодержащие минералы на снимке. Звучит многообещающе. Однако, как и было замечено существует множество проблем, которые не позволяют использовать полученные данные расчетов в качестве достоверного источника информации.

Обнаруженные недостатки метода расчетов FMR:

- Отсутствие пояснительной записки к полученным результатам;
- Разность результатов одного и того же индекса на одной и той же местности по разным годам;
- Отсутствие пояснения к полученной шкале результатов;
- Отсутствие заключительных выводов.

В связи с чем, данный метод не является «рабочим» как таковой, иными словами не используется на практике. С целью решения выделенных проблем, был проведен комплекс процессов по обработке, анализу, сравнению данных. В результате чего, удалось не только исключить имеющиеся проблемы, но и построить собственный метод по разведке полезных ископаемых.

1 Объект исследования

Целью диссертационной работы является поиск железной руды на основе ГИС технологии. Объектом исследования был выбран Чумекское месторождение железной руды. Данный объект находится на Восточно-Казахстанской области, Курчумский район в горной местности. В рисунке 1 указан участок проводимых полевых и камеральных работ.



Рисунок 1 – Ситуационная схема

Согласно предварительным данным инвестиционного предложения источника «KAZAKH INVEST» 2018 года Чумекское месторождение отличается высоким качеством и соответствует строгим технологическим требованиям металлургических предприятий. Планируемый среднегодовой объем производства составляет около 5691 тыс. тонн. Инициатором выступает товарищество с ограниченной ответственностью «Lacus Mining». Планируемый рынок сбыта заводы по переработке черных металлов Китая и Республики Казахстан [4].

В связи с развитием мировой экономики растет спрос на сталь, что отражается на добыче железной руды. По прогнозам The Economist Intelligence Unit («EIU»), в ближайшем будущем производство стали вырастет на 4%.

В рисунке 3 указаны перспективы инвестирования в данной предприятии.

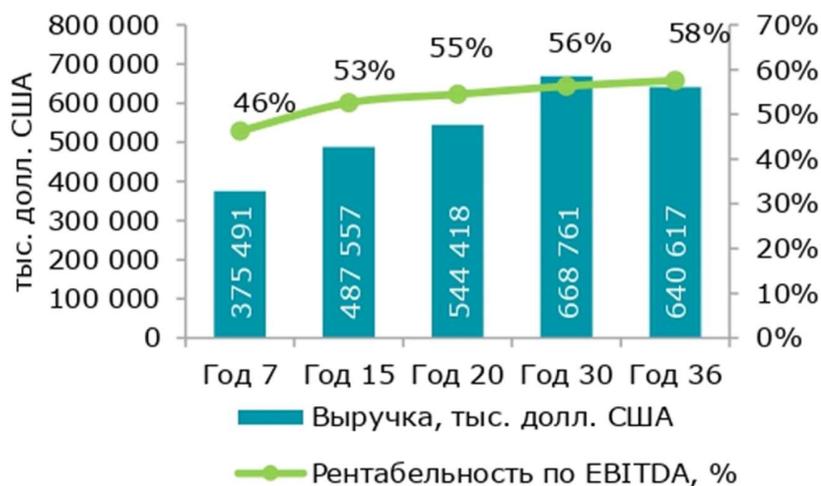


Рисунок 2 – Рентабельность проекта

Подсчет запасов площади:

- Мартитовые, магнетитовые руды:

руда – 179 млн тонн,
содержание железа – 62.5%;

- Вкрапленная минерализация руды:

руда – 317 млн тонн,
содержание железа – 62.5%

1.1 Проведенные на местности полевые работы

С начала 2022 года по весне 2023 года на будущей территории выработок железной руды производились разведочные работы полезных ископаемых. Выполнялись инженерно-геологические, геофизические и геодезические изыскания. Производились работы по бурению скважин и изъятию керна.

Также для полной картины местности и данных, производился процесс магниторазведки. Были определены аномалий магнитного поля земли с дальнейшим геологическим истолкованием [5].

Примечания:

1. Керн, это проба веществ, являющаяся цилиндрическим столбиком, отбираемый посредством бурения с целью дальнейших изучения.
2. В связи с секретностью и требованиями «заказчика» разглашать точные графические, текстовые и цифровые данные не имеется возможности.



Рисунок 3 – Пример керна, скважина с-180, Чумекское месторождение

Магнитная съемка проводилась в масштабе 1:10000 пешеходном варианте, с остановкой на каждой точке, высокоточными магнитометрами ММ-61 и МИНИМАГ с записью в память прибора цифровых значений магнитного поля, с последующей передачей их на компьютер [6]. В процессе работ велась цифровая запись вариаций магнитного поля Земли, для чего использовался прибор МИНИМАГ, работающий в режиме магнитовариационной станции, с последующим исключением их из рядовых измерений. Интервал регистрации значений суточных вариаций 5 – 10 секунд [2],[10].

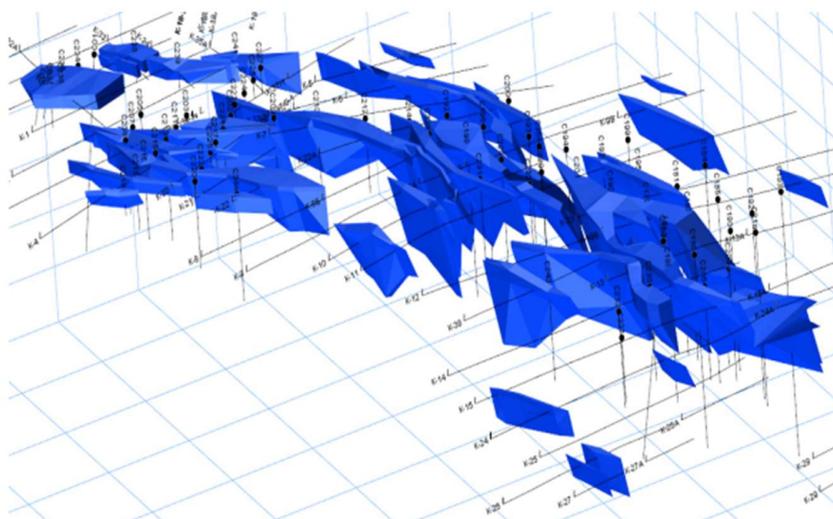


Рисунок 4 – Пример рудных тел, Чумекское месторождение

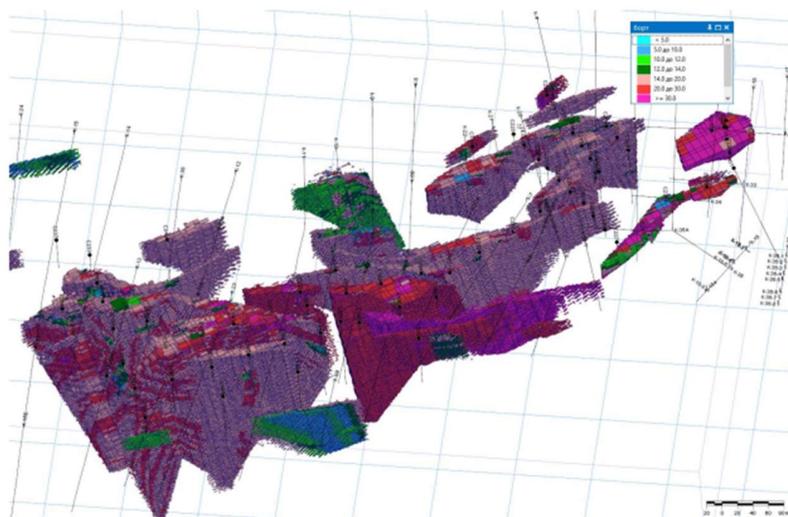


Рисунок 5 – Блочная модель с интерполированными содержаниями железа, Чумекское месторождение

В результате геофизической съемки выявлены магнитные аномалии различной степени интенсивности. Поисковыми маршрутами в эпицентрах магнитных аномалий на дневной поверхности выявлены элювиально-делювиальные дресвяно-щебнистые магнетитовые образования. Таким образом, получены основания для уверенного предположения, что магнитные аномалии отображают железорудное оруденение [1].

Состав инженерно-геодезических работ. Инженерно-геодезические работы состоят из трех этапов: подготовительного, полевого и камерального.

В период подготовительных работ были выполнены:

- ознакомление с техническим заданием и подготовительные работы по контрактной документации;
- сбор и анализ старых материалов инженерно-геодезических изысканий прошлых лет, включающие топографо-геодезические, картографические, аэрофотосъемочные и другие материалы и данные на районе проведения исследовательских работ;
- подготовка и утверждение программы инженерно-геодезических изысканий в соответствии с требованиями СН РК 1.02-02-2008 и технического задания заказчика.

В период проведения полевого этапа выполнены:

- работы по рекогносцировке, обследованию всей территории и комплекс полевых работ в составе инженерно-геодезических изысканий, также необходимый объем вычислительных и других работ по предварительной обработке полученных материалов и данных для обеспечения контроля их качества, полноты и точности [15].

В период камерального этапа выполнены:

- заключительный этап по обработке полевых измерений и данных с оценкой точности полученных результатов;
- составление и передача заказчику технического отчета с необходимыми приложениями по результатам выполненных инженерно-геодезических работ [13];

Исходным геодезическим обоснованием послужили пункты ГГС (Государственной Геодезической сети), представленные в виде пунктов - 1 - 4 классов и их высотные отметки из нивелирования 2-4 классов. Координаты пунктов ГГС представлены в системе координат 63 года и Балтийской системе высот. На основе имеющихся данных топографо-геодезических, аэрофотокосмических, а также картографических обеспеченности объекта установлен и обоснован порядок их использования.

Для производства съемочных работ были использованы комбинированные методики измерения. В состав съемочного оборудования входит, многочастотная спутниковая геодезическая аппаратура Leica Viva GPS и электронные тахеометры фирмы Leica [14].

Многочастотная спутниковая геодезическая система Leica Viva GPS позволяет выполнять геодезические работы в режиме реального времени RTK с точностью $10\text{мм} + 1\text{ppm}$ в плане. Спутниковый GPS комплекс, включает в себя одну базовую станцию и один передвижной прибор. При оптимальных условиях, радиус действия инструмента в режиме RTK составляет до 50км с GSM модемом. При выполнении данной работы максимальное удаление от базовой станции составило 7 км. Измерения точек в режиме Real-Time Kinematic были выполнены при следующих настройках параметров GPS-приборов:

- количество видимых спутников не менее 6
- показатель оценки точности при регистрации данных (PDOP),
- не более 6
- высота спутников над горизонтом (mask) 13 градусов
- время регистрации отсчета 1 сек.
- количество измерений на одной точке не менее 5
- как указано выше, точность определения координат точек составила

$10\text{мм} \pm 1\text{ ppm}$ (мм) для плановых координат и $20\text{мм} \pm 1\text{ ppm}$ (мм) для высотных отметок на 1 км базовой линии (удаления от базовой станции). Максимальное удаление от базовой станции измеренных точек составляет 12 км. Таким образом, максимальная ошибка определения плановых координат точки составила $\pm 2.2\text{ см}$, по высоте – $\pm 3.2\text{ см}$.

Тахеометрический комплекс представлен электронными тахеометрами ТС 1202 и TS06. Средняя квадратическая погрешность измерения одним приемом составляет:

- горизонтального угла 5",

- вертикального угла 7",
- наклонного расстояния $(5+3 \times 10^{-6} \times D)$ мм.
- расстояние между станциями максимально составляло 250м.

Вначале и по окончании съемочных работ производились контрольные измерения на пунктах триангуляции и твердых закрепленных точках с известными координатами и отметками. Камеральная обработка. Вычисления и уравнивание координат и высот точек геодезического хода производились с оценкой точности 1разряда полигонометрии, т.е. относительная ошибка в ходах не грубее 1: 25000. Вычисления и уравнивание координат и высот точек геодезического хода произведено в программной среде Credo DAT. Предельная абсолютная ошибка не грубее 0,014м с расчетом введения поправок в линию не более 0,005 м на 500 м дистанции. Угловая невязка оценивалась на допустимость в параметрах не грубее, где n – количество углов. Высотные невязки в ходах и полигонах оценивались на допустимость по формуле, хотя требуемая точность технического нивелирования.

Опорная геодезическая сеть (таблица 1). Геодезической основой для развития планово-высотного геодезического обоснования стали пункты государственной геодезической сети. Точность определения планово-высотного положения, плотность и условия закрепления пунктов геодезической основы отвечала требованиям к производству работ. В соответствии с рисунком 6 Всего было задействовано 5 пунктов ГГС Таскайнат, Кокбука Нов., Кызыл-Ащи, Шиш и Ашалы. Согласно техническому заданию выполнены следующие топографо-геодезические работы:

- Рекогносцировочное обследование местности – 1050 Га
- Отыскание пунктов триангуляции и полигонометрии – 5ед.
- Производство измерений по созданию опорного планово-высотного геодезического обоснования – 5
- Топографическая съемка – 1050 Га
- Камеральная обработка – 1050 ГА

Таблица 1 – Координаты исходных пунктов триангуляции

Название	Система координат 63 года, Район Е зона 4		
	X	Y	H
Таскайнат	5392253,29	4199419,02	2548,5
Кокбука Нов.	5372708,50	4206421,21	1873,3
Кызыл-Ащи	5367547,84	4196454,62	1735,4
Шиш	5353941,82	4201630,19	1001,4
Ашалы	5354102,92	4209727,33	987,0



Рисунок 6 – Расположение пунктов ГГС и ситуационная схема

1.2 Физико-географическое описание района исследования

Курчумский район (каз. Куршім ауданы - район расположен на Восточно-Казахстанской области в Республике Казахстана.

Район граничит на севере с Катон-Карагайским, на западе - с Кокпектинским, на югозападе - с Тарбагатайским, на юге - с Зайсанским районами Восточно-Казахстанской области, на востоке - с Синьцзян Уйгурским автономным районом Китая.

Климат резко континентальный. Среднее температура составляет:

в месяце январь – 14...18 °С,

в месяце июль – 17...22 °С.

Среднегодовое количество атмосферных осадков равен:

на равнинных районах – 200400 мм,

в горах районах – 500700 мм.

Рельеф данного района в основном горный, за исключением югозападной равнинной части, которая находится в Зайсанской котловине. На восточной части района располагаются горные хребты Алтая Курчумский (наивысшая точка горой Аксубас высотой в 3 305 м), Азутау и Сарымсакты, на северозападе - Нарымский хребет.

Почвы района горнокаштановые и горночернозёмные. Речная сеть представлена реками бассейна Иртыша. Река Курчум впадает в Бухтарминское

водохранилище. Вдоль южной границы района протекает Чёрный Иртыш с правыми притоками Аккоба, Арасанкоба, Верхний Теректи, Средний Теректи, Нижний Теректи, Калжыр. С запада район омывается Бухтарминским водохранилищем на Иртыше. На югозападе примыкает к озеру Зайсан. На востоке района в Маркакольской впадине, окружённой горами Курчумского хребта и хребта Азутау, расположено горное озеро Маркаколь (высота поверхности озера - 1 447 м над уровнем моря). В западной и южной частях района имеется множество мелких бессточных солёных озёр, таких как Кемирколь. Большую часть озера Маркаколь и окрестности занимает Маркакольский заповедник. Флора заповедника включает более 700 видов высших растений, 10 из которых занесены в Красную книгу Казахстана. Представлены 55 видов млекопитающих, среди которых выделяется снежный барс, занесённый в Красную книгу Казахстана. В начале XX века отмечен красный волк. Встречаются 250 видов птиц. Обитают 4 вида рыб, эндемичных на подвидовом уровне.

Также стоит сделать примечание, что все расчеты проводились, как и на Чумекском месторождении, но и параллельно были продублированы на Кокбулакское месторождение железной руды. С целью определения закономерностей, различий и сходств получаемых результатов на совершенно на двух участках, которые совершенно различаются по физикогеографическому описанию и природным особенностям.

Данные о Кокбулакском месторождении:

Название проекта Разработка Кокбулакского железорудного месторождения и строительство обогатительного комбината по производству железорудного концентрата

- Инвестиции – 418968 тысяч долларов США
- Планируемый объем по добыче железной руды в год – 8 миллионов тонн
- Конечный продукт – сталь, с содержанием железа не менее 60%
- Период реализации объекта – 24 года



Рисунок 7 – Рентабельность



Рисунок 8 – Кокбулакское месторождение железной руды

Данное железорудное месторождение располагается в 60 км на восток - юговосток от поселка Бегимбет. На рисунках 8 и 9 изображен карьер, находящееся на месторождении [3].

В геологическом плане месторождение приурочено к отложениям среднего олигоцена, представлено различными песками, алевритами и глинами, среди которых залегают железные руды оолитового, реже конгломератооолитового сложения. Общая протяженность месторождения 34 км с юга - юговостока к северу - северозападу при ширине 1,52,5 км. Рудные тела представлены 5 крупными линзами, мощности рудных линз изменяются от 6 до 17 м. Основными разновидностями руд на месторождении являются руды оолитовые окисленные бурые, сыпучие руды без цемента, руды зеленые или темносерые с сидеритхлоритовым цементом. Визуально железные руды хорошо отличаются от вмещающих пород.

Горнотехнические условия на местности месторождения железных руд отнесено к простым. Мощности покрывающих рыхлых пород (вскрыши) незначительные, залегания железных руд близгоризонтальное, глубина залегания основных запасов руд незначительная - до 50 м, продуктивный слой представляет собой пластообразную залежь площадью десятки км², обводненность пород месторождения слабая. Относительно ровный, благоприятный рельеф, неглубокое залегание рудных тел Кокбулакского месторождения предопределяет его разработку открытым способом, поэтапно, без применения буровзрывных работ.

Начиная со дня открытия и до сегодняшнего дня минералогопетрографические особенности и обогатимость руд месторождения изучались не однократно. По заключениям изыскательских и исследовательских

работ, было установлено, что основными рудными минералами являются

- гидрогетит,
- сидерит,
- шамозит, соответственно три типа руды: гидрогетитовые (железо - 38,87%), гидрогетитсидеритовые и сидеритовые (железо по 31,75%).



Рисунок 9 – Топографическая карта масштаба 1:1000000, Кокбулакское месторождение железной руды

Были получены положительные результаты при обогащении гидрогетитовой руды методом магнитной сепарации в сильном магнитном поле и обжиге магнитного обогащения (содержание железа - 45,23% при извлечении 92,5%). Сухое магнитное и обжиговое магнитное обогащение гидрогетитсидеритшамозитовых и сидеритовых руд дало следующие показатели содержания железа - 35,49% при извлечении 95,5%. При обжиге магнитного обогащения с мокрой магнитной сепарацией для этих типов руд были получены более высокие значения содержания железа - 53,4% при извлечении 96,43% и 51,11% железа при извлечении 91,5% соответственно. Исследования показали, что оба типа руды (гидрогетит и гидрогетитсидеритшамозит) могут быть обогащены вместе. Особенностью получаемых концентратов является повышенное содержание фосфора на 0,51% - 0,72%, однако возможно снизить содержание фосфора в концентратах комбинированными способами (обжиг и кислотная или щелочная обработка обожженного продукта) для получения жмыха с содержанием фосфора 0,15 - 0,21%. Запасы железных руд месторождения рассчитаны на валовой основе и по 3 типам руд категорий В, С1 и С2 в разрезе площадей месторождений "Центральное", "Северное" и "Южное". В общей сложности балансовые запасы месторождения составляют 974 миллиона тонн. Возможности для увеличения объемов добычи руды значительны и, с учетом забалансовых запасов, превышают 2,1 миллиарда тонн [7].

2 Аналитический обзор существующих методов поиска железной руды

Основной целью диссертационной работы является поиск железной руды методами ГИС на Чумекском месторождении. Достижение поставленной цели требует изучения множества индексов, методов, существующих проблем и систематизирования всех полученных данных [9]. Общий план действия выглядит следующим образом:

Изучение существующих методов поиска железной руды методами ГИС. В данном этапе производились расчеты индексов: железистые минералы, оксид железа, железистые силикаты.

Подсчет индексов определяющие железо на местности по разным годам. Был произведен подсчет одних и тех же индексов на определенной местности (Чумекское месторождение железной руды) в разные отрезки времени с целью определения возможных сходств или же различий;

Определение взаимосвязи между индексами железа и температуры поверхности земли. Были произведены попытки связать результаты подсчетов индексов с температурой поверхности земли, так как визуально были замечены закономерности распределения железной руды в зависимости от высоты от уровня моря в горной местности;

Далее были определены индексы MNDWI, NDVI, WRI, CMR, LST. Данные индексы подсчитаны с целью получения характеризующих данных местности;

Проведение переклассификации индекса железной руды и определение взаимосвязей между индексами и каждым классом железа;

Составление выводов и пояснительной записки для индекса Ferrous Minerals Ratio;

Разработка собственного метода разведки железной руды.

Примечание Индексы изображений – это, изображения, полученные в результате вычисления с использованием многоканальных изображений. Таким образом можно выявить необходимый, нас интересующий феномен, при этом смягчая другие факторы, которые ухудшают эти эффекты в изображении.

Этап «Изучение существующих методов поиска железной руды»

Существуют следующие индексы, позволяющие определять местоположение железной руды на космоснимках:

- Индекс железистых минералов;
- Коэффициент оксида железа;
- Индекс железистых силикатов.

Каждый из методов отличается формулой и конечными результатами. На данном этапе планируется определить разницу между способами и выбрать 1 метод для дальнейшего исследования.

В качестве исходных данных использовались снимки Landsat 8. Были скачаны спутниковые снимки, на районе производимых работ на месяц сентябрь 2021 года, пример снимка показан на рисунке 10.

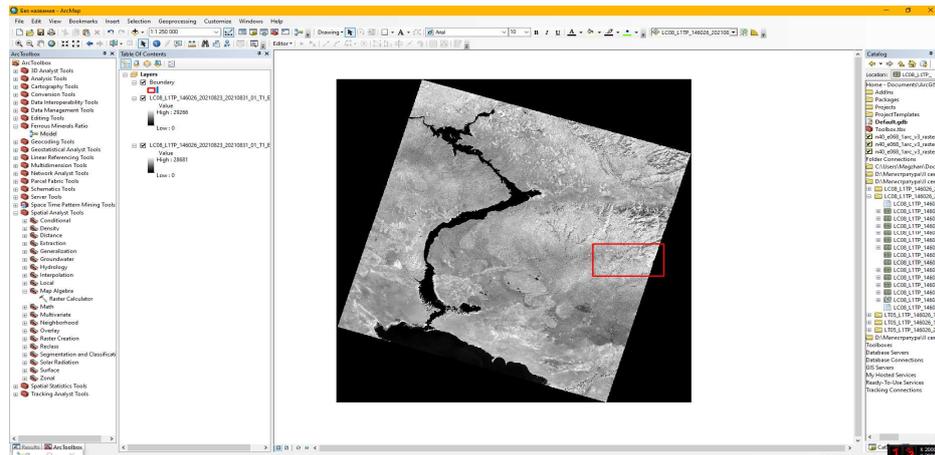


Рисунок 10 – Снимок Landsat 8

Индекс железистых минералов.

Данный коэффициент позволяет выделять все железосодержащие материалы. В формуле используется соотношение между каналами SWIR и NIR. Ferrous Minerals Ratio (коэффициент железистых минералов):

$$FMR = SWIR / NIR \quad (1)$$

где SWIR значения пикселей из коротковолнового инфракрасного канала, NIR значения пикселей из ближнего инфракрасного канала.

Коэффициент оксида железа.

Данный индекс представляет собой, соотношение красной и синей длин волн. Определяется с помощью обнаружения наличия биотитов простираения лимонита и изменения окислов озерных руд. Что приводится поглощением в синем и отражению в красном каналах. Таким образом это позволяет выделить по ярче области с сильным изменением уровня железа.

Iron Oxide Ratio (коэффициент оксидов железа):

$$IOR = Red / Blue \quad (2)$$

где Red - значения пикселей из красного канала, Blue - значения пикселей из синего канала.

Была построена следующая модель, которая в конечном счете находит предполагаемое местоположение железной руды в диапазоне 0.9 – 1.4. Данная модель была использована во всех снимках, и является в своем роде каркасом.

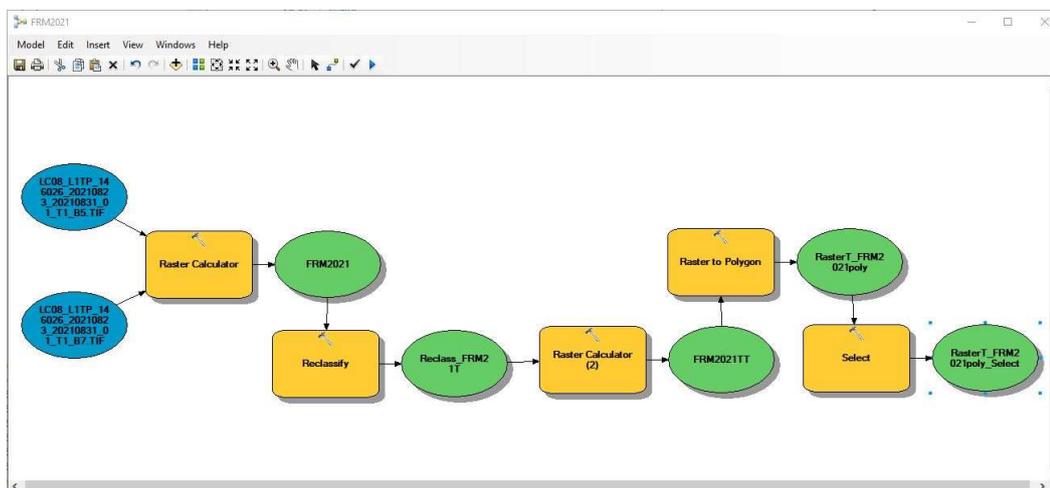


Рисунок 11 – Геомодель, предназначенная для подсчета индексов FMR и IRO, также для выделения нужного диапазона

Были применены инструменты:

Raster Calculator. Инструмент из набора «Spatial analyst», который используется для создания и выполнения выражения алгебра карт, производящий вывод растра.

Reclassify. Инструмент из набора «Spatial Analyst», предназначенный для переклассификации или же для, изменении значения входного растра.

Результаты подсчета индексов железа:

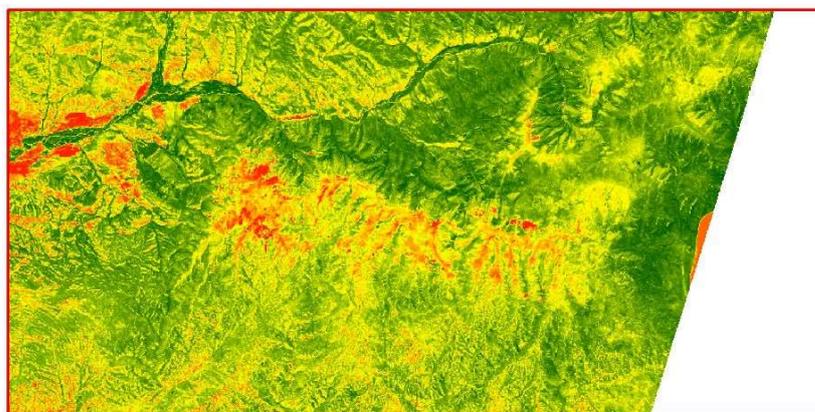


Рисунок 12 – Ferrous Minerals Ratio

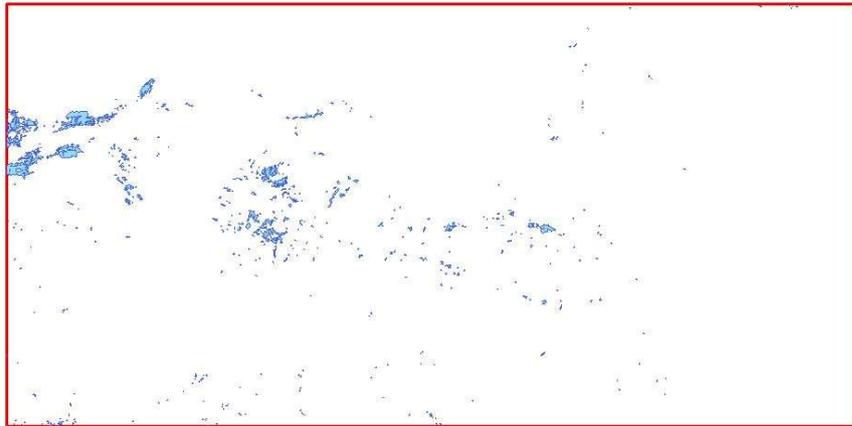


Рисунок 13 – Ferrous Minerals Ratio в диапазоне 0.9-1.4

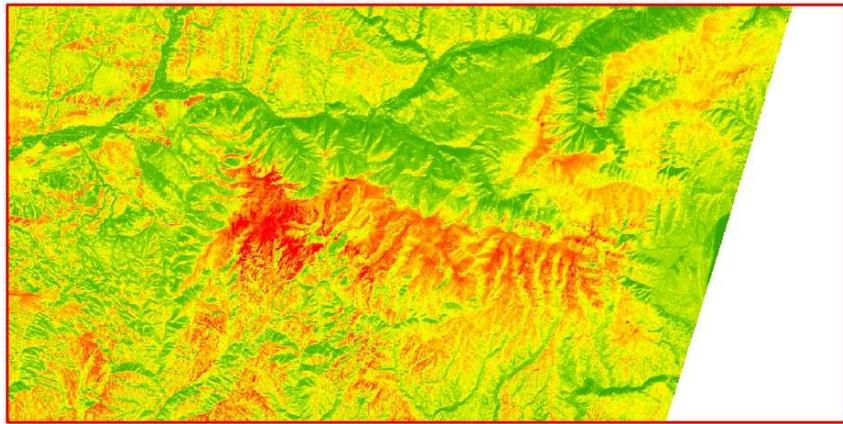


Рисунок 14 – Iron Oxide Ratio

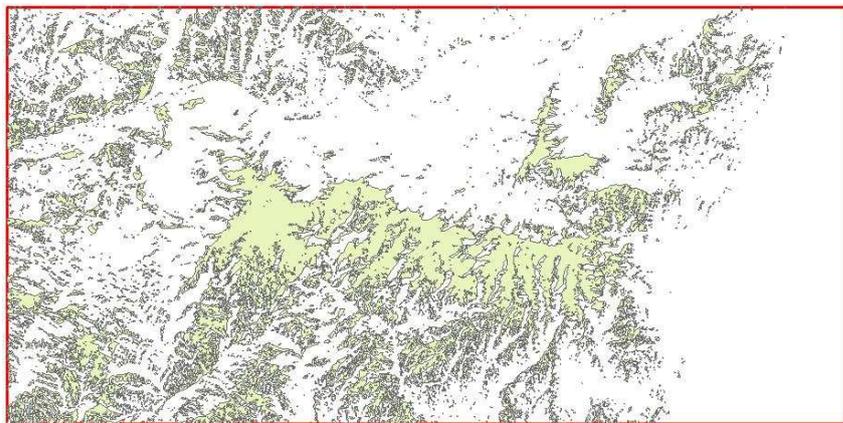


Рисунок 15 – Iron Oxide Ratio в диапазоне 0.9-1.4

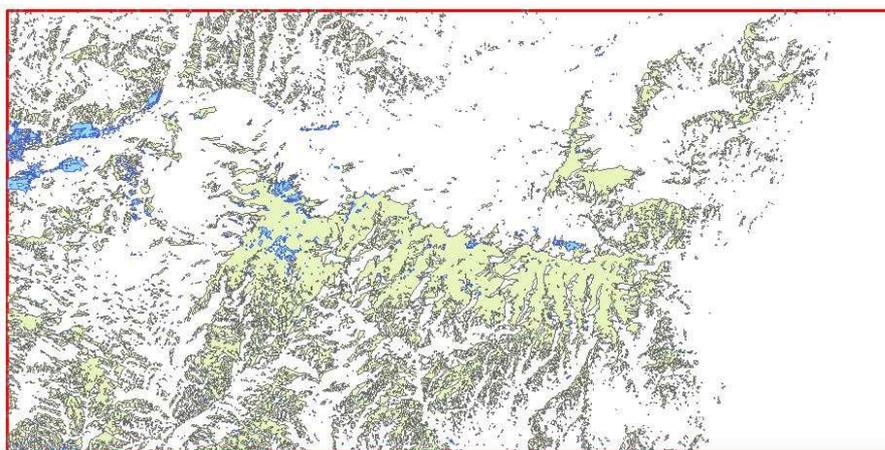


Рисунок 16 – Разница между индексами FMR и IRO

Сравнив результаты, показанные на рисунке 16, полученных данных, а точнее индексы Ferrous Minerals Ratio и Iron Oxide Ratio, мы можем наблюдать весомую разницу по площади одного и того же диапазона. Это говорит о том, что есть разница применения двух индексов железа. В связи существенного расхождения, для дальнейших исследований было решено использовать индекс FMR. Одновременное использование двух индексов потребовало бы сравнения с полевыми измерениями, с целью выявления более достоверных результатов. Но весьма большой объем площади результатов индекса IOR вызывает сомнения в точности данных. Так как по данным инженерногеологических и геофизических изыскательских работ на данной местности не обнаружено столь большое количество железной руды.

После вышеуказанных сравнений, был сделан вывод, что существует разница между различными индексами на одной и той же местности на основе одних и тех же исходных данных. В связи с чем появляется логичное предположение что существует различие между одними и теми же индексами на одной и той же территории на основе разных исходных данных (различные космоснимки).

Целью дальнейших расчетов является изучение сходств и различии между индексами касательно железа, а также сравнение полученных результатов от разных источников исходных данных.

Были произведены расчеты следующих индексов:

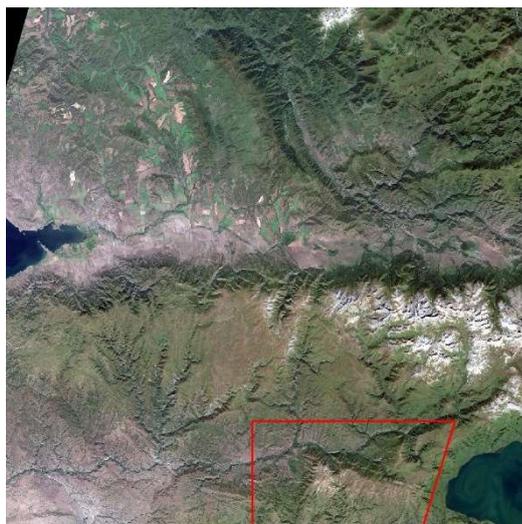
1. Индекс железистых минералов;
2. Индекс оксида железа;
3. Индекс Железистых силикатов.

В качестве исходных данных использовался снимок Landsat 8 (LC08_L1TP_146026_20210823_20210831_01_T1) и Sentinel 2

(S2A_MSIL1C_20210824T051651_N0301_R062_T45UUQ_20210824T071512.SAFE). Расчеты проводились в программном обеспечении ArcGIS.



а)



б)

Рисунок 17 – а) Снимок Landsat 8, б) Sentinel 2

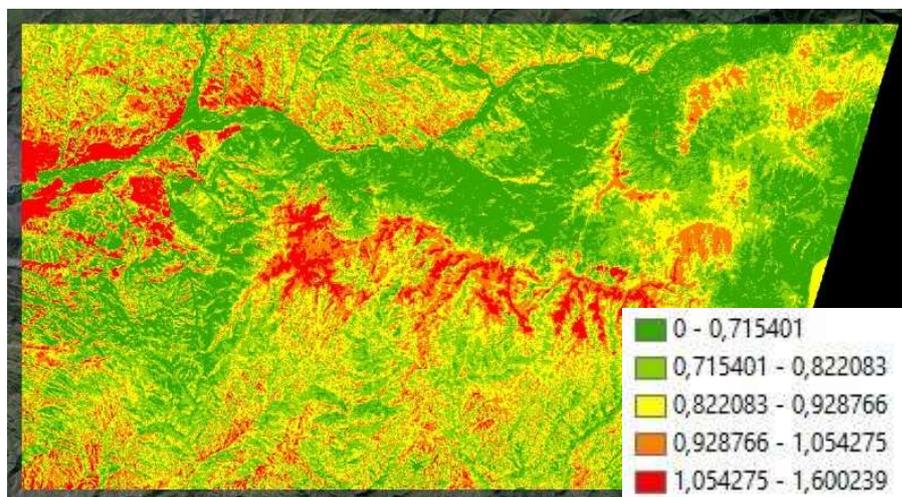
Железистые силикаты. Данный индекс представляет собой неорганическое соединение, соли железа и кремнёвой кислоты. Встречаются в виде коричневых кристаллов, и имеет свойство не растворяться в воде.

Определяется с помощью следующей формулы:

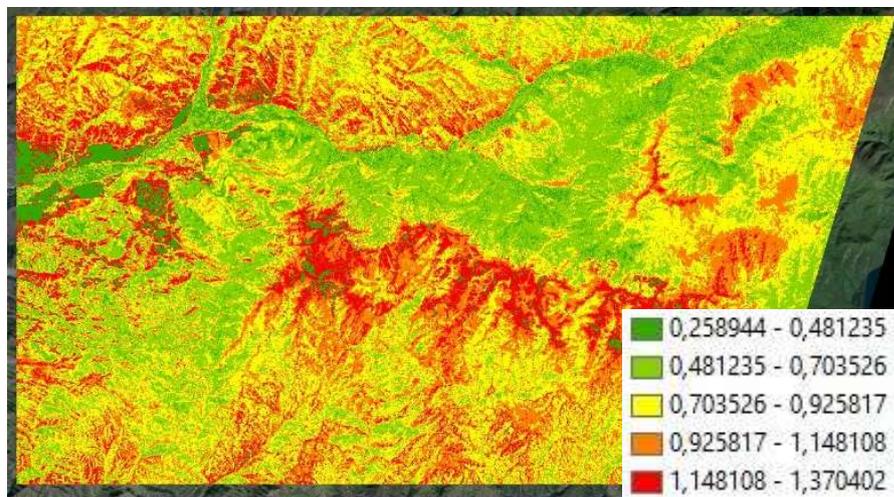
$$\text{SWIR2} / \text{SWIR1} \quad (3)$$

где SWIR1 - значения пикселей из коротковолнового инфракрасного канала (1,5661,651), Band 6, SWIR2 - значения пикселей из коротковолнового инфракрасного канала (2,107 – 2,294), Band 7.

Результаты сравнения значения вышеуказанных индексов:

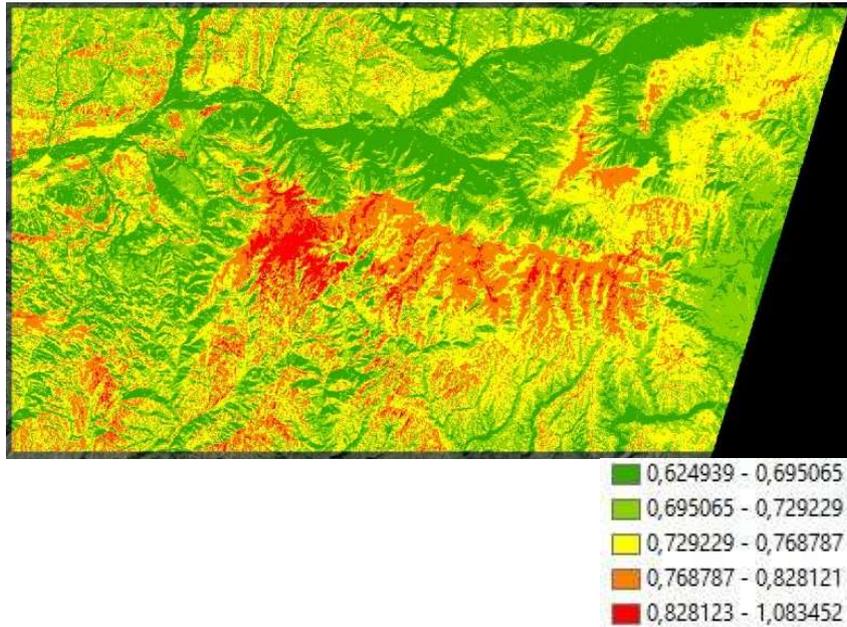


а)

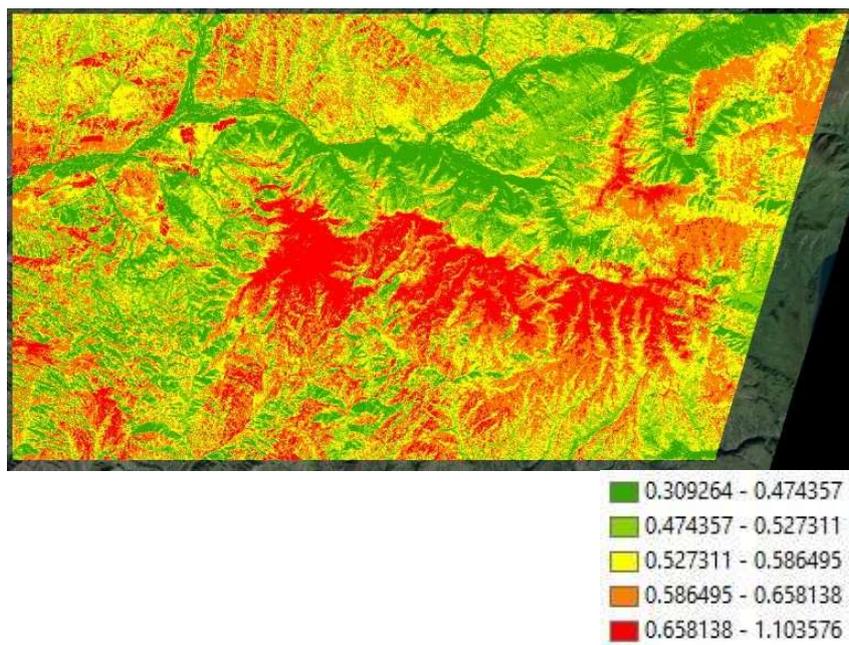


б)

Рисунок 18 – Коэффициент железистых минералов, а) Снимок Landsat 8, б) Снимок Sentinel

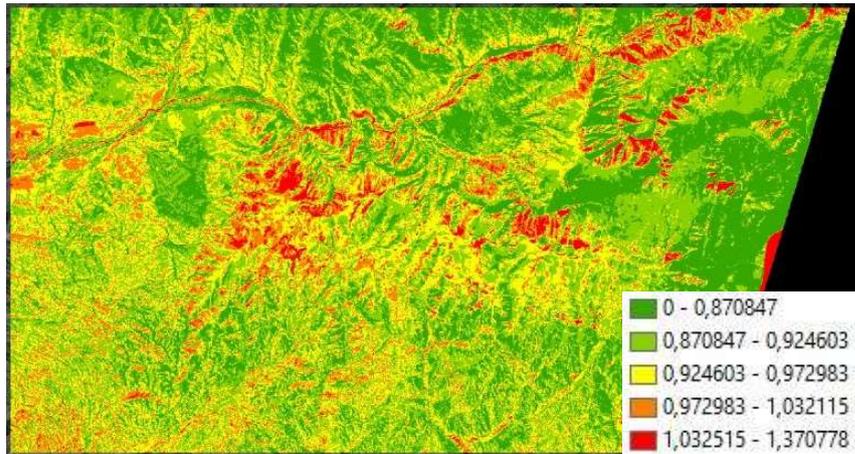


а)

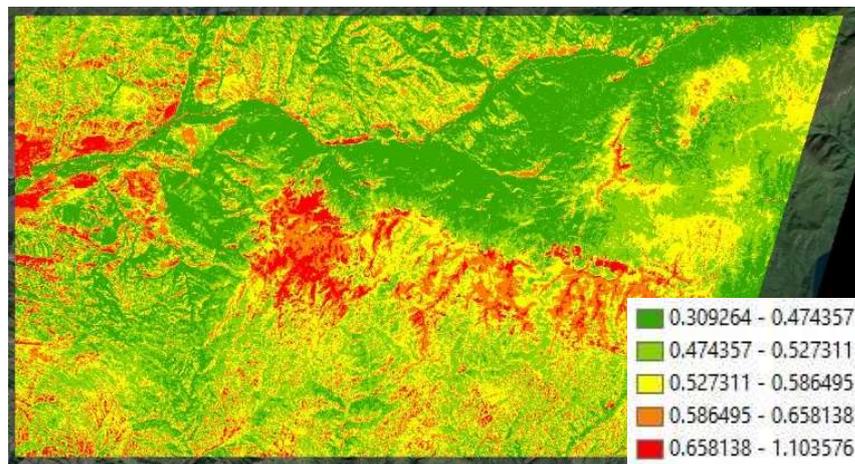


б)

Рисунок 19 – Коэффициент оксида железа: а) Снимок Landsat 8, б) Снимок Sentinel 2



а)



б)

Рисунок 20 – Коэффициент железистых силикатов: а) Снимок Landsat 8, б) Снимок Sentinel 2

Делая сравнительный анализ полученных результатов, можно прийти к следующим выводам:

1. Индексы железистых минералов и оксида железа весьма схожи по расположению на местности и по диапазону цветовой шкалы.

2. Коэффициент железистых силикатов имеет расхождение от первых двух индексов по всем пунктам: по плановому расположению, а также цветовой шкале.

3. Результаты расчетов индексов FMR и IOR на снимках Landsat и Sentinel практически идентичны, за исключением одного момента. Индекс FMR имеет различие на двух снимках в красной и зеленой диапазонах (соответственно пятый

и первый класс). Зоны, которые относятся к пятому классу на снимке Landsat, имеют значения первого класса на снимке Sentinel, то есть абсолютно противоположные значения.

4. Расчеты индекса железистых силикатов показали, что результаты на двух снимках имеют большое расхождение красных зон. То есть наиболее концентрированные участки железистых силикатов находятся в разных частях исследуемой территории. На снимке Landsat8 видно, что на северо-восточной части сосредоточены высокий концентрат железистых силикатов (5 класс – красный цвет), а на снимках Sentinel2 результаты на северо-восточной части совершенно противоположны, большую часть занимает низкий концентрат железа (1 класс – зеленый цвет). Так же при сопоставлении результатов расчетов индексов и космоснимка, было заметно что, результаты в некоторых участках соответствуют заснеженным вершинам. Если на результаты повлияли особенности местности, такие как снежные вершины, то есть необходимость в подтверждении данной территории. Далее необходимо произвести расчеты по определению температуры поверхности земли. Для этого был использован индекс Land Surface Temperature (Рисунок 21).

Land Surface Temperature – индекс определяющий радиационную температуру, которая рассчитывается с использованием уровня яркости верхнего слоя атмосферы. Определяется по следующей формуле:

$$LST=(BT/1)+W*(BT/14380)*B(E) \quad (4)$$

где BT – Верхняя яркостная температура атмосферы, W – длина волны излучения, E – Коэффициент излучения земной поверхности.

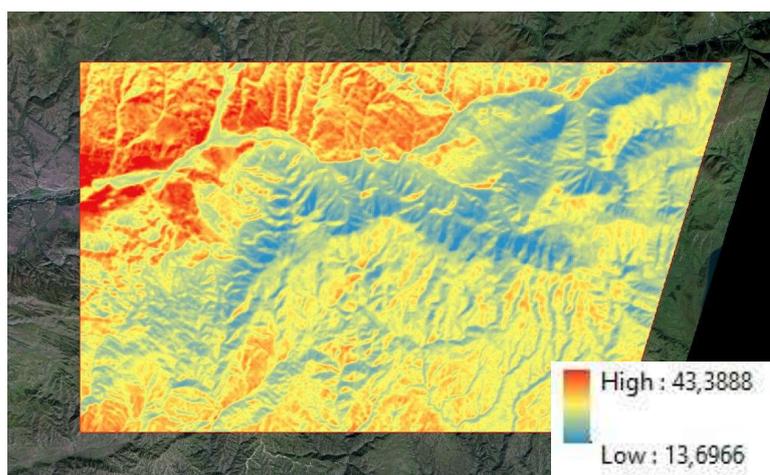


Рисунок 21 – Температура поверхности земли на участке «Чумекское месторождение железной руды» по снимкам Landsat 8 на август месяц

По результатам хорошо видно в каком месте какая температура поверхности земли, которое меняется от холодного (синего) к теплому (красному). Минимальное температура составляет 13,36 градусов по Цельсию, максимальное соответствует 43,38 градусов по Цельсию. Благодаря данным расчета можно определить на местности снежные покровы и участки воды.

Определение температуры поверхности земли, является одним из самых трудоёмких и интересных расчетов в данной исследовательской работе. Расчеты состоят их ряда действия и манипуляции с исходными данными.

Температуру поверхности земли можно оценить или рассчитать, используя тепловые полосы Landsat 8. Для этого просто требуется применить набор уравнений с помощью калькулятора растровых изображений.

Первым делом необходимо:

загрузить мультиспектральные снимки Landsat 8,
разархивировать изображение из определенного местоположения,
проверить определенную информацию, необходимую (в составе метаданных) для выполнения следующих процедур.

Полоса, или же «band» #10 в качестве тепловой полосы и полосы 4 и 5 для расчета индекса нормальной разности растительности (NVDI).

Для расчета LST используется формулы геологической службы США. Процесс синтезируется в шесть этапов, описанных ниже:

1. Расчет спектральной яркости TOA (верхней части атмосферы).

$$TOA (L) = ML * Q_{cal} + AL \quad (5)$$

где ML = Мультипликативный коэффициент масштабирования для конкретной полосы из метаданных (RADIANCE_MULT_BAND_x, где x номер полосы).

```
165 GROUP = RADIOMETRIC RESCALING
166 RADIANCE_MULT_BAND_1 = 1.2865E-02
167 RADIANCE_MULT_BAND_2 = 1.3174E-02
168 RADIANCE_MULT_BAND_3 = 1.2139E-02
169 RADIANCE_MULT_BAND_4 = 1.0237E-02
170 RADIANCE_MULT_BAND_5 = 6.2643E-03
171 RADIANCE_MULT_BAND_6 = 1.5579E-03
172 RADIANCE_MULT_BAND_7 = 5.2509E-04
173 RADIANCE_MULT_BAND_8 = 1.1585E-02
174 RADIANCE_MULT_BAND_9 = 2.4482E-03
175 RADIANCE_MULT_BAND_10 = 3.3420E-04
176 RADIANCE_MULT_BAND_11 = 3.3420E-04
177 RADIANCE_ADD_BAND_1 = -64.32359
```

Рисунок 22 – Мультипликативный коэффициент масштабирования

Q_{cal} = соответствует полосе 10.

AL = Аддитивный коэффициент масштабирования для конкретной полосы из метаданных (RADIANCE_ADD_BAND_x, где x номер полосы).

```

177 RADIANCE_ADD_BAND_1 = -64.32359
178 RADIANCE_ADD_BAND_2 = -65.86814
179 RADIANCE_ADD_BAND_3 = -60.69693
180 RADIANCE_ADD_BAND_4 = -51.18307
181 RADIANCE_ADD_BAND_5 = -31.32149
182 RADIANCE_ADD_BAND_6 = -7.78937
183 RADIANCE_ADD_BAND_7 = -2.62543
184 RADIANCE_ADD_BAND_8 = -57.92515
185 RADIANCE_ADD_BAND_9 = -12.24115
186 RADIANCE_ADD_BAND_10 = 0.10000
187 RADIANCE_ADD_BAND_11 = 0.10000
188 REFLECTANCE_MULT_BAND_1 = 2.00000E-05
189 REFLECTANCE_MULT_BAND_2 = 2.00000E-05

```

Рисунок 23 – Аддитивный коэффициент масштабирования

$$TOA = 0,0003342 * \text{“Полоса 10”} + 0,1$$

Поэтому уравнение необходимо решить с помощью инструмента Raster Calculator в ArcMap.

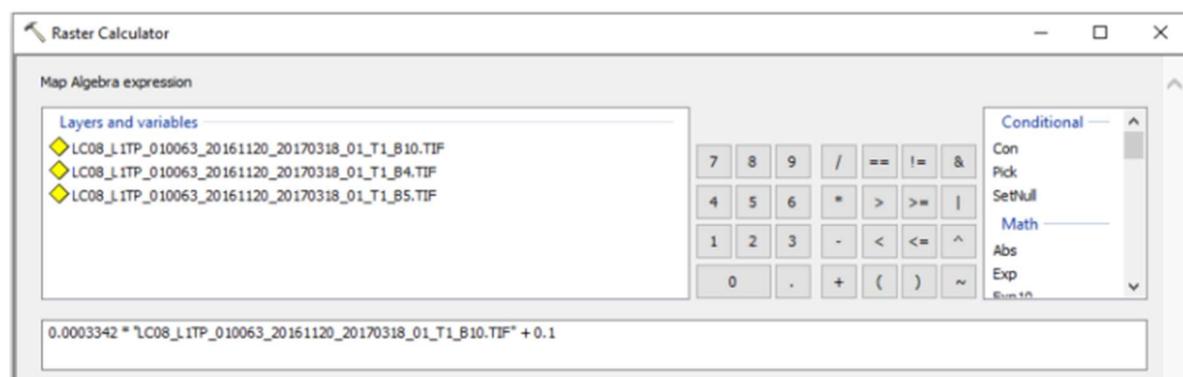


Рисунок 24 – Использование инструмента Raster Calculator для определения TOA

2. Преобразование температуры от TOA к яркости

$$BT = (K2 / (\ln (K1 / L) + 1)) - 273,15 \quad (6)$$

где K1 = константа теплового преобразования для конкретной полосы из метаданных (K1_CONSTANT_BAND_x, где x - номер тепловой полосы).

K2 = константа преобразования тепла в зависимости от полосы из метаданных (K2_CONSTANT_BAND_x, где x - номер полосы нагрева).

```

204 REFLECTANCE_ADD_BAND_8 = -0.100000
205 REFLECTANCE_ADD_BAND_9 = -0.100000
206 END_GROUP = RADIOMETRIC_RESCALING
207 GROUP = TIRS_THERMAL_CONSTANTS
208 K1_CONSTANT_BAND_10 = 774.8853
209 K2_CONSTANT_BAND_10 = 1321.0789
210 K1_CONSTANT_BAND_11 = 480.8883
211 K2_CONSTANT_BAND_11 = 1201.1442
212 END_GROUP = TIRS_THERMAL_CONSTANTS
213 GROUP = PROJECTION_PARAMETERS
214 MAP_PROJECTION = "UTM"
215 DATUM = "WGS84"
216 ELLIPSOID = "WGS84"

```

Рисунок 25 – Константа теплового преобразования и константа преобразования тепла

$L = TOA$. Поэтому для получения результатов в градусах Цельсия температура излучения корректируется путем добавления абсолютного нуля (приблизительно $273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$).

$$BT = (1321.0789 / \ln((774.8853 / \text{"\%TOA\%"} + 1)) - 273.15$$

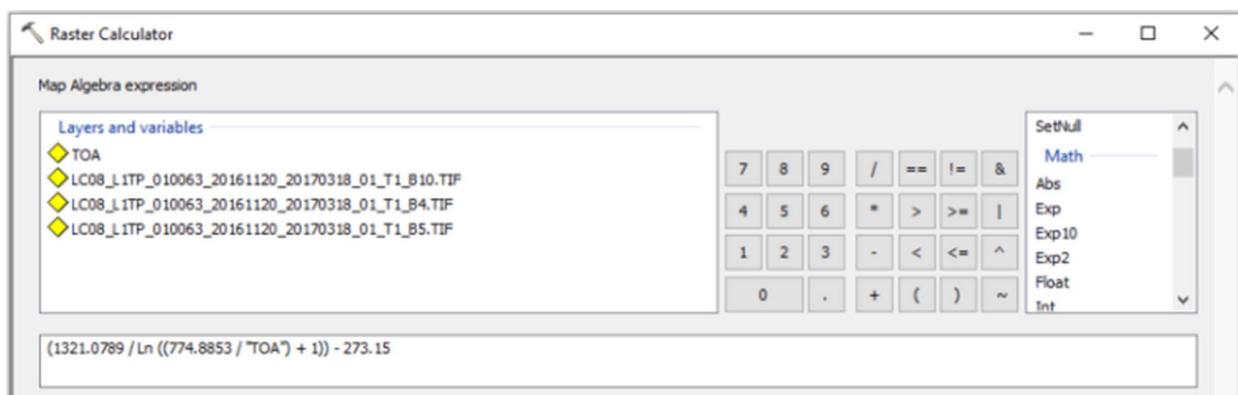


Рисунок 26 – Преобразование температуры от TOA к яркости

3. Расчет NDVI

$$NDVI = (\text{Полоса 5} - \text{полоса 4}) / (\text{Полоса 5} + \text{полоса 4}) \quad (7)$$

Стоит обратить внимание, что расчет NDVI важен, потому что впоследствии необходимо рассчитать долю растительности (P_v), которая сильно связана с NDVI, и коэффициент излучения (ϵ), который связан с P_v .

4. Вычисление доли растительности P_v

$$P_v = \text{Квадрат}((\text{мин NDVI} - NDVI) / (\text{макс NDVI} - \text{мин и NDVI})) \quad (8)$$

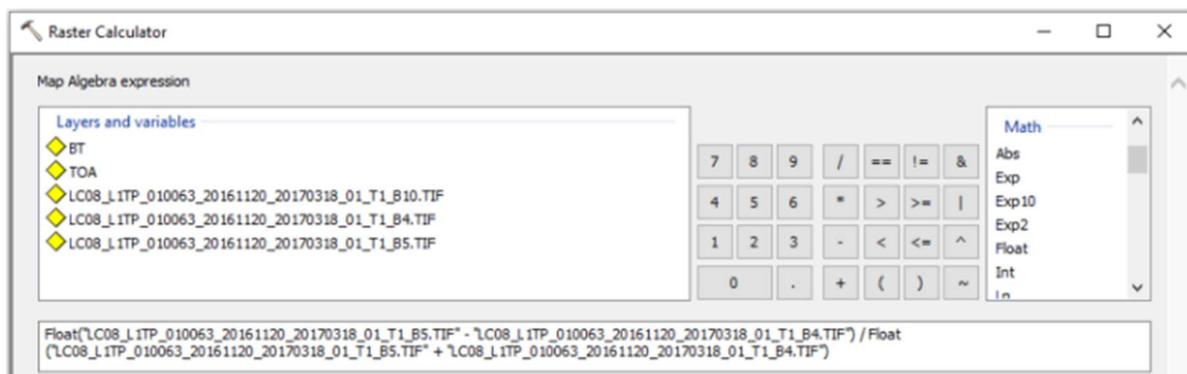


Рисунок 27 – Расчет NDVI

Обычно минимальное и максимальное значения изображения NDVI можно отобразить непосредственно на изображении (как в ArcGIS, QGIS, ENVI, Erdas Imagine), в противном случае вы должны открыть свойства растра, чтобы получить эти значения.

$$P_v = \text{Квадрат} \left(\frac{NDVI - 0.216901}{0.632267 - 0.216901} \right)$$



Рисунок 28 – Вычисление доли растительности P_v

5. Расчет коэффициента излучения ε

$$\varepsilon = 0,004 * P_v + 0,986 \quad (9)$$

Применение формулы в растровом калькуляторе, значение 0,986 соответствует корректирующему значению уравнения.

6. Вычисление температуры поверхности земли. На данном завершающем этапе используется формула (4).

Для вычисления индекса Land Surface Temperature на снимках Sentinel 2 используется абсолютно идентичный метод, эти же формулы, за исключением входных данных. К примеру, так как длина волн полос, или же слоев «Band»,

будут отличаться нумерация полос и некоторые коэффициенты. Температура поверхности земли была подсчитана на два разных снимка Landsat 8 Sentinel 2 с целью наблюдения сходств и различий между результатами.



Рисунок 29 – Расчет коэффициента излучения ϵ



Рисунок 30 – Вычисление температуры поверхности земли

В результате разработанного процесса появилась карта температуры поверхности земли, следует отметить, что она не равна температуре воздуха.

Сопоставив данные, можно утверждать, что наибольшее значение согласно результату сравнительного анализа, соответствует более высокой температуре поверхности земли. В соответствии результатами, приведенных в таблицах 2 и 3 напрашивается вывод что, чем больше концентрация того или иного индекса касательно железной руды, тем выше температура поверхности земли. Полученные результаты, а точнее, выведенные закономерности сохранения температуры в применении с другими данными, в дальнейшем можно будет использовать как корректировку для точного определения местоположения железной руды.

Таблицы 2,3 – Сопоставление данных индексов с температурой поверхности земли

Landsat 8						
№	Железистые минералы	LST	Оксид железа	LST	Железистые силикаты	LST (°C)
1	0 - 0,715401	14.7 - 37.2	0 - 0,870847	13.7 - 38.7	0,624939 - 0,695065	17.0 - 38.4
1	0,715401 - 0,822083	14.1 - 38.6	0,870847 - 0,924603	14.1 - 40.5	0,695065 - 0,729229	15.9 - 40.2
3	0,822083 - 0,928766	13.7 - 39.7	0,924603 - 0,972983	14.6 - 42.6	0,729229 - 0,768787	15.9 - 40.2
4	0,928766 - 1,054275	13.7 - 41.7	0,972983 - 1,032115	14.9 - 43.4	0,768787 - 0,828121	14.3 - 43.4
5	1,054275 - 1,600239	14.5 - 43.4	1,032515 - 1,370778	17.6 - 43.3	0,828123 - 1,083452	13.7 - 43.0

Sentinel 2						
№	Железистые минералы	LST	Оксид железа	LST	Железистые силикаты	LST (°C)
1	0,258944 - 0,481235	13.7 - 43.4	0.32047 - 0.610413	13.7 - 38.7	0.309264 - 0.474357	14.8 - 38.0
2	0,481235 - 0,703526	13.8 - 41.6	0.610413 - 0.76359	13.7 - 40.1	0.474357 - 0.527311	14.1 - 39.4
3	0,703526 - 0,925817	13.7 - 39.2	0.76359 - 0.894885	14.4 - 41.1	0.527311 - 0.586495	13.8 - 40.3
4	0,925817 - 1,148108	13.9 - 40.3	0.894885 - 1.02071	14.5 - 42.8	0.586495 - 0.658138	13.7 - 42.2
5	1,148108 - 1,370402	14.0 - 42.0	1.02071 - 1.715479	15.0 - 43.4	0.658138 - 1.103576	13.7 - 43.4

Для точного определения местоположения железной руды необходимо больше данных, больше расчетов, больше сравнений. Так как с каждым расчетом определяются всё более интересные результаты и закономерности. В связи с чем следующим шагом стало определение сходств или разницы между результатами расчетов индекса касательно железной руды на основе снимков разных годов. В качестве исходных данных были использованы снимки Landsat 8 сделанные в 2021, 2014, 2007, 1998 и 1990 годы.

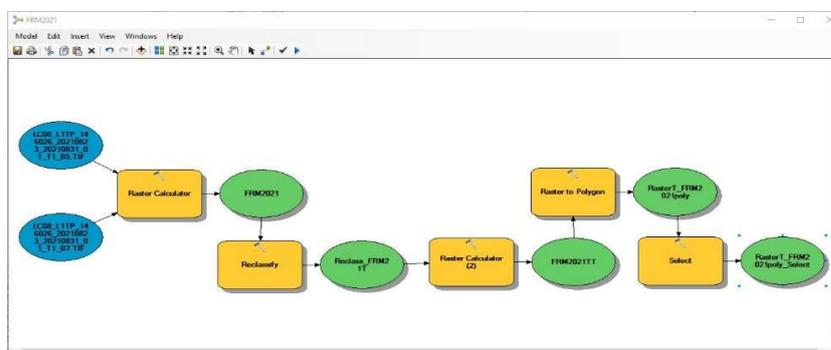


Рисунок 31 – Модель для определения индекса железной руды и преобразования результатов в полигон

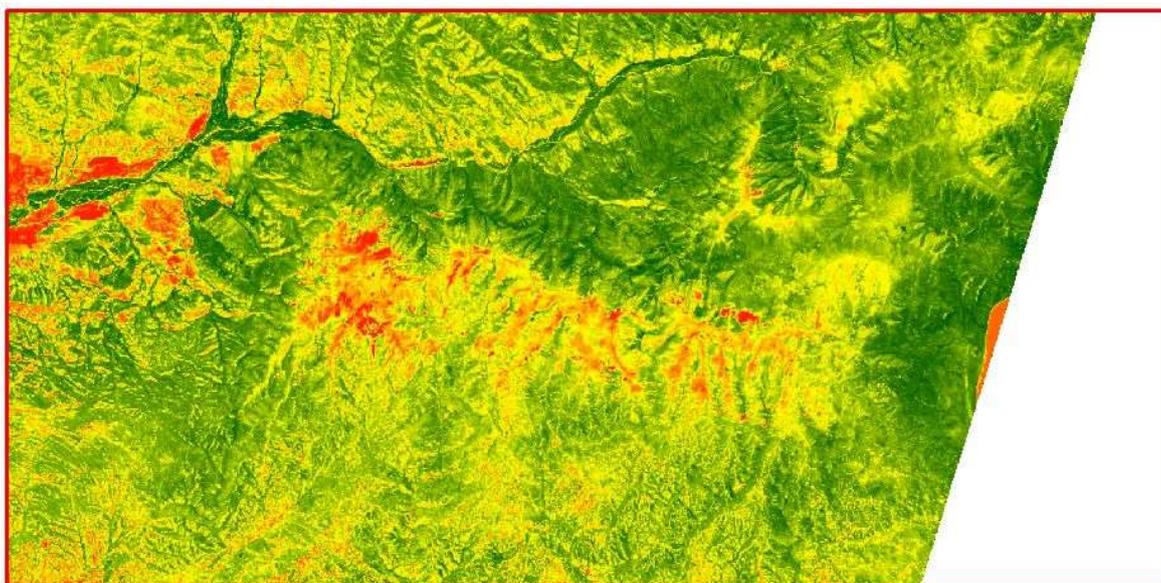


Рисунок 32 – Индекс Ferrous Minerals Ratio 2021 год

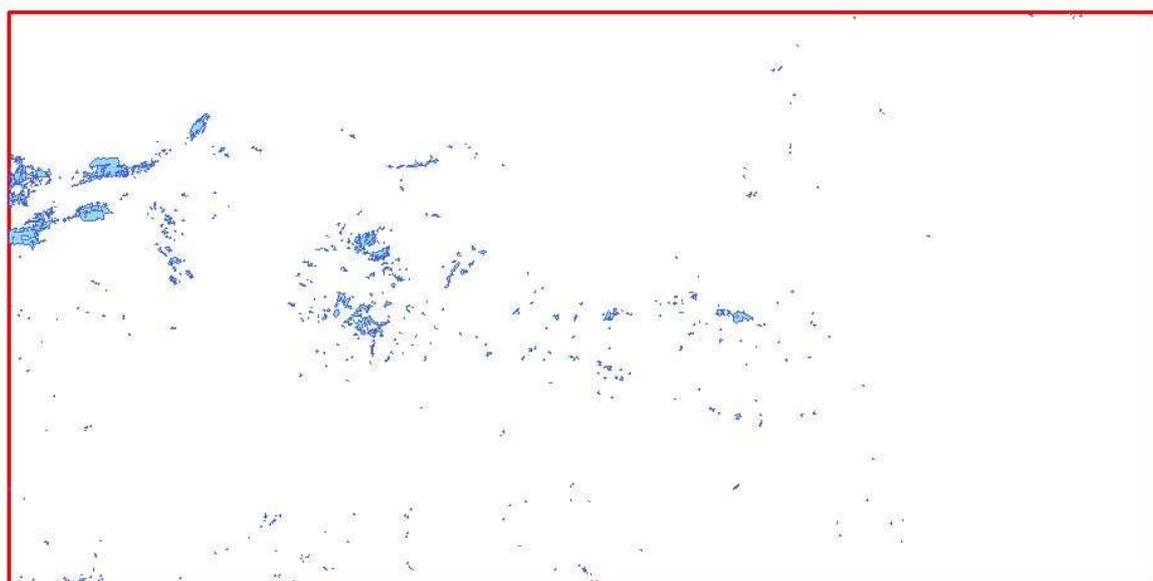


Рисунок 33 – Индекс Ferrous Minerals Ratio 2021 год преобразованный в
ПОЛИГОН

После произведения расчетов индексов FMR и IOR, был произведен сравнительный анализ, изображенный в рисунке 36, между индексами относящиеся одному и тому же году.

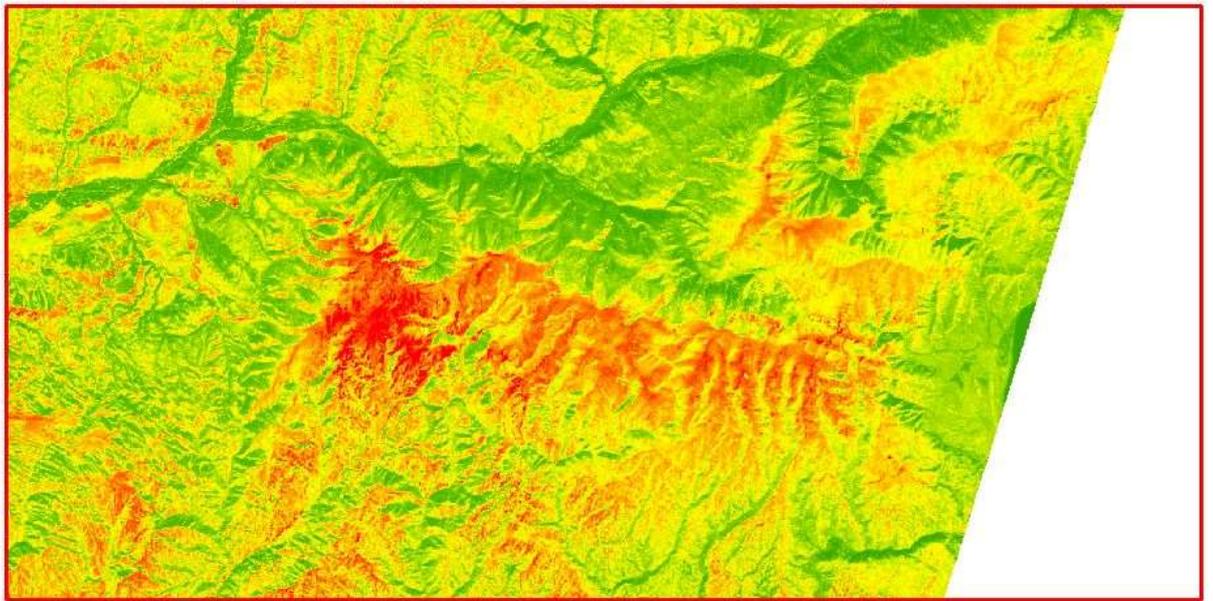


Рисунок 34 – Индекс Iron Oxide Ratio 2021 год

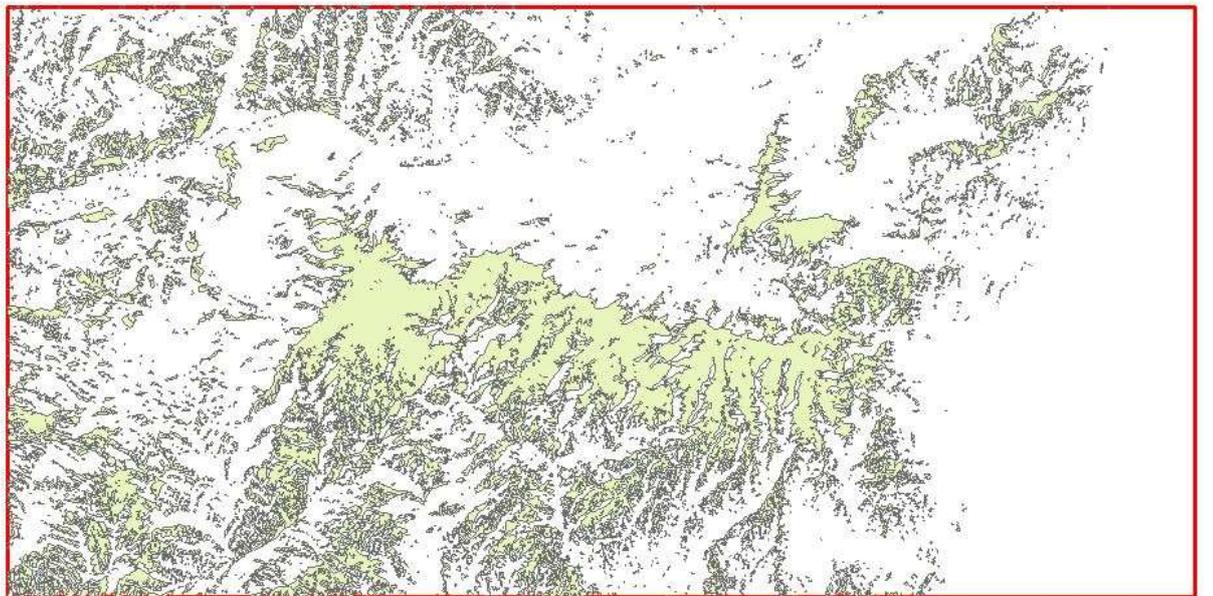


Рисунок 35 – Индекс Iron Oxide Ratio 2021 год преобразованный в полигон

По результатам видно, что индексы в одном и том же диапазоне имеют большое расхождение по занимаемой площади. Индекс IOR практически всегда занимает большую территорию чем индекс FMR. Данное утверждение весьма корректное, так как данные расчеты параллельно производились и на других участках.

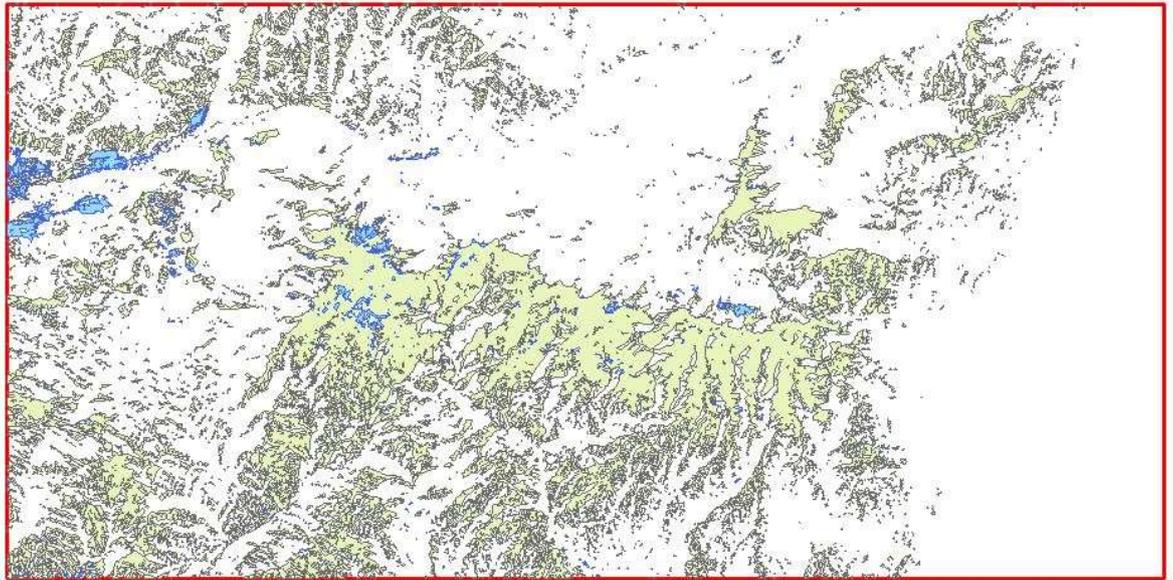


Рисунок 36 – Разница между индексами FMR и IOR 2021 г

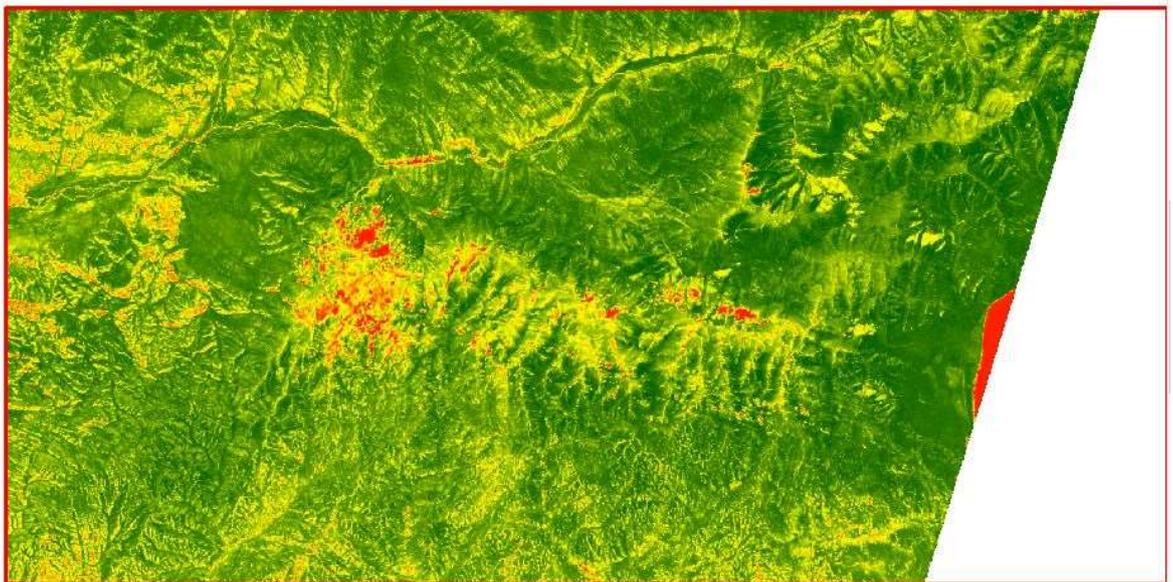


Рисунок 37 – Ferrous Minerals Ratio 2014 год

В соответствии с рисунком 41, был проведен сравнительный анализ среди результатов 2021 и 2014 годов, можно заметить следующее:

Имея одинаковый диапазон по площади индекс Iron Oxide Ratio, по занимаемой территории больше, чем индекс Ferrous Minerals Ratio. По словам специалистов, занимающиеся на местности инженерногеологическими, а также

инженерногеофизическими исследованиями, на данном месторождении, железной руды, меньше, чем ожидалось. Данное утверждение основано на данных магниторазведок и лабораторным заключениям. Поэтому я предполагаю, что в качестве определения возможного местоположения железной руды индекс Ferrous Minerals Ratio подходит больше.

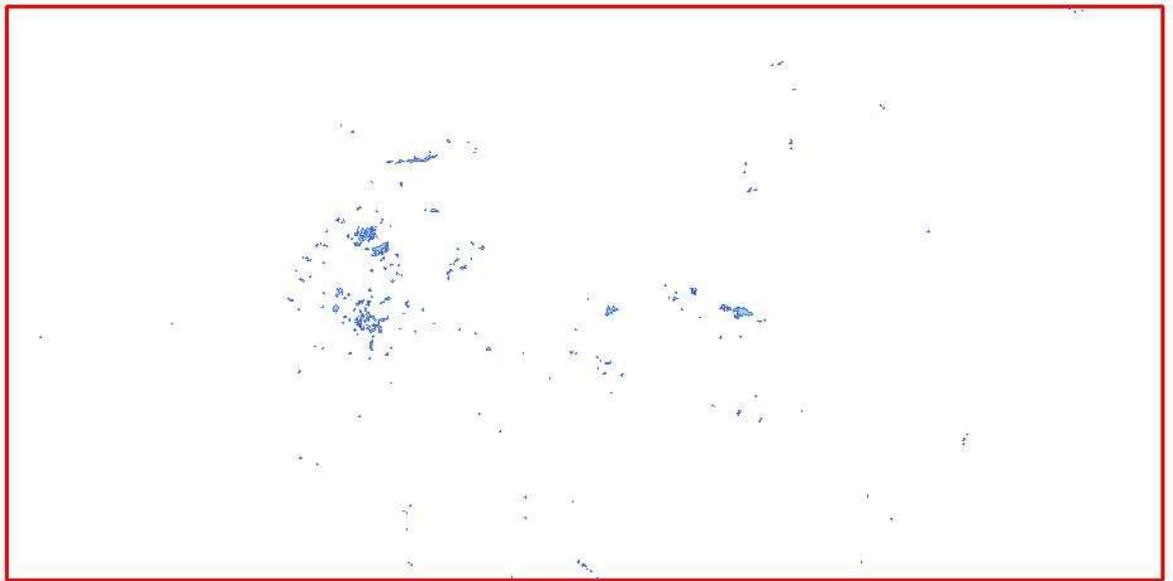


Рисунок 38 – Ferrous Minerals Ratio 2014 год преобразованный в полигон

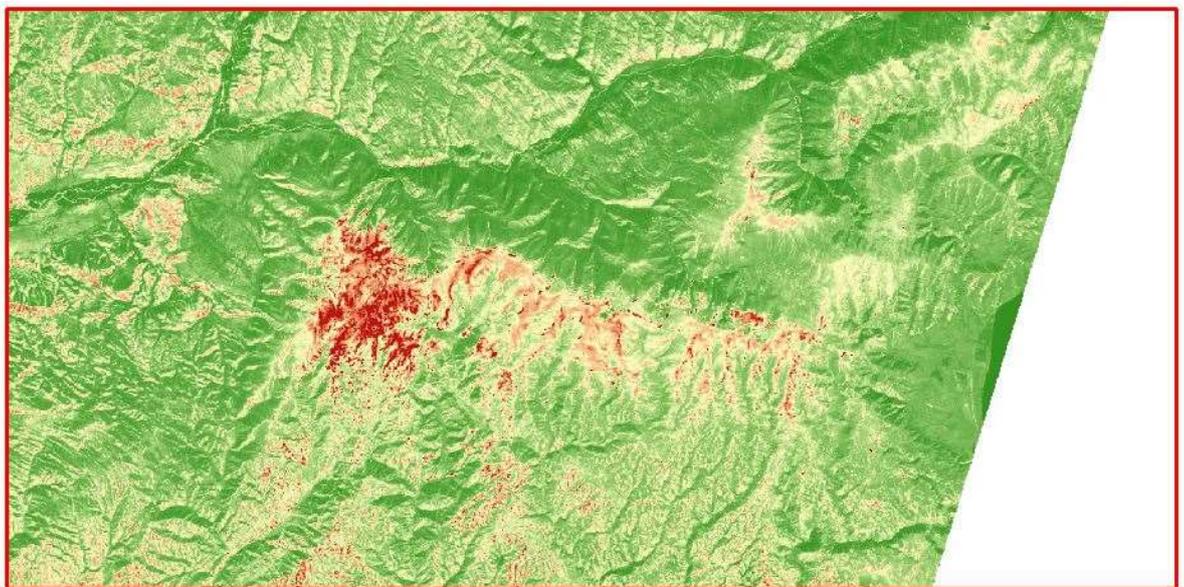


Рисунок 39 – Индекс Iron Oxide Ratio 2021

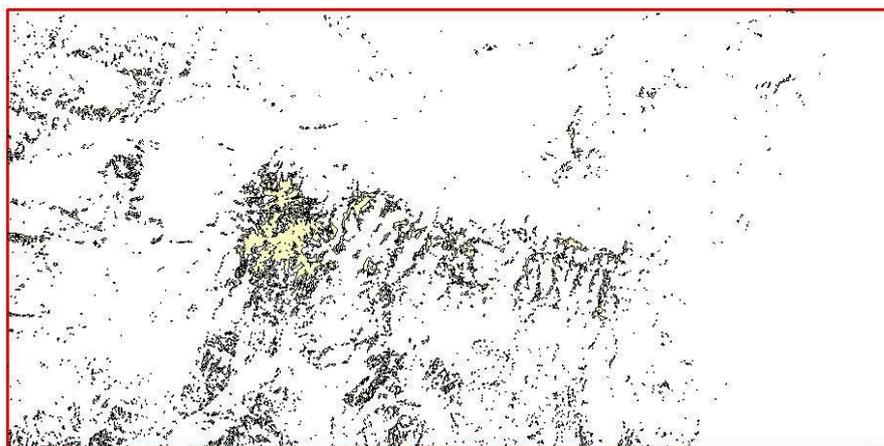


Рисунок 40 – Индекс Iron Oxide Ratio 2021 преобразованный в полигон



Рисунок 41 – Разница между индексами FMR и IOR 2014 г

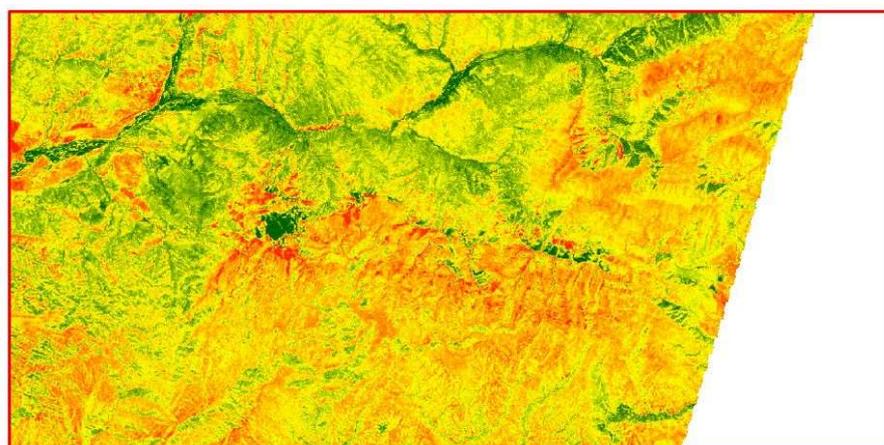


Рисунок 42 – Ferrous Minerals Ratio 1998 год



Рисунок 43 – Ferrous Minerals Ratio 1998 год преобразованный в полигон

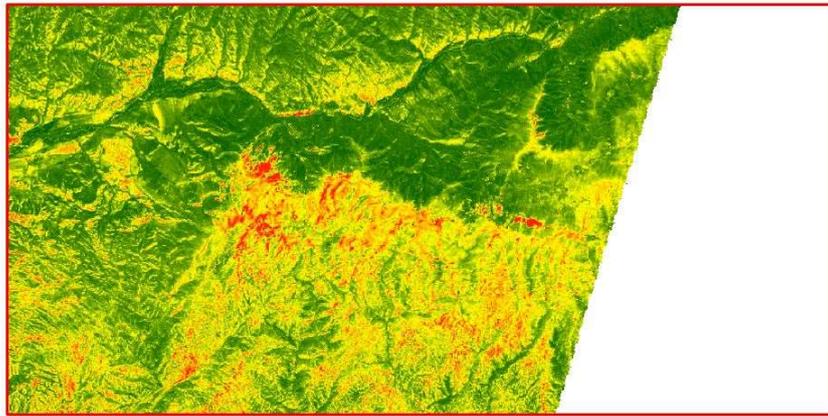


Рисунок 44 – Ferrous Minerals Ratio 1990 год



Рисунок 45 – Ferrous Minerals Ratio 1990 год преобразованный в полигон

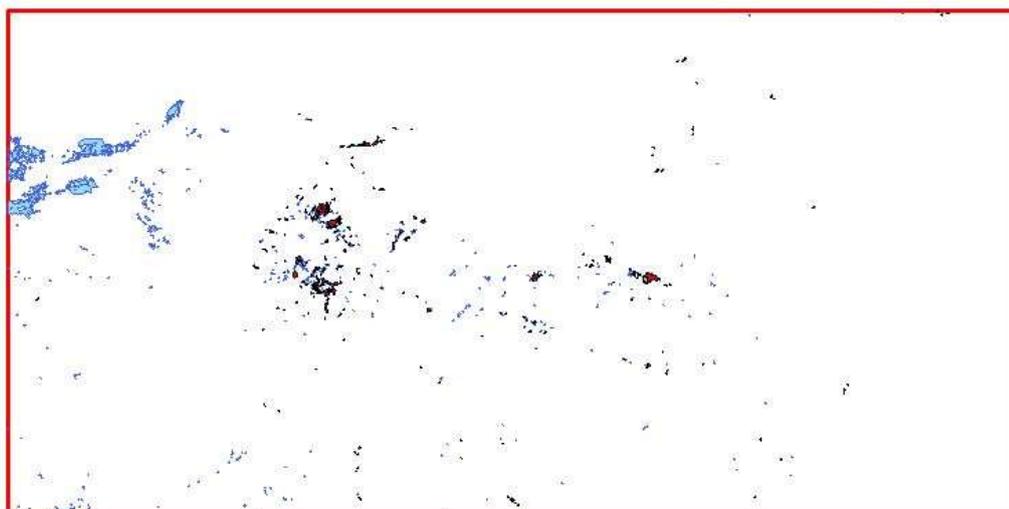


Рисунок 46 – Разница между индексами FMR за 1990 и 1998 года

Ради сравнения результатов недавних лет с более ранними данными, в качестве исходных данных были использованы снимки за 1990 и 1998 года. Результаты которых нахожу весьма интересными. На это есть ряд причин:

Индекс оксида железа не был использован в расчетах 1990, 1998 годов, так как результаты неоднозначны и некорректны;

В результатах расчетов индекса железистых минералов заметна одна закономерность: чем старше снимок, тем больше различия от результатов полученных с помощью более свежих снимков;

Сравнив данные, можно прийти к выводу что, при одинаковом диапазоне, индексы за 1990 и 1998 года имеют слишком большие расхождения, что в принципе невозможно.

А полученные данные за 2014 и 2021 года, так же результаты сравнения между данными 2021 и 2022 года в определенных территориях очень схожи. Данные расчеты были выполнены с целью:

определения закономерностей распределения железной руды, если таковы имеются;

определения сходств и различий между индексами касательно железной руды;

определения сходств и различий между результатами, полученными между различных снимков по разным годам;

Благодаря произведенным расчетам удалось прийти к конкретным решениям, таким как:

- Использовать в дальнейшем исследовании индекс железистых минералов;
- Использование снимков Landsat 8;

- Использование снимков за последние года.

Данные требования к входным данным, повысит качество и точность, так же актуальность конечных выходных результатов.

2.1 Результаты расчетов существующего метода FMR

Как и было выше упомянуто, поиск железной руды осуществляется расчетами различных индексов. Далее по известным причинам использовался лишь индекс железистых минералов, на основе снимков Ландсат 8 на 2022 год.

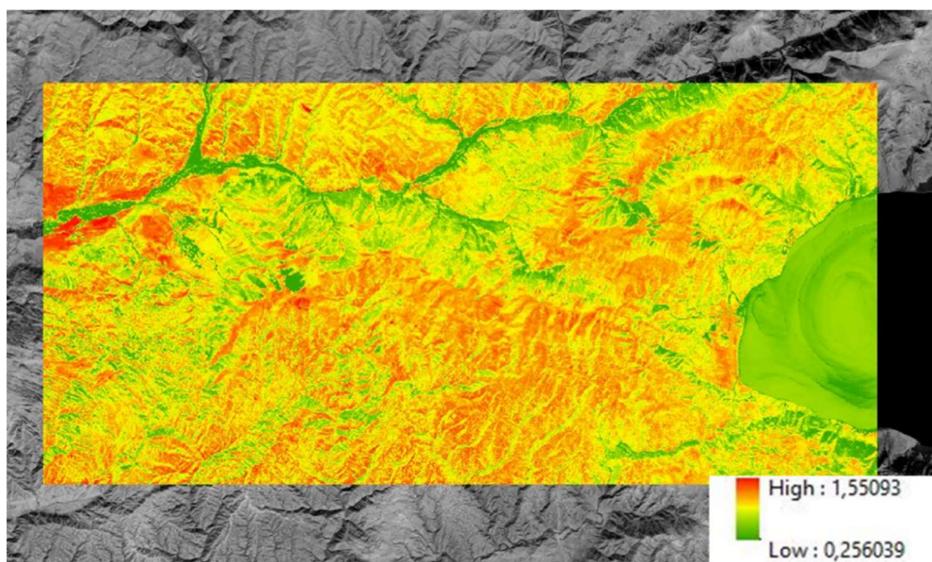


Рисунок 47 – Результат, полученный по формуле FMR 2022 г.

В результате подсчетов получаем шкалу в диапазоне 0,256039 – 1,55093.

При подсчете индекса FMR были обнаружены ряд проблем:

отсутствие пояснительной записки к полученной шкале, и результатам в целом;

в отличии от других индексов, в галерее индексов ESRI отсутствует описание полученных результатов индекса железистых минералов;

существует разница в результатах проводимых расчетов одного и того же индекса (FMR) на одну и ту же территорию по разным годам;

разница в результатах, полученных с разных источников или же по разным годам.

С целью исключения существующих проблем были поставлены четкие задачи:

- Составить пояснение к результатам расчета индекса железистых минералов;
- Получение корректирующих данных.

Первым шагом является проведение переклассификации индекса железистых минералов, результаты которых приведены на рисунках 48 и 49. Это позволит облегчить все дальнейшие проводимые расчеты, и выполнять сравнительные анализы и построение связей между индексами.

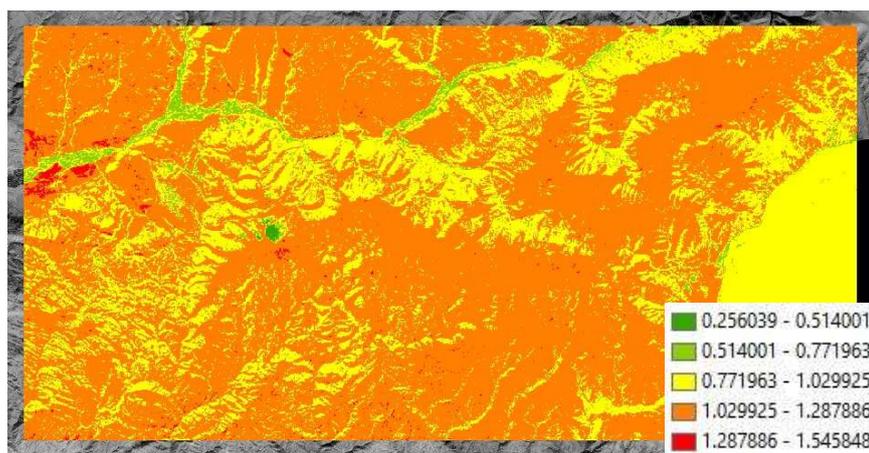
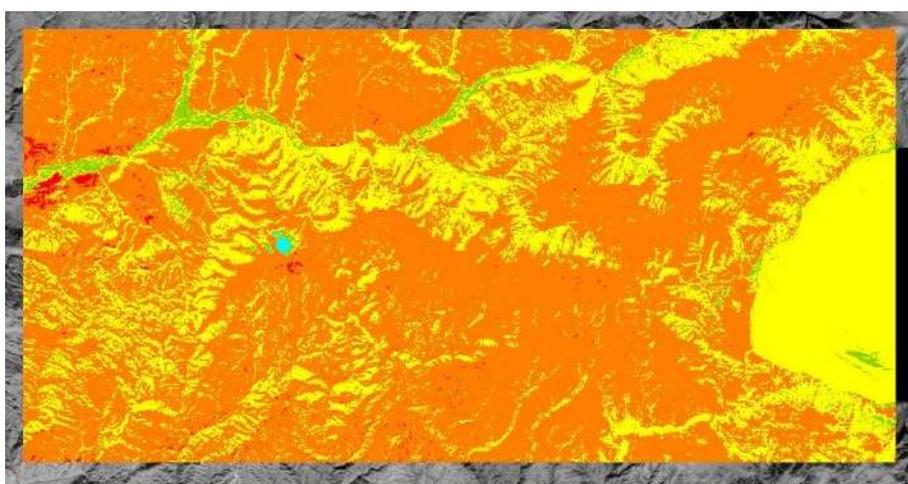


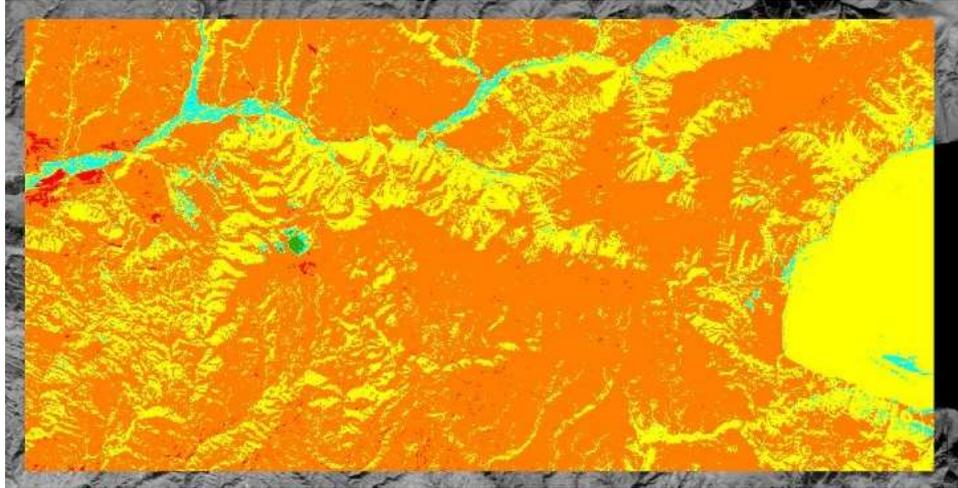
Рисунок 48 – Переклассификация индекса FMR

Все результаты были поделены на 5 интуитивно воспринимаемых классов.

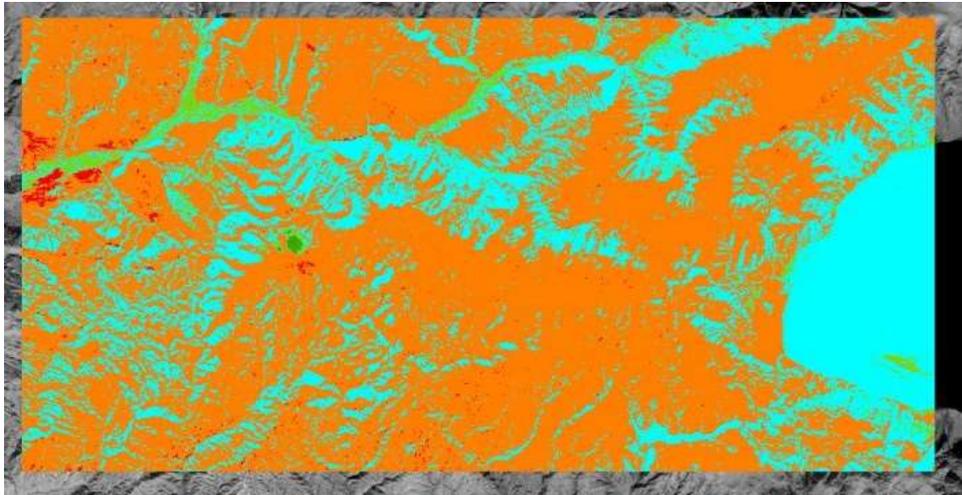
- 1 класс: диапазон 0,256039 – 0,514001,
- 2 класс: диапазон 0,514001 – 0,771963,
- 3 класс: диапазон 0,771963 – 1,029925,
- 4 класс: диапазон 1,029925 – 1,287886,
- 5 класс: диапазон 1,287886 – 1,545848.



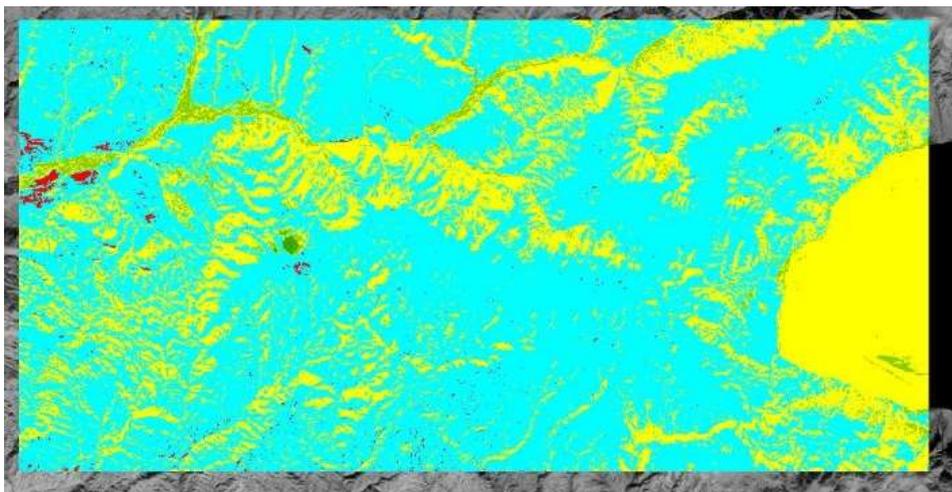
а



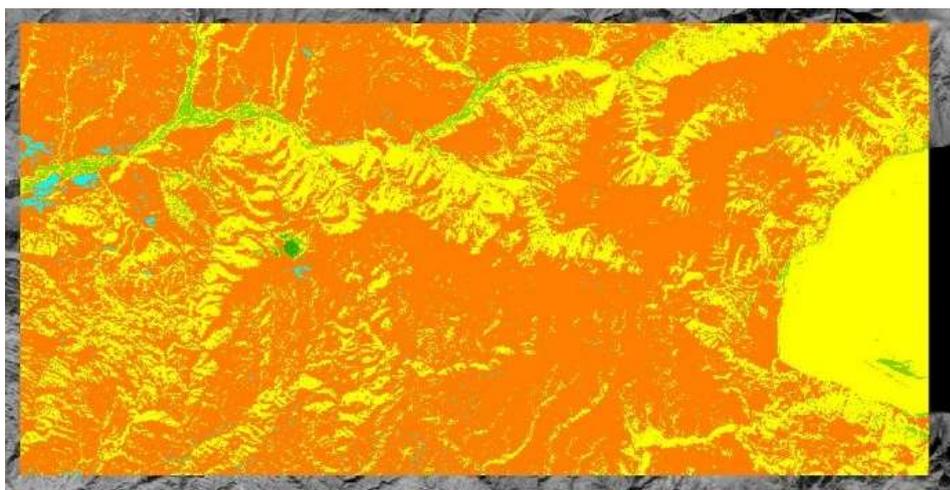
6



6



2



д



е

Рисунок 49 – а) 1 класс, б) 2 класс, в) 3 класс, г) 4 класс, д) 5 класс, е) диапазон

2.2 Разведка местности способом определения индексов: MNDWI, NDVI, WRI, CMR, LST

В математике существует термин «корреляция», которая выражается в зависимости между двух и более случайных чисел или же величин. Суть заключается в изменении значения величин с определенной систематичностью. То есть изменение одних чисел влияет на изменение других.

Логика дальнейших расчетов построена именно на этом термине. Смоделируем ситуацию:

К примеру, на местности пошел дождь. Это приведет к определенным изменениям в индексах:

Повысятся индексы воды, влажности, растительности;
Температура может понизиться.

В этом моменте можно сделать логичное утверждение что при наличии железной руды существуют определенные изменения или же аномалии в других индексах. С целью подтверждения данной гипотезы были подсчитаны следующие индексы:

- MNDWI;
- NDVI;
- WRI;
- LST;
- CMR.

Модифицированный стандартизованный индекс различий воды (MNDWI) используется соотношение зеленого канала и канала SWIR, с целью улучшения отображения объектов открытых водных пространств. Также снижается значения областей застройки, которые в свою очередь часто коррелированы с открытыми водными пространствами в других индексах.

$$\text{MNDWI} = (\text{Green} - \text{SWIR}) / (\text{Green} + \text{SWIR}) \quad (10)$$

где Green - значения пикселей из зеленого канала, SWIR значения пикселей из коротковолнового инфракрасного канала.

Нормализованный вегетационный индекс NDVI (NDVI) – представляет собой стандартизованный индекс, который показывает наличие или же состояние растительного покрова (относительная биомасса). Этот индекс использует контраст характеристик двух каналов из набора мультиспектральных растровых данных – поглощения пигментом хлорофилла в красном канале и высокой отражательной способности растительности в инфракрасном канале (NIR).

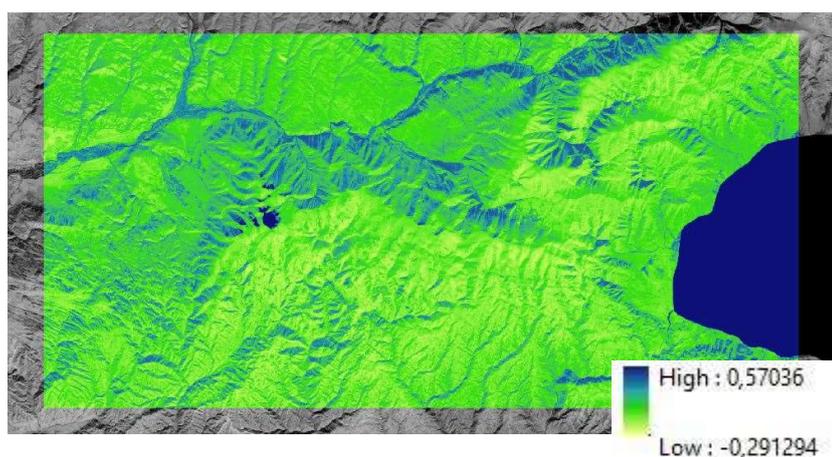


Рисунок 50 – MNDWI

Документированное уравнение NDVI, используемое по умолчанию:

$$= ((\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red})) \quad (11)$$

где NIR значения пикселей из ближнего инфракрасного канала, Red значения пикселей из красного канала.

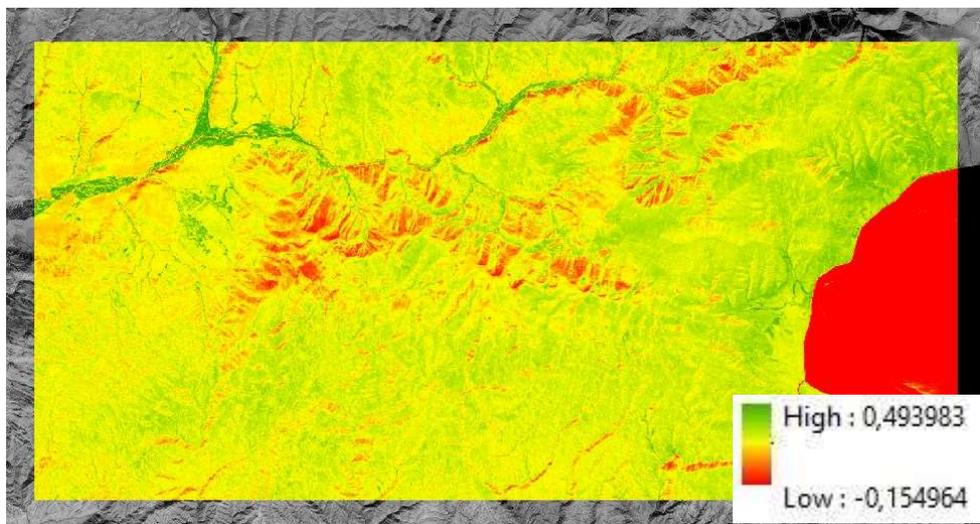


Рисунок 51 – NDVI

Индекс влагостойкости WRI «Water Ratio Index»

С помощью данного индекса есть возможность определения количества влаги в растительном покрове. Суть расчета данного индекса основана на соотношении между полным спектральным индексом двух видимых диапазонов света (зеленого и красного) и коротковолнового и средневолнового инфракрасных диапазонов.

$$\text{WRI} = (\text{GREEN} + \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{SWIR2}) \quad (12)$$

где Green значения пикселей из зеленого канала, Red значения пикселей из красного канала, NIR значения пикселей из ближнего инфракрасного канала, SWIR значения пикселей из коротковолнового инфракрасного канала.

Land Surface Temperature – индекс определяющая радиационную температуру, которая рассчитывается с использованием уровня яркости верхнего слоя атмосферы (Рисунок 53). Определяется по следующей формуле:

$$\text{LST} = (\text{BT}/1) + W * (\text{BT}/14380) * B(E) \quad (13)$$

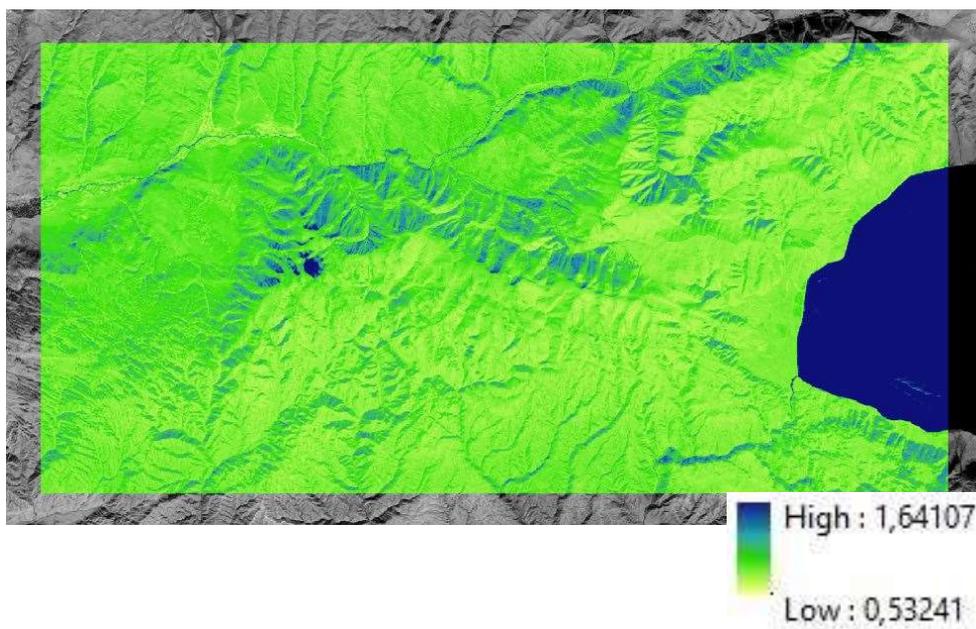


Рисунок 52 – WRI

где BT – Верхняя яркостная температура атмосферы, W – длина волны излучения, E – Коэффициент излучения земной поверхности.

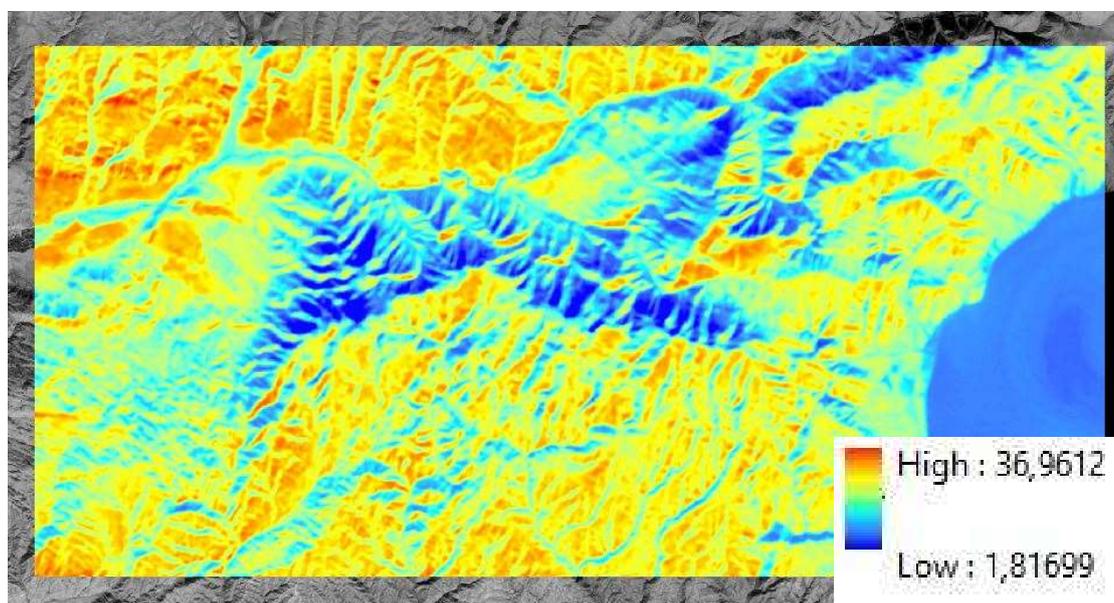


Рисунок 53 – LST

3 Определение взаимосвязей между индексами

3.1 Разработка модели для выполнения функции определения взаимосвязей

С целью подтверждения гипотезы о том, что среди индексов существует корреляция, так же о наличии взаимосвязи между индексами железа и индексами характеризующие природное состояние местности, необходимо определить взаимосвязь между индексами.

Для этого был построен своего рода алгоритм действия, состоящий из множеств инструментов из набора «Spatial Analyst». С помощью Model Builder была создана модель с функцией определения взаимосвязей.

Данная модель была построена для каждого класса FMR в двух месторождениях (Чумекское, Кокбулакское). То есть 10 моделей в общей сложности. В результате чего было получено более 100 отдельных слоев состоящие из отдельных групп «шейп» файлов, а также полигонов.

Ради установления закономерности распределения железной руды, систематичности изменения других индексов в зависимости от каждого класса индекса железистых минералов, все расчеты параллельно производились на Кокбулакском месторождении железной руды. Данное месторождение находится на в нескольких километрах западной Аральского моря.

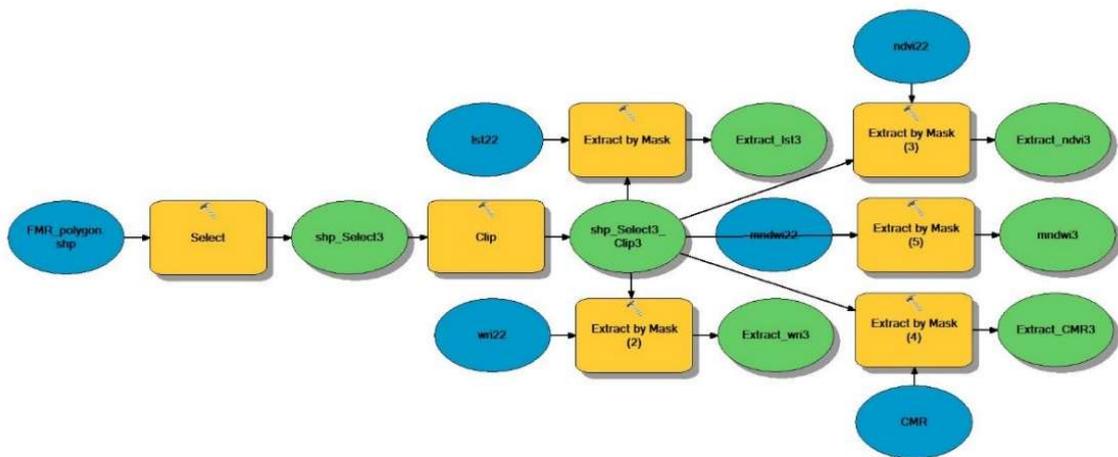


Рисунок 54 – Модель определения взаимосвязей между индексами

Логика данной модели весьма просто и весьма действенна. Если разбить функцию модели на поэтапные действия, то схема будет выглядеть следующим образом:

Переклассификация результатов индекса железистых минералов;

- Преобразование в полигон;
- Выбор необходимого для расчетов класса железа;
- Вырезание выбранного класса;
- Подсчет других индексов под выбранный класс.

Для этого использовались инструменты:

Reclassify. Инструмент из набора «Spatial Analyst», предназначенный для переклассификации или же для, изменении значения входного растра.

Raster to Polygon. Позволяет конвертировать наборы растровых данных в полигоны, в виде пространственных объектов.

Select. С помощью данного инструмента можно извлекать выбранные элементы из входного покрытия и сохранять их в выходном покрытии.

Clip. Данный инструмент позволяет осуществить «извлечение» входных объектов, которые в свою очередь совпадают с вырезающими элементами, что позволяет создавать новые слои по определенным требованиям.

Extract by mask. Завершающий этап модели – это извлечение ячеек растра, соответствующие площади, ограниченной маской. То есть в пределах поставленных условиях вырезается входной файл.

В результате одна модель выдает пять различных результатов взаимосвязей между индексами. Учитывая количество моделей, конечных результатов получаем в сумме 25 величин на 2 участка месторождения железной руды.

3.2 Результаты в таблицах

Таблица 4 – Сопоставление данных индексов, на Чумекском месторождении железной руды

Landsat8 (20.09.2022) Чумекское месторождение							
Железо	Класс	Отрезок	MNDWI	CMR	NDVI	WRI	LST
FMR	1	0.24 0.51	0.0 0.57	0.98 1.20	0.0 0.49	1.20 1.50	3 10
	2	0.51 0.77	0.0 0.33	0.98 1.46	0.12 0.48	0.54 1.58	1.8 28.0
	3	0.77 1.02	0.0 0.28	0.93 1.49	0.15 0.38	0.58 1.64	1.8 33.2
	4	1.02 1.28	0.0 0.09	0.94 1.50	0.04 0.30	0.59 1.54	2.9 36.5
	5	1.28 1.54	0.0 0.0	0.92 1.44	0.02 0.23	0.60 0.84	14.3 37.0

В связи с многообразием и большим количеством полученных результатов, самым удобным способом визуализации данных является методы таблиц и диаграмм. Результаты приведены в таблицах 4 и 5.

Таблица 5 – Сопоставление данных индексов, на Кокбулакском месторождении железной руды

Landsat8 (20.09.2022) Кокбулакское месторождение							
Железо	Класс	Отрезок	MNDWI	CMR	NDVI	WRI	LST
FMR	1	0.24 0.51	0.0 0.51	1.04 1.36	0.02 0.42	0.60 1.52	19 28
	2	0.51 0.77	0.0 0.40	1.25 1.29	0.20 0.42	0.57 1.80	17 30
	3	0.77 1.02	0.0 0.36	0.94 1.48	0.02 0.27	0.61 1.83	16 36
	4	1.02 1.28	0.0 0.07	0.91 1.52	0.01 0.23	0.63 1.07	21 39
	5	1.28 1.54	0.0 0.0	0.89 1.21	0.01 0.15	0.62 0.94	29 39

3.3 Полученные результаты

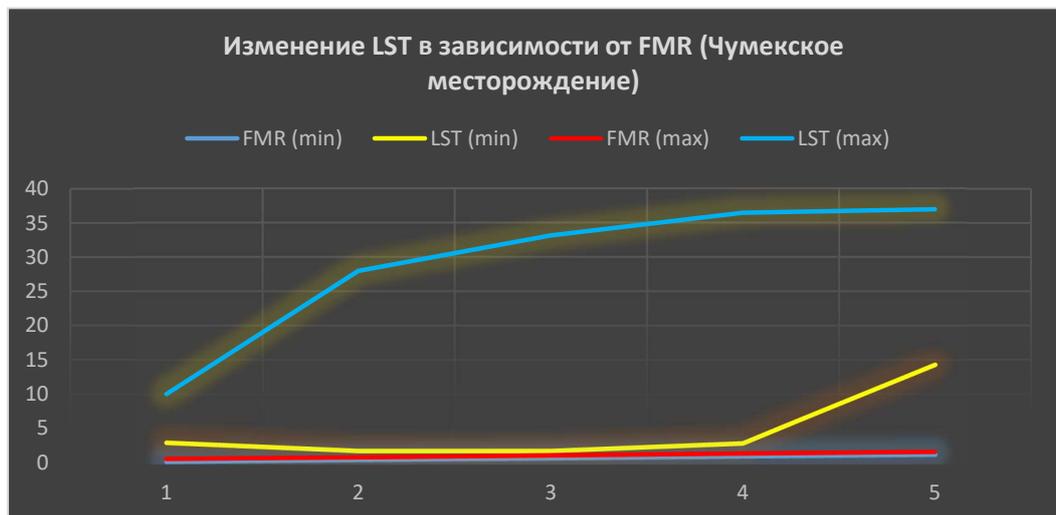


Рисунок 55 – Изменение LST в зависимости от FMR (Чумекское месторождение)

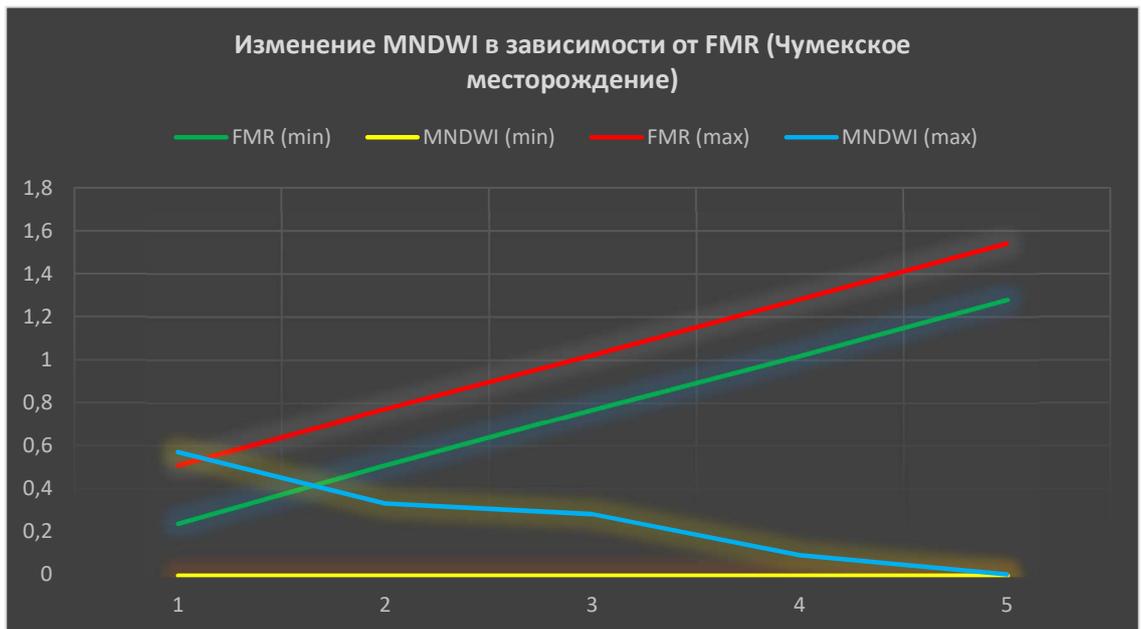


Рисунок 56 – Изменение MNDWI в зависимости от FMR (Чумекское месторождение)

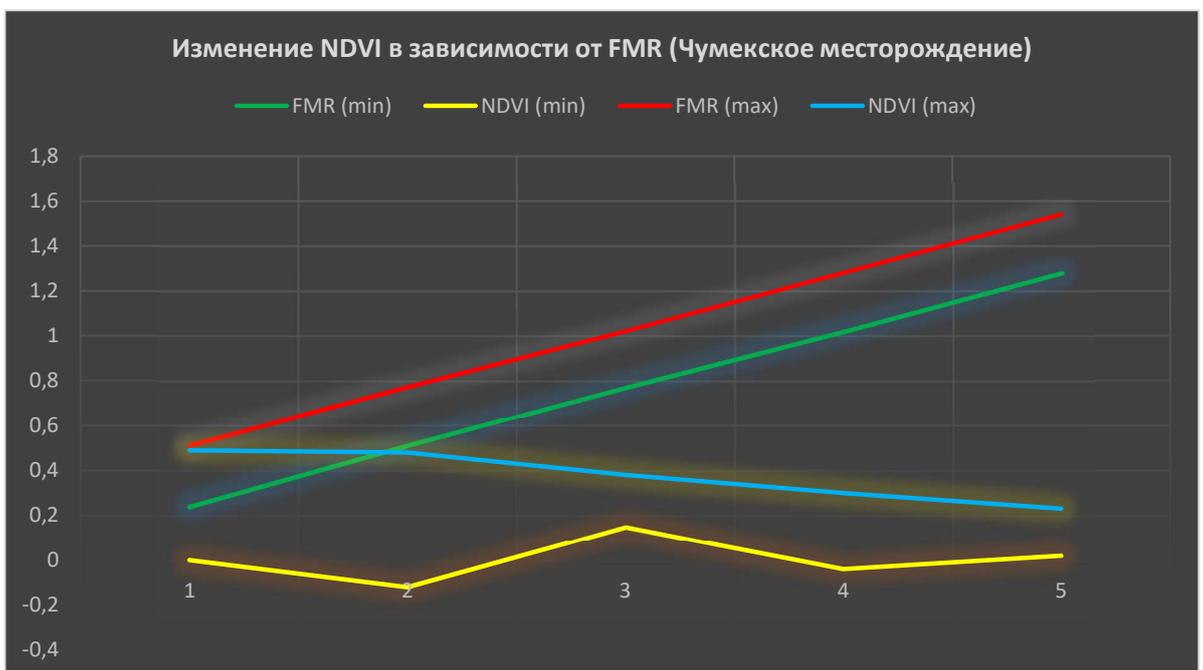


Рисунок 57 – Изменение NDVI в зависимости от FMR (Чумекское месторождение)

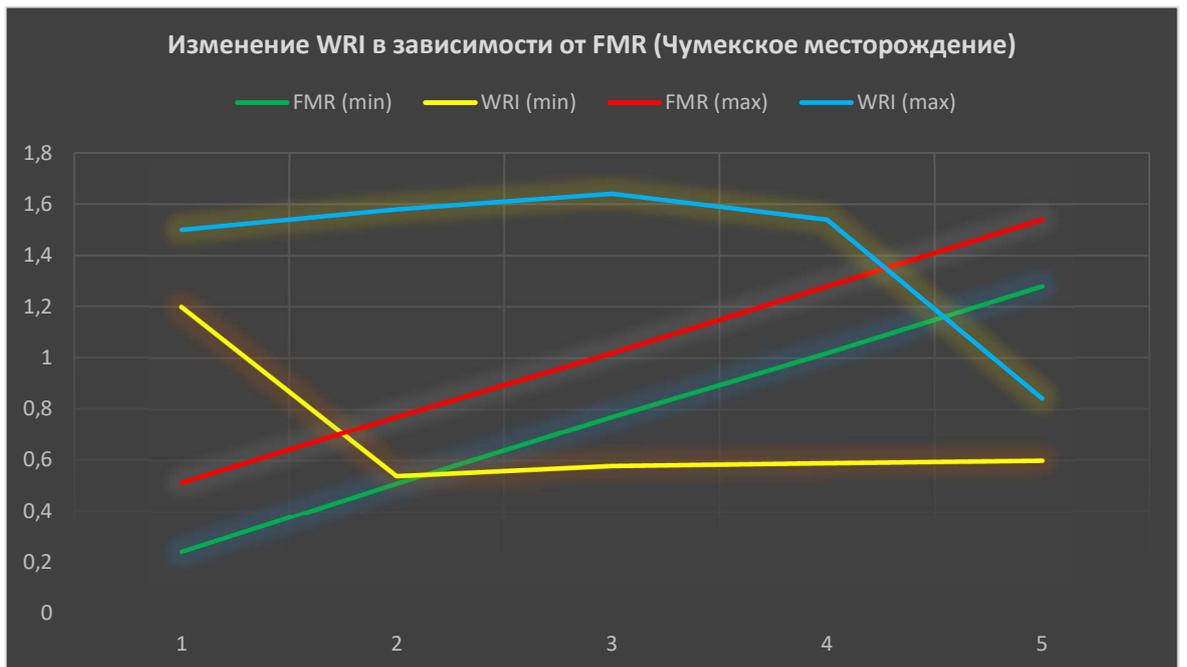


Рисунок 58 – Изменение WRI в зависимости от FMR (Чумекское месторождение)

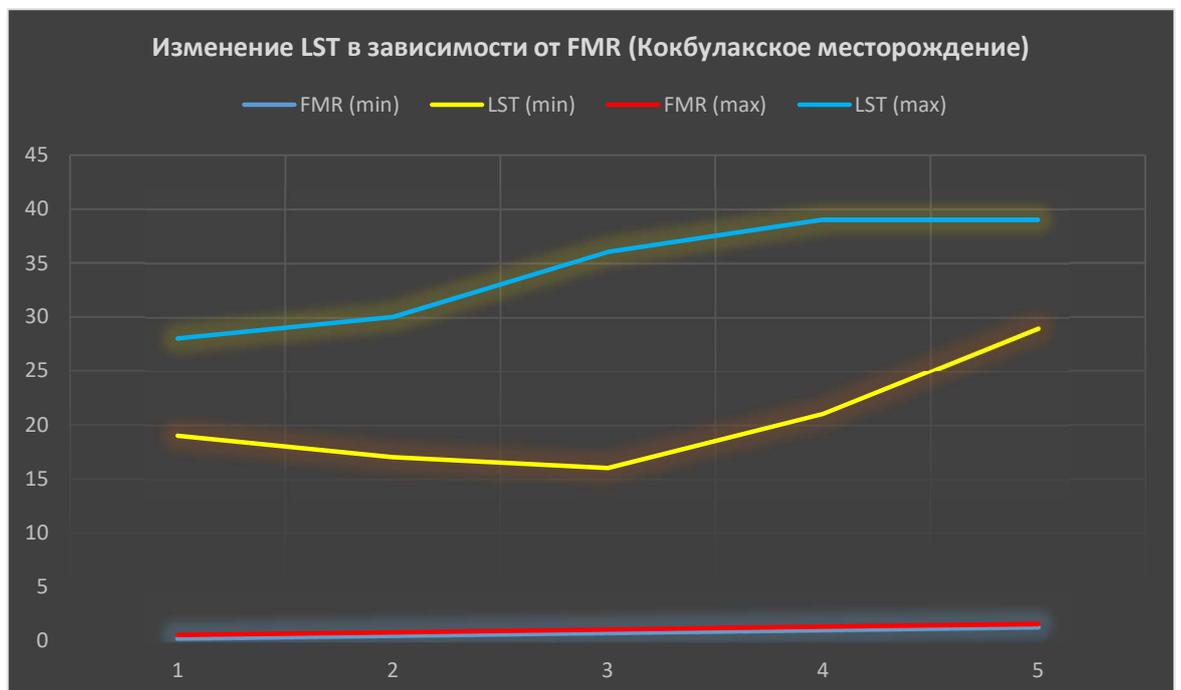


Рисунок 59 – Изменение LST в зависимости от FMR (Кокбулакское месторождение)

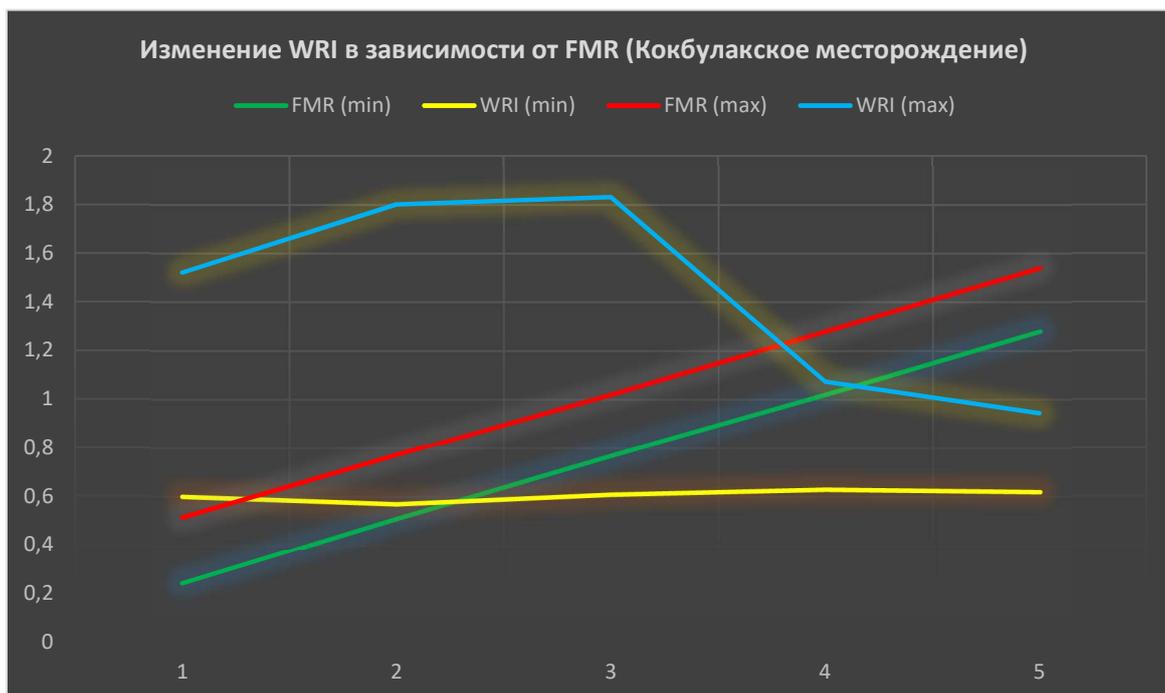


Рисунок 60 – Изменение WRI в зависимости от FMR (Кокбулакское месторождение)

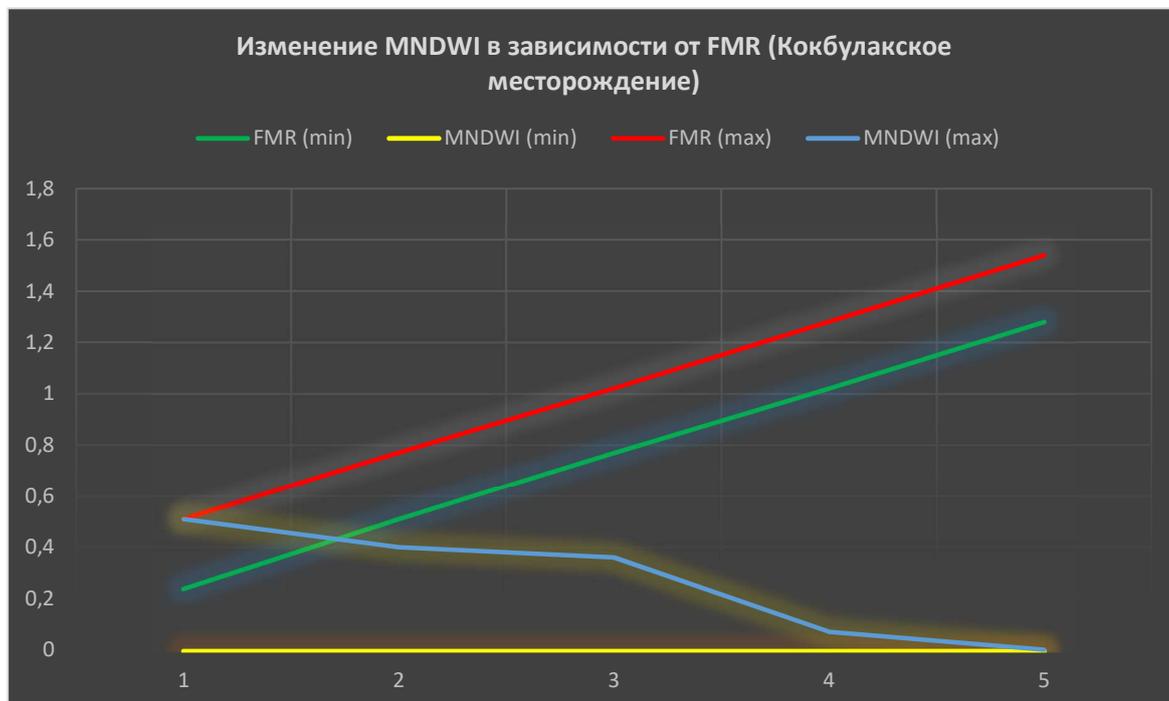


Рисунок 61 – Изменение MNDWI в зависимости от FMR (Кокбулакское месторождение)

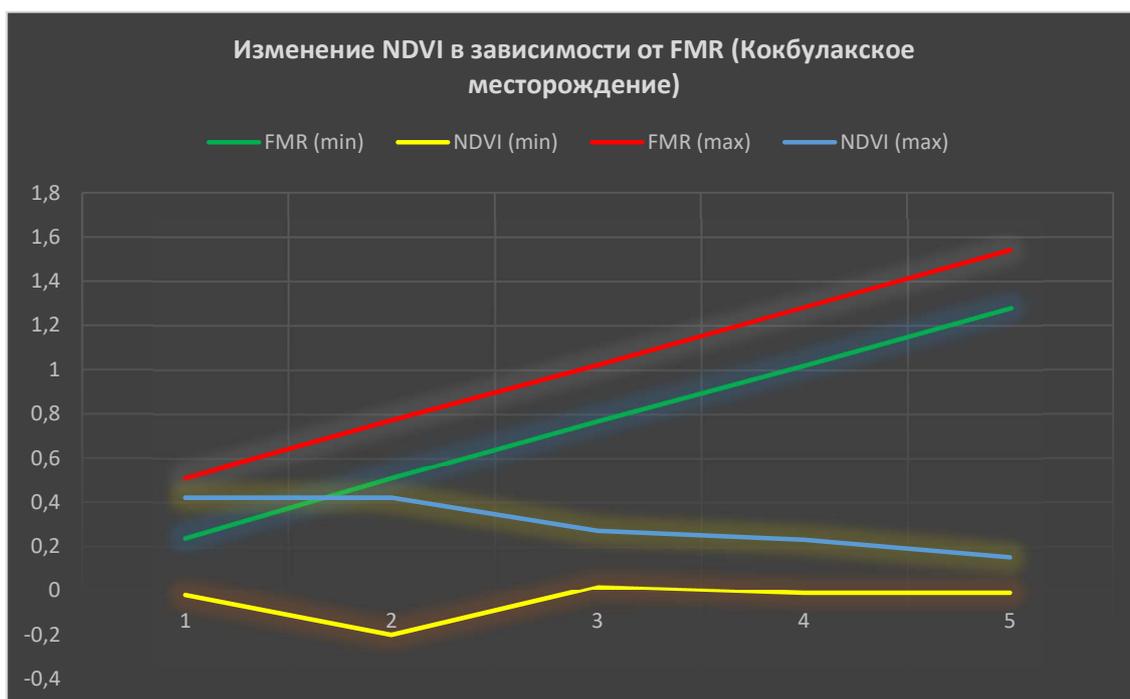


Рисунок 62 – Изменение NDVI в зависимости от FMR (Кокбулакское месторождение)

3.4 Сравнительный анализ результатов проведенных расчетов на участках Чумекского и Кокбулакского месторождения

Сравнительный анализ показывает, что на совершенно по природным условиям разных участках месторождения железной руды, закономерность распределения железной руды, а также систематичность изменении остальных индексов сохраняется. Можно сказать, в обоих случаях результаты практически идентичны. Это можно наблюдать в результатах, как и в табличном виде так и в диаграммах.

Казалось бы, Чумекское месторождение железной руды, находящиеся в высокогорной местности, где обилие рек, озер, растительности, снежных вершин имеет такие же результаты, как и Кокбулакское месторождение железной руды, с более жарким климатом, практически с нулевым растительным индексом и минимальной влажностью.

4 Выводы на основе анализа

На основе всех полученных результатов, также сопоставив все данные можно сделать следующие выводы:

- 1) самый высокий концентрат железа соответствует минимальному значению индексов MNDWI, NDVI, WRI, а также максимальному значению LST.
- 2) были сделаны пояснения к шкале (в разных диапазонах):

1	 0.256039 - 0.514001	поверхности высокой плотности
2	 0.514001 - 0.771963	растительного покрова, водные и
3	 0.771963 - 1.029925	снежные
4	 1.029925 - 1.287886	поверхности глинистые, почва
5	 1.287886 - 1.545848	высокий концентрат железа

Таким образом достигнуты поставленные задачи. Разберем выводы более детально. При определении различных индексов, мы получаем шкалу результатов в определенных диапазонах. К примеру, при расчетах водного индекса получаем результаты в диапазоне от 1 до 1. Пиксели со значением выше нуля, другими словами, плюсовые данные и есть водные поверхности. В ходе расчетов вегетационный индекс соответствует диапазону от 0,15 до 0,49, которое означает:

- в районах со значением 0,15 – 0,2 отсутствует всякой растительности,
- в диапазоне 0,2 – 0,3 низкая плотность растительного покрова,
- в диапазоне 0,3 – 0,49 средний коэффициент плотности,
- соответственно в диапазоне 0,49 – 1 означало бы высокую плотность растительного покрова, однако в районе исследования, в горной местности Чумекского месторождения железной руды, отсутствует леса и высокорослые деревья.

При подсчете индекса выделяющий влагосодержащие объект, в частности (индекс WRI), получаем результаты в диапазоне 0,53 – 1,64. На местности проведения расчетов, максимальное значение индекса влажности соответствует водным и снежным поверхностям, также высокой плотности растительного покрова.

Так же был посчитан индекс глинистости, с целью определения на местности участки почвы. Результаты в диапазоне 0,98 – 1,44. Данный индекс сложен в разьяснении, так как и индекс железистых минералов не имеет пояснительной части на полученные результаты.

Большую роль при определении закономерностей и систематичных изменении или же сохранении значении индексов сыграло индекс LST –

температура поверхности земли. Данный индекс является самой сложной в расчетах и самой интересной в плане результативности. На разных снимках в зависимости изменения времён года, погодных условий и так далее, результаты всегда разнообразны, что в принципе ожидаемо. В нашем случае температура составляет от 1,81 градусов по Цельсию до 36,96 градусов по Цельсию. Учитывая высокогорные условия местности, с заснеженными вершинами, а также наличие множество рек и озер, полученные значения температуры можно считать вполне корректными.

Посмотрев на результаты выраженных в таблицах и диаграммах, отчетливо можно заметить:

первые три класса индекса железной руды всегда соответствует максимальным или же по крайней мере близкой к максимальным значениям индексов воды, растительности, влажности.

участки, на которых расположены зоны имеющие значения четвертого класса железа, соответствующий диапазону 1,029925 – 1,287886, всегда имеют максимальное значение индекса глинистости (Clay minerals ratio).

по логике исключения, или же на основе полученных данных, есть возможность сделать утверждение, что пятый класс имеющий диапазон значений 1,287886 – 1,545848 и есть участки, где наблюдается высокий концентрат железа.

То есть, если выбрать участки с минимальными значениями индексов воды, растительности, влажности, также при высокой температуре поверхности с высокой вероятностью мы рассчитаем местоположение железной руды.

4.1 Разработка собственного метода по поиску железной руды методами ГИС

Целями данной диссертационной работы являются, изучение существующих методов поиска железной руды методами ГИС, а также создание собственного метода. Данные цели и задачи были поставлены с мыслью изучения развивающихся методов в современном мире, так как технологии сбора, анализа, хранения и визуализации данных развивается с каждым днем. В свою очередь понятие «современный метод» означает улучшение аналоговых методов, сокращение бюджетных затрат, получение сравнительных и корректирующих данных. Всё это в совокупности, одним словом, улучшает качество и точность получаемых данных, ускоряет весь процесс исследования и разведки.

Попытки создания собственного метода поиска железной руды, связаны не только с актуальностью данной темы, но и с появившимися проблемами в ходе исследования. Все вытекающие проблемы в существующих методах связаны с отсутствием пояснительных частей к полученным результатам, в связи с чем, все

вышеуказанные методы не пользуются популярностью в практическом применении. Решение всех проблем позволило определить ранее не известные особенности индексов касательно железа, также систематизирование полученных результатов позволило построить новый, уникальный метод по определению местоположения железной руды на местности.

Для построение собственной формулы использовались выводы, полученные из предыдущих расчетов. Система нового метода:

- 1) Определение на местности индексов MNDVI, NDVI, WRI, LST;
- 2) Разделение индексов воды, растительности, влажности и температуры на 10 классов;
- 3) Определение индекса железистых минералов – FMR;
- 4) Переклассификация. Разделение результатов индекса железа на пять классов;
- 5) Преобразование растровых данных в полигоны;
- 6) Построение формулы по определению высокого концентрата железа на местности.

Первые четыре стадии были описаны в главах с третьего по четвертый. Пятая стадия, состоит из сбора в одну формулу всех полученных данных. Формула была написана с помощью инструмента «Weighted Sum». Для начала к каждому входным данным присваивается вес. То есть чем ближе к минимальному своему значению, тем больше вес слоя. Это относится к индексам MNDVI, NDVI, WRI. Что касается температуры поверхности земли, по предыдущим расчетам выяснялось, что температура растет прямо пропорционально классу индекса железа, то есть чем выше класс, тем выше температура. В связи с чем по мере повышения температуры поверхности земли растет и его вес. Вес присваивается в виде числового коэффициента от 1 до 10. Суть присваивания веса выглядит это следующим образом:

Индексы MNDVI, NDVI, WRI:

max значение – вес равен 1 (единице);

min значение – вес равен 10 (десяти).

Индекс LST:

max значение – вес равен 10 (десяти);

min значение – вес равен 1 (единице).

Далее с помощью инструмента «Взвешенная сумма» выбираются входные данные, далее присваивается процент влияния на каждый слой. Процент влияния указывается в %, что в свою очередь определяет, насколько тот или иной слой влияет на конечный результат.

$$(MNDVI40%)*(NDVI20%)*(WRI20%)*(LST20%)=FMR \quad (14)$$

Данное соотношение слоев, было выбрано не случайно. Данная формула заработало далеко не с первой попытки. Планировалось создать формулу, которая работала бы на любых участках, с совершенно разными физико-географическими и природными характеристиками.

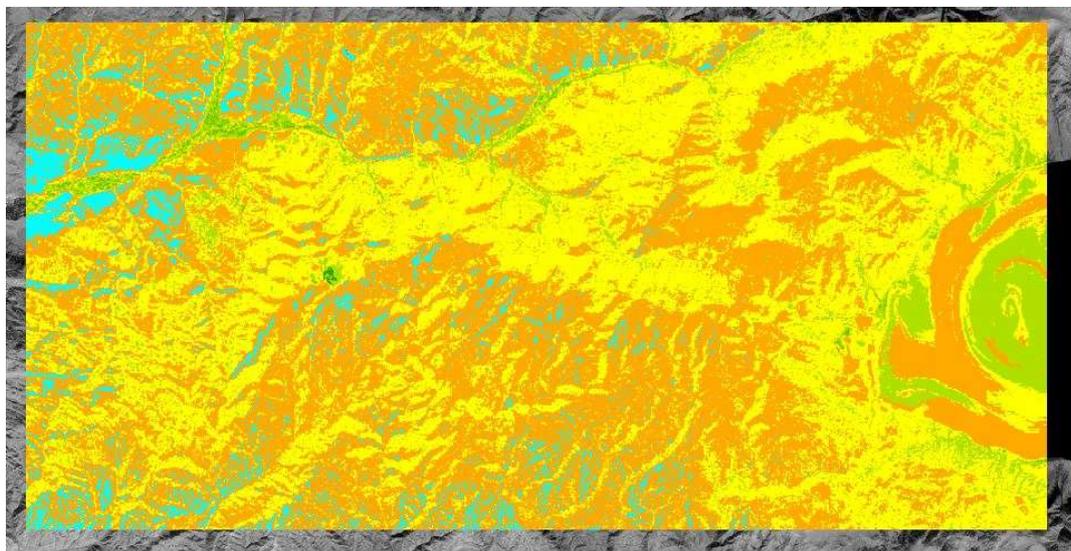


Рисунок 63 – Результат, полученный по новой формуле

Но с каждой попыткой подбора процентного влияния становилось очевидно. Одна и та же формула не может работать корректно при разных особенностях той или иной местности. Так как все расчеты проводились не только не Чумекском месторождении, но и в Кокбулакском месторождении железной руды, которая совершенно отличается физико-географическим положением, поэтому все результаты полученные, по новому методу подвергались сравнительному анализу. Именно на данном этапе было замечено несходства в результатах между новым с старым методами. Однако это не является отрицательной стороной нового метода, скорее наоборот.

Возможность корректировки элементов формулы, сохраняя основную логику, которая заключается в определении минимальных значений индексов водного нормализованного, вегетационного, коэффициента влажности, также максимального значения температуры поверхности земли, обеспечивает применение одной формулы на любых территориях. При этом есть возможность учитывать особенности той или местности. Данный момент делает новый метод по своему уникальной.

На рисунке 63, голубым цветом выделен пятый класс (самый высокий диапазон), что соответствует красному цвету в рисунке 64. Визуально заметно, что результаты практически идентичны. Это говорит о корректности

выявленных гипотез, систематических изменений других индексов в зависимости от наличия железной руды.

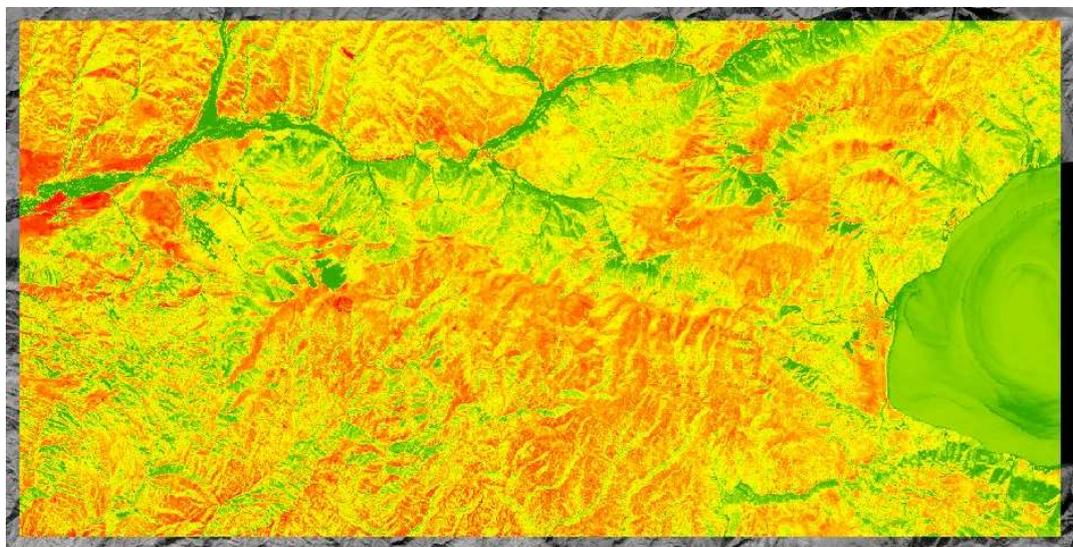


Рисунок 64 – Результат, полученный по формуле FMR

В геодезии и картографии необходимы проверочные данные, для сравнения, анализа, корректировки и так далее. Результаты моей исследовательской работы позволяют это сделать. При должной мере изучении индексов и обработке космоснимков можно производить разведку полезных ископаемых на основе бесплатных данных не выходя из офиса. Что в свою очередь является экономически выгодным решением для многих задач.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследовательской работы, удалось выполнить все поставленные задачи, и достигнуть цели, произвести разведку полезных ископаемых методами ГИС. Если скомпоновать все сделанные выводы и результаты:

- Удалось применить систему корреляции в расчетах индексов. Корреляция – это математический термин, означающий взаимозависимость среди чисел. При расчетах различных индексов было зафиксировано связь между различными явлениями. Что в свою очередь послужило основой или же сутью всех дальнейших расчетов и выявленных гипотез.

- Получить закономерность распределения железной руды. При выполнении различных практических задании в период обучения, было заметно что существует определенная закономерность в распределении значения индексов. Выдвинуто логическая гипотеза «В зависимости от другого природного явления и физико-географических описании местности, можно предсказать зону и закономерность распространения определенного индекса». Благодаря расчетам основанных на термине корреляции, удалось определить ту самую закономерность.

- Получить пояснение к шкале индекса FMR. При изучении существующих методов поиска железной руды, обнаружили ряд проблем, связанных с отсутствием пояснительной записки к полученным результатам, также с различиями в конечных результатах в зависимости от исходных данных на одной и той же местности. В ходе работы были исключены все проблемы и явные минусы существующих методов.

- Построить собственную формулу поиска железной руды. Совокупность ряда действий, таких как:

- аналитическое изучение существующих методов;

- решение выявленных проблем;

- определение закономерностей;

- систематизирование всех выводов и заключении, удалось, построить новый, уникальный метод по разведке полезных ископаемых. Построена гибкая формула, которую можно подкорректировать в зависимости от особенности местности, для определения местоположения железной руды. Огромным плюсом данной исследовательской работы является не только конечный результат, но и весь проделанный путь к этому результату. Весь процесс, алгоритм действия сам по себе является методом исследования, которое можно использовать при изучении и других явлениях не только для разведки полезных ископаемых.

Данная диссертационная работы была выполнена на программном обеспечении ArcGIS. Все исходные данные являются бесплатными, и находятся в открытом доступе. Может показаться что использование в качестве исходных бесплатных исходных, не отличающиеся точностью не целесообразным и не

актуальным. Это не так. Использование данных, находящиеся в открытом доступе означает, что без каких-либо затруднений любая организация или же специалист может провести исследовательские работы. Конечно, существуют космоснимки, предназначенные целенаправленно на разведку и поиск полезных ископаемых. Эти данные весьма точны, но за точность нужно платить, в буквальном смысле эти снимки являются платными. К таким источникам можно отнести миссии «WorldView», «GeoEye». Так же для полноты картины необходимо провести результатов расчетов с результатами полевых измерений, что поспособствует качеству, точности и актуальности конечных результатов.

Однако, вышеуказанные моменты являются не недостатком работы, а возможностью её улучшения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гурвич И.И., Номоконов В.П., Недра Справочник геофизика 1990г.
2. Методическое руководство на способ ОГТ МПВ, ЗапСибНИИГеофизика
3. Жезказганское месторождение // Казахстан. Национальная энциклопедия. - Алматы: Қазақ энциклопедиясы, 2005. - Т. II. - ISBN 9965974632.
4. Собрание трудов: В 8ми т. Т.2: Минеральные ресурсы Казахстана: цветные металлы / Редкол.: Ш.Ч.Чокин (гл.ред.) и др.; Мво науки АН РК, Центр.гос.архив РК. 1998. 312 с.: ил.:8 л.ил.:1 л.портр.
5. Сатпаев К.И. Основные специфические особенности геологии и металлогении ДжебказганУлутаусского района (материалы к металлогенической прогнозной карте Ц.Джебказгана). АлмаАта, Наука КазССР.
6. Инструкция по сейсморазведке. Москва, 2000 г
7. Методическое руководство по содержанию, оформлению и порядку представления на государственную экспертизу недр материалов техникоэкономического обоснования кондиций на твердые полезные ископаемые. Министерство энергетики и минеральных ресурсов РК, ГКЗ, 2008 г.
8. Классификация запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых (приложение 1 к Инструкции о проведении геологоразведочных работ по стадиям (твердые полезные ископаемые). Министерство энергетики и минеральных ресурсов РК, 2006 г.
9. Борисенко А.С. Изучение солевого состава растворов газовойжидких включений в минералах методом криометрии //Геология и геофизика, 1977, №8, с. 1628
10. Глазнев В.В. Система для создания трехмерных моделей геологических объектов // Вестн. Воронеж. унта. Сер. геол. 2000. №8. –С.205207
11. Байбатша А.Б., Кулкашев Н.Т., Бекботаева А.А., Шакирова Г.С. Перспективы Казахстана на выявление нетрадиционных типов месторождений цветных и благородных металлов//Материалы Международной конференции: Современные проблемы геологии и разведки полезных ископаемых. Томск, 2010. – с. 402404
12. Van Buren R., Turner G., and Hird G. Modern seismic is illuminating the depths (DOI https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1952_27_van_Buren)
13. Лурье И. К. Геоинформационное картографирование. Методы геоинформатики и цифровой обработки космических снимков: учебник. 2е изд., испр. М.: КДУ, 2010.
14. ГКИНП (ГНТА)0202809 Инструкция по топографической съемке в масштабах 1:5 000, 1:2 000, 1:1 000, 1:500. Агентство Республики Казахстан по управлению земельными ресурсами. Геодезические, картографические инструкции нормы и правила. Астана 2009. Утверждены приказом Агентства

Республики Казахстан по управлению земельными ресурсами от 15 декабря 2009 г., № 222П.

15. НИИ МО РФ, ЦНИИГАиК имени Ф. Н. Красовского. Часть 3. Термины и определения // ГОСТ 28441-99. Картография. Термины и определения / Внесён Госстандартом России. - Взамен ГОСТ 2844190. - М.: ИПК Издательство стандартов, 2000. С. 2. 15 с. (ГОСТ).