

НЕКОММЕРЧЕСКОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«КАРАГАНДИНСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
АБЫЛКАСА САГИНОВА»

УДК 550.422

На правах рукописи

БЛЯЛОВА ГУЛИМ ГАЛЫМЖАНОВНА

**«Исследование влияния геодинамических процессов на накопление
элементов-примесей в угленосных формациях мезозоя Центрального
Казахстана для разработки прогнозных критериев»**

Образовательная программа 8D07201 «Геология и разведка месторождений
полезных ископаемых»

Диссертация на соискание степени
доктора философии (PhD)

Отечественный научный консультант
Копобаева А.Н. – PhD,
ассоциированный профессор
Зарубежный научный консультант
Сунгатуллин Р.Х. –
д.г.-м.н., доцент

Караганда, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ	15
1.1 Стратиграфические и литолого-фациальные особенности угленосных формаций	16
1.2 Геодинамическая позиция Центрального Казахстана	19
1.3 Современные концепции и направления исследований	21
1.4 Геохимические исследования углей и их значение для бассейнов Центрального Казахстана	22
Выводы	23
ГЛАВА 2 МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ И АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГЕОХИМИЧЕСКИХ РАБОТ	25
2.1 Опробование угленосных отложений	25
2.2 Аналитические методы. Методы определения элементного состава (ИНАА, ICP-AES, ICP-MS)	28
2.2.1 Инструментальный нейтронно-активационный анализ (ИНАА)	28
2.2.2 ICP-AES и ICP-MS анализы	31
2.2.3 Гравиметрический метод	36
2.3 Минералогические исследования	37
2.3.1 Сканирующая электронная микроскопия	37
2.3.2 Порошковая рентгеновская дифрактометрия	41
2.4 Методика обработки информации	42
ГЛАВА 3 ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ И МЕЗОЗОЙСКОЕ УГЛЕОБРАЗОВАНИЕ ЦЕНТРАЛЬНОГО КАЗАХСТАНА	45
3.1 Геотектоническое положение Центрального Казахстана в мезозое	46
3.2 Классификация бассейнов осадконакопления	52
3.3 Эволюция мезозойских угленосных бассейнов Центрального Казахстана	58
3.3.1 Общие геодинамические условия мезозоя	58
3.3.2 Мезозойские субсиденционные зоны	59
3.3.3 Этапы мезозойского углеобразования	60
3.3.4 Классификация угольных бассейнов по геотектоническому положению	61
3.4 Особенности строения и угленосности месторождения Шубарколь и бассейна Майкубенъ	61
3.4.1 Месторождение Шубарколь	63
3.4.2 Майкубенский бассейн	66
3.5 Пространственная фациальная дифференциация угленосных отложений	67
3.6 Сравнительная характеристика месторождений Шубарколь и Майкубенский бассейн	72
Выводы	73

ГЛАВА 4 ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ-ПРИМЕСЕЙ В УГЛЯХ ЦЕНТРАЛЬНОГО КАЗАХСТАНА	75
4.1 Общая геохимическая характеристика углей и уровень накопления элементов-примесей	75
4.2 Особенности распределения элементов-примесей и редкоземельных элементов в углях Центрального Казахстана	76
4.3 Геохимическая дифференциация редкоземельных элементов в углях Центрального Казахстана	81
4.4 Закономерности распределения элементов-примесей в углях мезозоя Центрального Казахстана	87
4.4.1 Методические подходы и общая характеристика корреляционного анализа	87
4.4.2 Геохимические ассоциации петрогенных компонентов, микроэлементов и редкоземельных элементов в углях	90
4.4.3 Результаты кластерного и факторного анализа элементного состава углей месторождения Шубарколь	96
4.5 Источники и пути поступления элементов-примесей в угленосные отложения	103
Выводы	112
ГЛАВА 5 МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ СОСТАВ И ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ-ПРИМЕСЕЙ В УГЛЯХ	114
5.1. Породообразующие и глинистые минералы углей	114
5.2 Акцессорные и вторичные силикатные и оксидные фазы.	116
5.2.1 Мусковит, анатаз и палыгорскит: условия формирования и генетическая интерпретация	116
5.2.2 Циркон и бадделеит как концентраторы Zr, Hf, Nb и Ta	118
5.3 Минеральные формы нахождения РЗЭ в углях	120
5.3.1 Фосфатные формы редкоземельных элементов	121
5.3.2 Карбонатные формы редкоземельных элементов	123
5.3.3 Оксидные и гидроксидные формы РЗЭ	124
5.3.4 Акцессорные кластогенные минералы как носители РЗЭ	124
5.3.5 Органо-минеральные формы и переходные механизмы фиксации РЗЭ	125
5.3.6. Формы нахождения РЗЭ в углях Майкубенского буроугольного бассейна	126
5.4. Сульфидная и сульфатная минерализация в углях	129
5.4.1 Железистые минералы	129
5.4.2. Полиметаллические сульфиды	133
5.4.3. Сульфаты	137
5.5. Самородные элементы	140
5.6. Генетическая интерпретация минералообразования	141
Выводы	143
ГЛАВА 6 ПОИСКОВЫЕ КРИТЕРИИ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ-ПРИМЕСЕЙ В УГЛЕНОСНЫХ ФОРМАЦИЯХ МЕЗОЗОЯ	

ЦЕНТРАЛЬНОГО КАЗАХСТАНА	145
6.1 Методологические основы формирования поисковых критериев	145
6.2 Геодинамические поисковые критерии	146
6.3 Геохимические поисковые критерии	147
6.4 Минералого-геохимические и литолого-фациальные поисковые критерии	148
6.5 Система поисковых критериев накопления элементов-примесей	149
6.6 Применимость разработанных критериев	151
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	152
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	158
ПРИЛОЖЕНИЕ А	167

Обозначения и сокращения

ИНАА – инструментальный нейтронно-активационный анализ

ЭП – элементы-примеси

ICP-AES – атомно-эмиссионная спектрометрия с индуктивно связанной плазмой

ICP-MS – масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (Inductively coupled plasma mass spectrometry)

ЕТ-AAS – электротермическая атомно-абсорбционная спектрометрия

SEM-EDS – Сканирующий электронный микроскоп

LREE – легкие редкоземельные элементы

HREE – тяжелые редкоземельные элементы

UCC – Верхняя континентальная кора

РЗЭ – редкоземельные элементы

ВСЕГЕИ – Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского

ИМГРЭ – Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов

ЦКПГО – Центрально-Казахстанское производственное объединение

ДГФЭ – Дзержинско-геофизическая экспедиция

ЦКЭ - Центрально-Казахстанская экспедиция

ТЭС – тепловая электростанция

ЦАСП – Центрально-Азиатский складчатый пояс

HFSE – высокозарядные элементы

г/т – грамм на тонну

мкг/кг – микрограмм на килограмм

ЦАОП – Центрально-Азиатский орогенный пояс

ВПП – вулканно-плутонический пояс

ТМА – тектоно-магматическая активизация

ОВ – органическое вещество

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Уголь в современных условиях следует рассматривать не только как традиционный источник первичной энергии, но и как важный минерально-сырьевой ресурс мировой экономики, играющий значимую роль в развитии многих стран, включая Республику Казахстан. Несмотря на устойчивую тенденцию к снижению доли угля в глобальном энергетическом балансе, его потребление в средне- и долгосрочной перспективе сохраняет стратегическое значение, что обусловлено стабильным спросом, развитой инфраструктурой и высокой обеспеченностью ресурсной базы.

Казахстан, являясь одним из крупнейших эмитентов парниковых газов в Центральной Азии, последовательно интегрируется в глобальную климатическую повестку. Ратификация Парижского соглашения в 2016 году, а также объявленная в 2020 году *Стратегии достижения углеродной нейтральности Республики Казахстан до 2060 года* определили необходимость трансформации национального энергетического сектора. Одновременно в рамках **Национального проекта «Зелёный Казахстан»** и документов, регламентирующих развитие минерально-сырьевого комплекса, подчёркивается необходимость научно обоснованного и комплексного использования традиционных видов сырья, включая уголь, в переходный период к низкоуглеродной энергетике. В этих условиях угольные месторождения рассматриваются не только как источник энергии, но и как объект углублённых геолого-геохимических исследований, направленных на выявление дополнительных ресурсных и прогнозно-поисковых возможностей.

В этой связи особую *актуальность* приобретает комплексное геохимическое исследование углей как минерального сырья, включающее анализ распределения элементов-примесей и минеральных форм их нахождения, которые являются важнейшими индикаторами условий формирования угленосных формаций. Содержание и геохимическая специализация редкоземельных и сопутствующих элементов в углях отражают особенности источников вещества, гидрогеохимическую обстановку торфяников, а также геодинамические условия осадконакопления и последующей эволюции угленосных бассейнов.

В условиях развития современных концепций глобальной геотектоники и теории углеобразования, рассматривающих формирование угольных месторождений как элемент единого процесса эволюции литосферы, возрастает значимость анализа угленосных формаций с позиций актуальных геодинамических моделей. Для мезозойских угленосных формаций Центрального Казахстана, сформированных в пределах Центрально-Азиатского складчатого пояса, определяющее значение имели унаследованные разломно-блоковые структуры и постколлизийные геодинамические процессы, контролировавшие субсиденцию бассейнов,

фациальную дифференциацию осадков и условия накопления элементов-примесей в углях.

Особый научный и практический интерес представляют редкоземельные элементы в углях, которые, с одной стороны, являются информативными геохимическими индикаторами палеоокислительно-восстановительных и гидрогеохимических условий, а с другой – рассматриваются как потенциальный нетрадиционный источник стратегически значимого минерального сырья. В этой связи актуальной задачей является разработка научно обоснованных прогнозных критериев выявления угленосных формаций с повышенными содержаниями элементов-примесей на основе интеграции геохимических, минералогических и геодинамических данных.

Исследование влияния геодинамических процессов на накопление элементов-примесей в угленосных формациях мезозоя Центрального Казахстана является актуальной научной и прикладной задачей, имеющей фундаментальное значение для развития угольной геологии и геохимии, а также практическую значимость для прогнозных и оценочных работ в условиях трансформации энергетической стратегии Республики Казахстан.

Цель работы – установление геохимических и минералогических закономерностей накопления и форм нахождения элементов-примесей в углях мезозойских угленосных формаций Центрального Казахстана для обоснования их связи с геодинамическими условиями формирования угленосных бассейнов и на основе этого разработка прогнозных критериев.

Для достижения поставленной цели в работе предусматривалось решение следующих **задач**:

1. Проанализировать современное состояние изученности геохимии и минералогии элементов-примесей в углях, а также существующие представления о роли геодинамических факторов в формировании угленосных формаций мезозоя с учётом унаследованных разломно-блоковых структур Центрального Казахстана.

2. Изучить геохимический и минералогический состав углей исследуемых формаций и установить закономерности распределения элементов-примесей, определить минеральные формы нахождения в зависимости от литолого-фациальных условий формирования и положения в разрезе.

3. На основе статистической обработки геохимических данных установить устойчивые ассоциации элементов и факторов, контролирующих их накопление (корреляционный, кластерный и факторный анализы), а также выявить взаимосвязь геохимических и минералогических особенностей углей с геодинамическими условиями формирования и эволюции угленосных бассейнов мезозоя Центрального Казахстана.

4. Разработать прогнозные геохимические и минералогические критерии выявления угленосных формаций с повышенными содержаниями элементов-примесей.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Установлена закономерность пространственного распределения геохимических и минералогических примесей в мезозойских углях ЦК со структурно–геодинамическими факторами, при этом состав углей определяется палеоклиматическими условиями.

2. Установлены геохимические и минералогические индикаторы условий формирования редких элементов и РЗЭ под влиянием тектонической активизации (цинкит, сульфид кадмия) и дополнительного обогащения углей гидротермальными и вулканогенными флюидами.

3. Установлена закономерность формирования элементов примесей и их генетических типов под влиянием тектонически активной обстановки, формирующей устойчивые геохимические и минералогические ассоциации и определяющей геохимическую специализацию юрских углей месторождений ЦК.

4. Разработан комплекс геодинамических, геохимических и минералогических признаков для прогноза зон локального накопления РЗЭ и сопутствующих элементов в угленосных формациях мезозоя ЦК.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в возможности использования полученных результатов при прогнозно-поисковых и оценочных работах на угленосных площадях. Разработанные геохимические и минералогические критерии, апробированные на углях Центрального Казахстана, могут быть адаптированы для применения к угленосным формациям различного возраста с учётом их геолого-структурных и литолого-фациальных особенностей. Результаты исследования могут быть использованы в геологоразведочной практике, научно-исследовательских работах и в образовательном процессе при подготовке специалистов геологического профиля. Результаты научных исследований внедрены в производство АО «Шубарколь комир» (Приложение А).

Защищаемые положения:

1. Мезозойское углеобразование Центрального Казахстана носило тектонически обусловленный характер и контролировалось унаследованным разломно-блоковым строением Центрально-Азиатского складчатого пояса, что отражается в распределении геохимических и минералогических характеристик углей. В условиях пульсационного режима субсиденции постколлизийных прогибов тектонический фактор определял геохимическую специализацию угленосных формаций, тогда как климатические условия носили подчинённый, модифицирующий характер.

2. Установлено, редкоземельные и сопутствующие элементы в мезозойских углях Центрального Казахстана локализуются преимущественно в аутигенных минеральных фазах (фосфатных, глинистых, сульфидных), а их накопление связано с тектонической активизацией и поступлением гидротермальных и вулканогенных флюидов, что подтверждается минеральными индикаторами и геохимическими ассоциациями.

3. Химический состав углей Шубаркольского месторождения характеризуется устойчивыми геохимическими и минералогическими ассоциациями элементов-примесей и их вертикальной и латеральной зональностью, обусловленными сочетанием литогенных, сорбционно-хемогенных и эпигенетических процессов, что подтверждено результатами кластерного и факторного анализа.

4. Разработан и обоснован комплекс геодинамических, геохимических и минералогических критериев выявления зон локального накопления редкоземельных и сопутствующих элементов-примесей в угленосных формациях мезозоя Центрального Казахстана; применимость комплекса подтверждена на примере Шубаркольского месторождения и Майкубеньского угольного бассейна, при этом геохимическая специализация юрских углей, включая распределение редкоземельных элементов и аномалии церия и европия, отражает влияние геодинамических и гидрогеохимических условий осадконакопления и диагенеза.

Методика исследований. Методологическая база сформирована с учётом действующих нормативных документов и современных международных подходов, принятых в угольной геологии и геохимии. При проведении исследований и подготовке диссертации широко использовались опубликованные, фондовые материалы и новейшие геолого-геохимические, минералогические данные по вопросам методики проведения, обработки и интерпретации аналитических данных с применением современных компьютерных технологий на аналогичных мировых и казахстанских месторождениях угля.

Исследование носит междисциплинарный характер, поскольку основано на интеграции методов геохимии, минералогии углей и углевмещающих пород, геологии угольных месторождений и математической статистики, что позволило комплексно оценить элементный состав углей, формы нахождения химических элементов и условия их формирования.

Полевые исследования включали детальное бороздовое опробование угольных пластов и углевмещающих пород с соблюдением требований репрезентативности и строгой стратиграфической привязки, что обеспечило формирование достоверной и сопоставимой выборки.

Лабораторные исследования основаны на применении современных высокоточных аналитических методов, широко используемых в международной геохимической практике. Основными методами определения элементного составов являлись методы ICP-AES на спектрометре iCAP 7600 Duo (Thermo Scientific, США) и ICP-MS на спектрометре Agilent 7700x (Agilent Technologies, Япония) в аналитическом центре ДВГИ ДВО РАН. Контроль качества аналитических данных осуществлялся с использованием стандартных образцов углей CLB-1 и SARM-19 (Геологическая служба США), а также путём параллельных измерений и сопоставления результатов для ключевых элементов. Дополнительно элементный состав проб определялся методом инструментальным нейтронно-активационным

анализом (ИНАА), выполненный в аккредитованной ядерно-геохимической лаборатории НИ ТПУ с использованием исследовательского ядерного реактора ИРТ-Т, что позволило определить содержания 28 элементов, включая редкоземельные и редкие элементы.

Минералогические формы нахождения элементов-примесей изучены с использованием комплекса современных минералогических методов, что позволило установить связь распределения элементов с органической и минеральной составляющими углей на микроуровне и обеспечить идентификацию минеральных ассоциаций и микрофаз, используемых в качестве минералогических индикаторов условий осадконакопления и постседиментационных преобразований. В исследовании применялись следующие методы и приборные комплексы:

- порошковая рентгеновская дифрактометрия (XRD) на дифрактометре ДРОН-ЗМ; съемка дифрактограмм выполнялась с использованием программного комплекса DIFRAC.Measurement, расшифровка дифрактограмм и идентификация минеральных фаз осуществлялись с применением программ EVA и TOPAS; работы проводились в НИ ТПУ (г. Томск, Россия);

- сканирующая электронная микроскопия (SEM-EDS) на микроскопе Hitachi S-3400N, оснащённом энергодисперсионным спектрометром Bruker X@Flash 5010, для проведения рентгеноспектрального микроанализа; исследования выполнены в НИ ТПУ (г. Томск, Россия);

- аналитическая сканирующая электронная микроскопия (SEM-EDS) на микроскопе JEOL JSM-6490LV с ЭДС INCA Energy X-Max, а также на двухлучевом сканирующем электронном микроскопе Tescan Lyra 3 XMN, укомплектованном ЭДС-спектрометром AZtec X-Max 80 Standart; исследования проведены в лаборатории микро- и наноисследований Аналитического центра ДВГИ ДВО РАН (г. Владивосток, Россия).

Обработка и интерпретация результатов выполнены с применением корреляционного, кластерного и факторного анализа (STATISTICA 10), что обеспечило объективную интерпретацию результатов в контексте геодинамической эволюции угленосных бассейнов и позволило обосновать научно подтверждённые прогнозные критерии накопления элементов-примесей в углях.

Фактический материал и личный вклад автора. В основу работы положены материалы, полученные автором за период обучения в докторантуре, а также в результате выполнения научно-исследовательских работ в рамках проектов, выполненных на кафедре «Геология и разведка месторождений полезных ископаемых» НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», финансируемых Министерством науки и высшего образования Республики Казахстан в качестве исполнителя:

1. AP08052608 договор № 64-1 от 15 мая 2020 г. (2020-2022 гг.);
2. AP13067779 договор № 120-КМУЗ от 20 мая 2022 г. (2022-2024 гг.);
3. AP26102801 договор № 309/25-27 от 29 сентября 2025 г. (2025-2027

гг.)

Часть аналитических исследований выполнялись автором самостоятельно, включая проведение процедур химической пробоподготовки углей и углистых пород с использованием азотной, хлорной и плавиковой кислот, а также определение элементного состава методами ICP-AES и ICP-MS на спектрометре 7600 Duo (Thermo Scientific Corporation, USA) и ICP-MS спектрометре Agilent 7700 (Agilent Technologies, USA) при помощи аналитика Зарубиной Н.В. в Аналитическом центре Дальневосточного геологического института ДВО РАН (г. Владивосток).

Научная стажировка пройдена в Российской Федерации, г. Казань, в Институте геологии и нефтегазовых технологий Казанского федерального университета в период с 23 мая по 3 июня 2023 г. В ходе стажировки были получены консультации по теме диссертационного исследования у доктора геолого-минералогических наук, доцента Сунгатуллина Р.Х. По результатам стажировки получен сертификат об успешном её прохождении.

В период научной стажировки совместно с зарубежным научным руководителем, профессором Сунгатуллиным Р.Х., выполнены кластерный и факторный анализы геохимических данных, а также проведена интерпретация полученных результатов. По итогам выполненных исследований опубликована совместная работа в высокорейтинговом научном журнале.

Достоверность выводов диссертации обеспечивается корректной постановкой задач, применением современных методов исследования и согласованием полученных результатов с аналитическими данными, включающих результаты анализа 140 проб углей и углевмещающих пород, полученных в ходе полевых исследований со строгой стратиграфической привязкой, а также применением комплекса современных, высокоточных и взаимодополняющих геохимических и минералогических методов, широко используемых в международной научной практике. Надёжность аналитических данных подтверждена использованием сертифицированных стандартных образцов, межметодическим сопоставлением результатов (ICP-AES, ICP-MS, ИНАА, SEM-EDS, XRD), проведением параллельных измерений и статистической обработкой данных с применением корреляционного, кластерного и факторного анализа. Интерпретация полученных результатов выполнена с учётом современных представлений об угольной геологии, геохимии и геодинамической эволюции угленосных бассейнов, что обеспечивает обоснованность и воспроизводимость полученных выводов.

Основные положения диссертации были опубликованы в научных статьях и тезисах докладов, а также имеется патент и свидетельства о государственной регистрации прав на объекты авторского права.

Все разделы диссертации выполнены в методической последовательности и логически взаимосвязаны, что обеспечивает целостность исследования и поэтапное решение поставленных научных задач, от сбора и анализа фактического материала до обобщения результатов и формулирования научно обоснованных выводов. Структура работы

отражает концепцию исследования, а используемые методы и подходы адекватны целям и задачам диссертационного исследования и соответствуют современному уровню развития угольной геологии и геохимии.

Личный вклад автора заключается в самостоятельном сборе и систематизации фактического материала, обработке геологических данных и результатов лабораторных исследований, проведении пробоподготовки и определении элементного состава углей методами ICP-AES и ICP-MS с использованием стандартных образцов, а также в подготовке и интерпретации схем, диаграмм, графиков и картографических материалов с применением современных программных средств (Microsoft Excel, CorelDRAW, AutoCAD, QGIS). Автором также выполнен анализ материалов по глубинному строению и геодинамическому развитию региона с опорой на современные теоретические представления, что позволило сформулировать обоснованные научные выводы и практические рекомендации.

Апробация работы. Результаты диссертационного исследования были апробированы и опубликованы в серии научных работ, отражающих основные положения и выводы настоящей диссертации. В период 2021-2025 гг. автором опубликовано 15 научных статей, в том числе в рецензируемых международных и отечественных журналах, индексируемых в базах Scopus и Web of Science.

Из них 6 статьи в международных рецензируемых научных журналах (*Web of Science Core Collection, Scopus*):

1) Blyalova G., Amangeldykyzy A., Kopobayeva A., Zhirkov V., Ryzhkov S. A Comprehensive Study of the Spatial Variations in the Distribution of Rare Earth Elements (REE) and Their Potential in the Coals of the Shubarkol Deposit, Kazakhstan //Minerals. – 2025. – Т. 15. – №. 2. – С. 170. <https://doi.org/10.3390/min15020170>

2) Копобаева А.Н., Блялова Г.Г., Амангелдіқызы А., Сунгатуллин Р.Х., Оразбек Н. Геохимические особенности Майкубеньского угольного бассейна (Казахстан) // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 9. – С. 135–150. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_9_0_135.

3) Kopobayeva A.N., Amangeldikyzy A., Blyalova G.G., Askarova N.S. Mineralogical and geochemical features of coals and clay layers of the Karaganda coal basin //Minerals. – 2024. – Т. 14. – №. 4. – С. 349. <https://doi.org/10.3390/min14040349>

4) Kopobayeva A.N., Amangeldikyzy A., Blyalova G.G., Askarova N.S. Features of rare earth elements geochemistry in coals of Central Kazakhstan. //Acta Geochimica – 2024. 43(5), 876-888. <https://doi.org/10.1007/s11631-024-00677-3>

5) Kopobayeva A.N., Blyalova G.G., Bakyt A., Portnov V.S., Amangeldikyzy A. The nature of rare earth elements accumulation in clay layers and coals of the Shubarkol deposit // News of the academy of sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences. – 2022; № 2(452). – P. 117-130. <https://doi.org/10.32014/2022.2518-170x.164>

6) Amangeldykyzy A. Kopobayeva A.N., Bakyt A., Ozhigin D.S. Blyalova G.G., Mineralogy and geochemistry of the Shubarkol deposit Jurassic coals // News of the academy of sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology

and technical sciences. – 2021. – Т. 5. – С. 23-31. <https://doi.org/10.32014/2021.2518-170X.94>

4 статьи в изданиях, рекомендуемых уполномоченным органом:

1) Blyalova G.G., Kopobayeva A.N., Amangeldykyzy A., Askarova N.S., Ozhigin D.S. (2023). Ways of rare earth elements migration and transportation to the coals of the Shubarkol deposit. *Kompleksnoe Ispolzovanie Mineralnogo Syr= Complex use of mineral resources*, 324(1), 24-33.

2) Amangeldikyzy A., Kopobayeva A.N., Blyalova G.G., Askarova, N.S. (2023). Geochemical speciation of coals in the Karaganda coal Basin. *Min. J. Kazakhstan*, 7, 15-20.

3) Kopobayeva A.N., Baydauletova I.V., Amangeldikyzy A., Askarova N.S., Blyalova, G.G. (2025). Nature of ree accumulation in clayey interlayers and coals in Karaganda coal basin. *Kompleksnoe Ispolzovanie Mineralnogo Syr= Complex use of mineral resources*, 332(1), 49-61.

4) Kopobayeva A., Amangeldikyzy A., Blyalova G., Askarova N. Study of the Distribution of Impurity Elements in Coals and Clay Layers of the Karaganda Coal Basin // Труды университета. – 2023. №3 (92) – С. 151-156. DOI 10.52209/1609-1825_2023_3_151.

А также были представлены в виде докладов на международных научно-практических конференциях:

1) Kabyken A., Kopobayeva A., Amangeldikyzy A., Blyalova G., Askarova N. Ulgibayeva B. (2024, October). A Tool for Analyzing Geological Data Using the Grade Copilot Neural Network Within the Micromine Software. In *2024 IEEE 6th International Symposium on Logistics and Industrial Informatics (LINDI)* (pp. 000015-000018). IEEE.

2) Копобаева А.Н., Амангелдіқызы А., Блялова Г.Г. Особенности геохимии РЗЭ в углях Центрального Казахстана // Международная научно-практическая конференция «К.И. Сатпаев и науки о Земле», Алматы 2024. С. 174-178.

3) Копобаева А.Н., Блялова Г.Г. *Представление о геодинамических обстановках углеобразования месторождения Шубарколь*. Международная научно-практическая конференция «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации» (XIV Сагиновские чтения), 2022г., г. Караганда, Казахстан. С. 61–63. ISBN 978-601-320-725-4.

4) Копобаева А.Н., Блялова Г.Г. *Источники поступления элементов-примесей в угли Шубаркольского месторождения*. Международная научно-практическая конференция «Интеграция науки, образования и производства» (XV Сагиновские чтения), посвящённая 70-летию Карагандинского технического университета им. Абылкаса Сагинова, 2023 г., г. Караганда, Казахстан. С. 455–458. ISBN 978-601-320-906-7.

5) Копобаева А.Н., Блялова Г.Г. *Условия накопления угленосных отложений мезозоя Центрального Казахстана*. Труды Международной научно-практической конференции «XVI Сагиновские чтения. Интеграция образования, науки и производства», 2024 г., г. Караганда, Казахстан. Ч. 2, с. 518–520. ISBN 978-601-355-377-1.

Результаты исследований внедрены в АО «Шубарколь Комир». Имеется акт внедрения. Основные положения диссертации апробированы в ходе научных стажировок, а также при выполнении научно-исследовательских работ, связанных с изучением геохимических особенностей углей Шубаркольского и Майкубенского угольных бассейнов.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, заключения, списка использованных источников. Общий объём диссертации составляет 166 страниц машинописного текста, включая 67 рисунков и 18 таблиц. Список использованных источников включает 109 наименований, в том числе работы отечественных и зарубежных авторов.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю, PhD, ассоциированному профессору кафедры «Геология и разведка месторождений полезных ископаемых» Копобаевой А.Н. за научное руководство, постановку задач, ценные научные консультации и замечания, а также за постоянную поддержку на протяжении всего периода обучения в докторантуре и на всех этапах выполнения диссертационной работы.

Особая признательность выражается зарубежному научному руководителю, доктору геолого-минералогических наук, доценту Сунгатуллину Рафаэлю Харисовичу за методическую помощь, научные консультации и содействие в интерпретации результатов исследования, полученных в ходе научной стажировки и отражённых в опубликованных работах.

Автор выражает благодарность преподавателям и сотрудникам кафедры «Геология и разведка месторождений полезных ископаемых» НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», коллегам и друзьям за поддержку и конструктивные обсуждения, способствовавшие выполнению диссертационной работы, а также PhD, заведующей кафедрой Исатаевой Ф.М., за помощь и содействие в организации исследования.

Особую благодарность и признательность автор выражает PhD, ассоциированному профессору Амангелдіқызы А., за постоянную научную поддержку, ценные советы и консультации, которые значительно способствовали успешному выполнению диссертационной работы.

Автор также выражает благодарность аналитику Зарубиной Н.В. (Аналитический центр ДВГИ ДВО РАН, г. Владивосток) за организацию и участие в проведении самостоятельных аналитических исследований, а также Косареву Я., студенту Казанского федерального университета (ИГНТ), за техническую помощь и содействие в работе с массивами геохимических данных.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Изучение угленосных бассейнов Центрального Казахстана началось ещё в конце XIX – начале XX века в связи с активным промышленным освоением угольных ресурсов. Первые геологические описания носили преимущественно разведочный характер и были направлены на выявление мощностей угленосных толщ и их стратиграфического положения. В советский период исследования приобрели системный характер: проводились комплексные работы по стратиграфии, литологии и тектонике, а также создавались обобщающие сводки по угленосным районам.

Историко-научный анализ позволяет выделить несколько ключевых этапов: разведочные (дореволюционные), регионально-геологические (1930-1950-е годы), и этап формирования современных геодинамических моделей (с конца XX века). В эти периоды были описаны угленосные свиты, построены стратиграфические разрезы и выявлены структурные особенности Майкубенского бассейна и Шубаркольского месторождения. Современный этап характеризуется широким применением геохимии, изотопных методов и палеогеодинамических реконструкций, что позволяет глубже понять механизмы угленакопления.

Изучение геохимии углей Центрального Казахстана имеет высокую научную и практическую значимость. С научной стороны это позволяет реконструировать условия осадконакопления, источники вещества и роль тектоно-геодинамических факторов. С прикладной – связано с выявлением и использованием критически важных металлов (REE, Ge, Sc и др.) в углях и золах, что открывает перспективы их промышленного извлечения. Информация о содержании элементов-примесей в углях Казахстана известна с 1930-х гг. (Любер, 1933; Сатпаев, 1935; Любер, 1937) и основывалась преимущественно на данных полуколичественного спектрального анализа, что ограничивало возможность объективной оценки уровней накопления большинства редких, цветных и радиоактивных металлов. Начиная с конца XX века стали публиковаться данные, полученные с использованием количественных методов анализа, таких как нейтронно-активационный, ICP-AES, ICP-MS и др. (Беляев, Педаш, 1989; Азизов, 1997; Абдуллин, 1999) [1]. Для Казахстана актуальность усиливается наличием аномальных содержаний редкоземельных элементов в бассейнах Шубарколь и Майкубень.

В данной главе представлен обзор ключевых научных публикаций, посвящённых угленосным бассейнам и, в частности, Центрального Казахстана (Майкубенскому бассейну, месторождению Шубарколь) (рис 1.1). Рассматриваются основные этапы изучения, современные подходы к интерпретации геодинамической обстановки, а также существующие концепции угленосности. Анализ и систематизация литературных источников позволяют выявить пробелы в исследовании и определить направления дальнейшего научного поиска, что имеет принципиальное значение для решения поставленных в диссертации задач.



Рисунок 1.1 – Схема расположения Майкубенского угленосного бассейна и месторождения Шубарколь в пределах Центрального Казахстана

1.1 Стратиграфические и литолого-фациальные особенности угленосных формаций

В научной литературе значительное внимание уделено стратиграфическим особенностям угленосных толщ, их литологическому составу, условиям осадконакопления, а также геодинамическим факторам, определявшим формирование и эволюцию бассейнов. При этом в исследованиях последних десятилетий особое место занимает анализ влияния тектонических процессов мезозойского и кайнозойского этапов на угленакопление, что позволяет по-новому оценить генезис угленосных формаций региона.

Большинство исследований, посвящённых угленосным бассейнам Центрального Казахстана, акцентирует внимание на стратиграфической приуроченности угленосных комплексов к мезозойским толщам и их литолого-фациальным характеристикам. В 1960-1980-х годах были предложены первые стратиграфические схемы, уточнены границы угленосных свит проведены межбассейновые корреляции. В более поздних исследованиях акцент сделан на фациальный анализ, позволяющий

реконструировать условия седиментации и локальные особенности бассейнов. Эти работы стали фундаментом для построения современных моделей угленакопления.

Классическим каркасом для стратиграфии и общей литологии мезозоя Центрального Казахстана остаётся том [2] «Геология СССР. Т. XX: Центральный Казахстан», где системно изложены юрско-меловые толщи, их разрезы, корреляции и палеоботанические/палеозоологические маркеры. Этот свод задаёт терминологию и границы стратиграфических подразделений, которыми оперируют более частные исследования по отдельным объектам:

- для Майкубенского бассейна характерна приуроченность угленосных толщ к мезозойским комплексам, с выраженной мощностью и разнообразием угольных пластов, что отражает длительную историю седиментации в условиях неустойчивой тектоники;

- Шубаркольское месторождение отличается более локализованным характером угленосности, приуроченной к свитам нижнего мела, с ограниченным стратиграфическим диапазоном. В научной литературе подчеркиваются литологические различия в угленосных толщах двух объектов, что отражает специфику условий осадконакопления.

Открытие Шубаркольского уникального месторождения угля явилось одним из важнейших достижений Центрально-Казахстанской экспедиции Геологического факультета МГУ. Ценность этого открытия значительно превышает расходы экспедиции за всю ее почти 45-летнюю деятельность. Угольное месторождение Шубаркольское было выявлено в 1983 г. на Сарысу-Тенизском поднятии в Шубаркольской впадине при проведении наземными геологосъемочными и геофизическими исследованиями масштаба 1:50 000 сотрудниками Центрально-Казахстанской экспедиции (ЦКЭ) Геологического факультета МГУ и Джезказганской геофизической экспедиции (ДГФЭ) Центрально-Казахстанского производственного объединения (ЦКПГО). Это месторождение получило название по одноименному бессоточному озеру Шубарколь (Шубаркуль), расположенному поблизости от угольной мульды [3].

Территория Сарысу-Тенизского поднятия начала изучаться геологами ЦКЭ с момента создания этой экспедиции профессором А.А. Богдановым в 1949 г. На этой площади в 50-х годах проводили государственную геологическую съемку масштаба 1:200 000 геологические партии под руководством В.Г. Тихомирова, О.А. Мазаровича, Ю.А. Зайцева, О.В. Минервина; затем, начиная с 1963 г., вели площадные геолого-съемочные работы масштаба 1:50 000 партии под руководством Л.Т. Протасевича, В.М. Фрейзона, О.В. Минервина, В.А. Голубовского, В.Н. Завражнова. В разные годы в составе партии работали геологи партии В.С. Костенаев-Дворникова, Р.Н. Соболева, А.В. Веймара, А.Л. Юриной, Н.В. Литвинович, М.В. Мартыновой, Т.Н. Воронцовой и др. К 80-м годам почти вся площадь поднятия была достаточно хорошо изучена и почти полностью покрыта кондиционной геологической съемкой масштаба 1:50 000.

В 1982 г. для завершения геологического изучения территории Сарысу-Тенизского поднятия в масштабе 1:50 000 по предложению главного геолога ЦКПГО И.В. Орлова и начальника отдела геолсъемки Н.Л. Габая по согласованию с руководством ЦКЭ (научный руководитель экспедиции Ю.А. Зайцев, главный геолог Е.А. Бабичев, научный руководитель группы партий Т.О. Федоров) были запроектированы соответствующие работы в пределах Шубаркольской впадины. Годом ранее на этой же площади были поставлены опережающие комплексные геофизические исследования масштаба 1:50 000 [3].

Впервые рабочие горизонты углей в Шубаркольской впадине были обнаружены в картировочных скважинах в юле 1983 г. Сотрудники ЦКЭ выявили уголь в двух скважинах на профиле X I II, расположенном поперек угленосной структуры (руководил бурением В.Н. Завражнов, документировал Д.К. Фролов), тогда же сотрудники ДГФЭ встретили уголь при заверке аномалий на восточном замыкании этой брахисинклинали (руководил бурением В.В. Гайдышев, документировала Л.С. Кирсанова).

Затем, при детализации профиля X I II, которую проводил Н.И. Буйнов с целью составления полного перекрытого разреза угленосных отложений, было выявлено положение основного угольного горизонта, его строение и максимальная мощность (27 м), что позволило оконтурить площадь развития угленосной толщи, проследить распространение этого горизонта по всей угленосной мульде, составить первую геологическую карту этой структуры в масштабе 1: 25 000 (О.М. Володина) и подсчитать прогнозные ресурсы угля по категории Р1 в количестве 1 млрд т с коэффициентом надежности 0,5.

После получения этих результатов в ноябре 1983 г. на основании собранных материалов и официальной заявки № 103, геологом В.М. Бекманом (Карагандинская геохимическая экспедиция ЦКПГО) был составлен проект на производство детальных поисков углей на площади Шубаркольской мульды. В этом проекте В.М. Бекман впервые предположил наличие угленосной толщи юрского возраста в пределах Шубаркольской впадины, и, соответственно, возраст углей принят юрским.

Проведенные в 1984 г. под руководством Ю.В. Яковенко детальные поисковые работы полностью подтвердили материалы официальной заявки №103, составленной в ноябре 1983 г. от имени сотрудников ЦКЭ и Д ГФЭ. После этого по инициативе генерального директора ЦКПГО Л.Ф. Думлера и генерального директора треста Карагандауголь Н.А. Дрижда было принято постановление Совмина Казахской ССР и Минуглепрома СССР, согласованное с Госпланом СССР и Мингео СССР о проведении ускоренной предварительной разведки Шубаркольского угольного месторождения с одновременным проведением детальной разведки на центральном участке месторождения с тем, чтобы в 1986 г. обеспечить попутную добычу угля, а в 1987 г. утвердить запасы углей в ГКЗ СССР [3].

Первые сведения о бурых углях Майкюбенского бассейна относятся к первой половине XIX в., когда началась их добыча небольшими шахтами для

Александровского свинцового завода. Всего с 1838 по 1872 г. было добыто около 40 тыс. т угля. Первые сведения о геологии бассейна принадлежат А. А. Краснопольскому, который еще на рубеже XIX и XX веков высказал предположение о юрском возрасте бассейна. После Октябрьской революции изучение угленосных отложений осуществлялось Н.Н. Тихоновичем (1919 и 1926 гг.), М.С. Волковым, В.П. Гуцевичем, М. Л. Скобниковым (1926-1928 гг.), Д.С. Коржинским, Н. Г. Кассиным (1938 г.) и др. Первые разведочные работы на небольшом участке бассейна проводились в 1932-1934 гг. К.Р. Гортваном и в 1938 г. Р.Я. Эмбахом. Общие перспективные запасы бассейна в 1937 г. оценены в 1 млрд, т (Афанасьев, 1937). В 1942 г. комбинатом «Майкаинзолото» заложен карьер производительностью 25 тыс. т угля в год, который работает до сих пор. Впервые истинные границы бассейна и основные черты его строения были установлены в конце 40-х годов в процессе среднемасштабной геологической съемки района, выполненной Н. А. Севрюгиным. Систематическое изучение бассейна в целом и детальная разведка наиболее перспективных его месторождений были проведены В. А. Ереминым и Н. А. Чичилейшвили в 1949-1960 гг. При этом уже к 1953 г. было доказано, что угленосные отложения имеют сплошное распространение на площади бассейна и включают три мощных угольных горизонта (ранее индексировавшиеся I-III, II-III и III-III, а в последнее время – I-III, II-III и I-T), которые в основных синклинальных структурах образуют наиболее перспективные месторождения. Общие запасы бассейна в 1954 г. В. А. Ереминым и А.А. Васильевым были оценены в 11 млрд, т, а в 1957 г. по основным шести угольным горизонтам, в 21010 млн. т, в том числе действительные и вероятные в 14 440 млн. т.

Гидрогеологические условия бассейна изучены А.А. Емельяновым. Крупномасштабная геологическая съемка производилась С.Н. Стуловым и А.К. Бувалкиным (1954 г.), литологические исследования – М.И. Ритенберг, углепетрографические – Н.М. Крыловой, палинологические – И.З. Фаддеевой, Е.И. Мураховской и Н.Г. Лыженковой, палеофитологические – Э.Р. Орловской и А.А. Померанцевой. Технологические исследования углей выполнены Московским горным институтом, институтами энергетики и химии АН КазССР и Карагандинским химико-металлургическим институтом [4].

1.2 Геодинамическая позиция Центрального Казахстана

Вопросы геодинамики угленосных бассейнов Центрального Казахстана занимают особое место в современной научной литературе. Исследователи отмечают, что угленакопление в регионе тесно связано с тектоническими перестройками, активизацией внутриконтинентальных процессов и формированием осадочных впадин в мезозое.

Основы тектоники этого региона были заложены в фундаментальных исследованиях Н.Г. Кассина и Н.С. Шатского. В основе тектонических

построений Н.Г. Кассина (1931, 1934, 1937) лежит представление о существовании на месте Казахстана докембрийской платформы.

Связь угленосных формаций с различными типами тектонических структур неоднократно подчёркивалась в работах исследователей, в том числе Ю.А. Жемчужникова, Г.А. Иванова, Г.Ф. Крашенинникова, А.К. Матвеева, Е.О. Погребницкого, Н.М. Страхова, П.П. Тимофеева, Н.И. Погребнова и В. А. Чекрыжева. И.Ю.) [1, 5-19].

Центральный Казахстан расположен в пределах Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП) – крупнейшего аккреционного орогена Земли. По обзорам современных представлений (Зоненшайн и др., 1990; Моссаковский и др., 1993; Sengor et al., 1993; Berzin, Dobretsov, 1993; Авдеев, 1994; Диденко и др., 1994; Шенгер и др., 1994; Берзин и др., 1994; Печерский, Диденко, 1995; Буслов, 1998; Пучков, 2000; Хаин, 2000; Филиппова и др., 2001; Атлас, 2002; Windley et al., 2002, 2007; Добрецов, 2003; Смирнов, Коробкин, 2003; Vyukadorov et al., 2003; Добрецов, Буслов, 2007; Xiao et al., 2009; Рязанцев и др., 2009; Дегтярев, 2010а,б; Ермолов, 2010; Буслов, 2011, Буслов, 2015)), главные тектонические единицы палеозой Казахстана были сформированы в позднем докембрии – палеозое в процессе закрытия Палеоазиатского океана в результате конвергенции Восточно-Европейского и Сибирского кратонов и образования суперконтинента Пангея-2 [1].

В отечественной литературе значительный вклад внесли А.А. Богданов (тектоническое районирование ЦК), и В.И. Серых (роль ультракислых гранитоидов и тектоно-метасоматических процессов).

По мнению Л.Я. Кизильштейна (Кизильштейн, 2003; Кизильштейн, 2005), угленосные отложения следует рассматривать как результат действия комплекса взаимосвязанных факторов, фиксируемых в литологическом составе, фациальной изменчивости и структурных особенностях угленосных толщ. При этом подчёркивается, что диагностическое значение имеют не отдельные признаки, а их совокупность, позволяющая реконструировать условия формирования угленосных бассейнов и выделять генетически различные типы угленосных формаций.

В работах В.В. Середина внимание сосредоточено на геохимии и минералогии углей как ключевых индикаторах условий их формирования. Он показал, что наряду с литологическими и фациальными признаками важную роль играют акцессорные минералы и химические элементы-примеси, фиксирующие как первичные источники поступления вещества, так и постседиментационную переработку. Такой подход дополняет концепцию Кизильштейна, позволяя использовать геохимические данные для более точной реконструкции геодинамических условий мезозоя в угленосных бассейнах Центрального Казахстана (Середин, 2005).

Таким образом, современные представления об угленосных формациях базируются на интеграции литолого-фациального анализа, геохимических и минералогических данных, и геодинамического подхода. Это позволяет рассматривать угленосные бассейны как индикаторы определённых этапов

геодинамического развития регионов и использовать их характеристики для разработки прогнозных критериев угленосности, распределения редкоземельных и сопутствующих элементов, а также оценки потенциальной минерализации углевмещающих толщ.

1.3 Современные концепции и направления исследований

В последние десятилетия на первый план выходят работы, посвящённые комплексному анализу угленосных бассейнов с использованием палеотектонических реконструкций, геохимических исследований и методов изотопной геологии. Современные исследования ориентированы не только на стратиграфию и литологию, но и на выявление факторов углеобразования в контексте глобальных геодинамических процессов. Современные модели акцентируют внимание на связи угленосных формаций с геодинамическими режимами – от рифтогенных до посторогенных впадин.

Классические работы McKenzie (1978) [20], Watts (2001) [21] и Cloetingh (1986) [22] заложили основы физики бассейнообразования. Согласно этим моделям, субсиденция контролируется растяжением литосферы, её последующей термической усадкой и флексурой под нагрузкой. Эти механизмы описывают траектории осадконакопления и скорость субсиденции, которые первично задают фациальные поля и потенциал угленакопления.

Учебник Allen & Allen [23] представил интегральную концепцию «бассейнов как геодинамических систем», где различаются рифтовые, внутриплитные и передовые (foreland) типы бассейнов. Аналогичные подходы развивал Einsele (1992) [24], а также коллектив под редакцией Reading (2009) [25], предложивший сопоставление типов бассейнов с ожидаемыми фациальными ассоциациями.

Классические схемы [23] сопоставляют типы бассейнов с тектоногенной обстановкой (рифтовые/внутриплитные, передовые, трансформные, пассивные окраины и т. д.) и ожидаемыми фациальными ассоциациями.

В последние годы получила развитие системная геодинамическая классификация бассейнов [26]. В отличие от классических схем, она учитывает не только тектонику литосферы, но и сублитосферные процессы, климатические факторы и наложенность эволюционных стадий. Такой подход особенно применим к Центральному Казахстану, где мезозойские угленосные впадины формировались в условиях сложного наследования палеозойских структур. В исследованиях отмечается, что Шубаркольский угленосный район (юго-запад региона) интерпретируется как постколлизийная рифтовая впадина юрского времени, возникшая в условиях внутриконтинентального растяжения. Майкубенский бурогольный бассейн (северо-восток региона) рассматривается как внутриконтинентальная структура растяжения. Его развитие происходило в условиях длительного

регионального прогибания и внутриплитной субсиденции, что способствовало формированию значительных ёмкостей осадконакопления.

Эти тектонические условия обеспечили накопление мощной толщи угленосных отложений юрского возраста, представленных в разрезе толщами бурых углей, переслаивающихся с аргиллитами и алевролитами. Формирование бассейна отражает общую тенденцию мезозойского бассейнообразования Центрального Казахстана, когда унаследованные палеозойские структуры подвергались реактивации в условиях посторогенного растяжения, создавая благоприятные условия для угленакопления.

1.4 Геохимические исследования углей и их значение для бассейнов Центрального Казахстана

Современные исследования выходят за рамки классического углеведения: они позволяют реконструировать процессы седиментации, источники терригенного и вулканогенного материала, роль гидротермальной активности и фациальной зональности. В то же время геохимия углей приобретает прикладное значение: в них выявлены промышленные концентрации редкоземельных элементов, германия, скандия и других критических металлов, что делает угли и продукты их переработки стратегическим сырьём для высокотехнологичных отраслей. Международные обзоры (Seredin, Dai, Hower, Finkelman и др.) подчёркивают значимость углей и зол ТЭС как потенциального источника критических металлов. Для Казахстана это особенно актуально: в бассейнах Шубарколь и Майкубень фиксируются REE-аномалии, что усиливает научный и экономический интерес к их изучению.

Классические монографии М.Е. Юдовича и М.П. Кетриса [27] формируют каркас геохимического анализа углей и осадочных пород: (1) нормирование содержаний по кларкам (UCC, «угли мира») и расчёт коэффициентов концентрации/обогащения; (2) отдельный анализ органической и минеральной составляющих с привязкой к индикаторам минералогии (Al_2O_3 , Ti, P_2O_5 , S); (3) диагностика элементных ассоциаций (литофильные/халькофильные и др.) и механизмов переноса/фиксации; (4) учёт логнормальности распределений и влияния зольности на вариабельность; (5) сопоставление с фациями и редокс-условиями. Эти приёмы используются далее для сопоставления Шубарколя и Майкубеня.

В работах С.И. Арбузова предложена прикладная схема диагностики и прогнозирования аномалий элементов-примесей в углях, сочетающая:

- 1) выделение генетических типов обогащения (терригенный/вулканокластический/гидротермально-сорбционный);
- 2) использование индикаторных ассоциаций (Li-Rb-Cs и Sc-V – связаны с глинисто-алюмосиликатной матрицей; Nb-Ta-Zr-Hf – тяжёлые минералы и вулканокластика; Ba-Sr – барит/карбонаты; Ge – органическая фаза и сульфиды; V-Ni – гумус под восстановительными условиями);

3) анализ РЗЭ-паттернов (La_n/Yb_n , δEu , δCe) для различения источников и условий;

4) нормирование и EF/КК-оценки относительно UCC/«углей мира», с учётом зольности и отдельного рассмотрения органической/минеральной долей. Эта схема применяется далее, как диагностический каркас при интерпретации данных по изучаемым объектам.

Отдельное направление исследований связано с промышленными концентрациями РЗЭ, Ge, Sc и др. Изучение редкоземельных элементов (REY) в углях сформировано работами В.В. Середина, Sh. Dai, Я.Е. Юдовича, М.П. Кетриса, R.B. Finkelman, J.C. Hower, G.M. Eskenazy, С.И. Арбузова и их школ; существенный вклад внесли и китайские кейсы (Ордос, Внутренняя Монголия).

Работы В.В. Середина [28] и S. Dai [29] показали, что обогащение углей редкоземельными элементами связано с комбинацией терригенных, вулканогенных и гидротермальных источников. Подобные выводы подтверждены международными обзорами (Hower et al.) [30], которые обозначили уголь и золу как потенциальное сырьё для критических металлов. Для мезозойских бассейнов Восточной Азии (Ордос, Фушунь) установлена связь вулканокластики и фациальной зональности с REE-аномалиями, что является важной аналогией для Центрального Казахстана.

Шубаркольское месторождение: опубликованы минералогическо-геохимические работы [31, 32, 33], включающие ICP-MS и SEM-EDS анализы, показавшие обогащение углей редкоземельными элементами, а также их приуроченность к глинистым минералам и фосфатам.

Майкубенский бассейн: данные приводятся в отечественных исследованиях, а также в классической работе Ритенберга и Фадеевой (1961) [34], описавшей нижнемезозойское угленакопление региона. В рамках настоящего диссертационного исследования использованы как собственные аналитические данные, так и материалы по бассейну Майкубень из фондов геологических архивов Республики Казахстан.

Выводы

Анализ отечественных и зарубежных исследований показал, что угленосные бассейны Центрального Казахстана (Майкубенский бассейн и Шубаркольское месторождение) обладают хорошо разработанной стратиграфической и структурно-геологической базой, сформированной в результате многолетних региональных и детальных геолого-разведочных работ. Установлены возраст, литолого-фациальные особенности угленосных толщ и общие закономерности их формирования в мезозойских внутриконтинентальных впадинах, унаследовавших палеозойские тектонические структуры Центрально-Азиатского складчатого пояса.

В то же время выявлено, что существующие модели угленакопления преимущественно ориентированы на описательный анализ стратиграфии и тектоники и в недостаточной степени интегрируют геодинамические

факторы с геохимическими характеристиками углей. Геохимические данные, полученные в ранних работах, основаны главным образом на полуколичественных методах анализа и не позволяют объективно оценить масштабы и генетическую природу обогащения углей редкими, редкоземельными и критически важными элементами. Современные количественные исследования (ICP-MS, INAA, SEM-EDS) показали наличие аномальных концентраций REE, Ge, Sc и сопутствующих элементов в углях Шубарколя и Майкубеня, однако эти результаты остаются фрагментарными и, как правило, не рассматриваются в едином стратиграфо-геодинамическом контексте.

Существенным пробелом современного состояния изученности является отсутствие системного сопоставления геохимических паттернов углей с литолого-фациальной зональностью, источниками терригенного и вулканогенного материала, а также с этапами тектонической эволюции бассейнов. Недостаточно исследованы механизмы концентрации редкоземельных элементов и других критических металлов в органической и минеральной составляющих углей, их связь с условиями седиментации, редокс-обстановкой и постседиментационными процессами.

Научная новизна настоящего исследования определяется необходимостью перехода от традиционного описательного подхода к комплексной интерпретации угленосных формаций, основанной на интеграции стратиграфических, геодинамических и геохимических данных. Это предполагает использование современных количественных методов анализа, диагностику генетических типов элементного обогащения и сопоставление угленосных бассейнов Центрального Казахстана в рамках современных геодинамических моделей бассейнообразования, а также определяет необходимость комплексного подхода, основанного на интеграции стратиграфических, литолого-фациальных, геодинамических и геохимических данных, что и обуславливает постановку целей и задач настоящего диссертационного исследования.

Выявленные в ходе обзора нерешённые вопросы и методологические ограничения обосновывают структуру и содержание Главы 2, в которой излагаются объекты исследования, применённые аналитические методы и методические подходы, направленные на получение новых данных о геохимических особенностях углей Шубаркольского месторождения и Майкубенского бассейна и их интерпретацию в контексте геодинамической эволюции региона.

ГЛАВА 2 МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ И АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГЕОХИМИЧЕСКИХ РАБОТ

В основу методологической части исследования положены стандартизированные рекомендации «Инструкции по изучению и оценке попутных твёрдых полезных ископаемых и компонентов при разведке месторождений угля и горючих сланцев» (1987), а также современные методические подходы зарубежных исследователей в области угольной геохимии. При этом использован интегрированный подход, включающий:

1. Стратиграфический и литолого-фациальный анализ угленосных формаций для установления пространственной и временной приуроченности угля;

2. Современные количественные методы геохимического анализа (ICP-MS, ICP-AES, нейтронно-активационный анализ, SEM-EDS) для определения концентраций редких и критических элементов в органической и минеральной фазах;

3. Интерпретацию геохимических данных в контексте геодинамической эволюции бассейнов, включая оценку источников вещества (терригенные, вулканогенные, гидротермальные) и условий осадконакопления;

4. Систематизацию и нормирование данных с использованием международных стандартов (UCC, «угли мира») для обеспечения сопоставимости с глобальными базами данных.

Такой подход обеспечивает надежную- методологическую основу для получения воспроизводимых и количественно достоверных результатов и позволяет напрямую связать геохимические характеристики углей с их стратиграфо-геодинамическим контекстом, что является ключевым условием научной новизны исследования.

Исследования включали полевые работы по отбору проб, лабораторные методы пробоподготовки, минералогические и геохимические анализы, а также методы статистической обработки результатов.

2.1 Опробование угленосных отложений

Основными задачами опробования являлись получение представительного материала для проведения аналитических исследований и обеспечения достоверной оценки содержания элементов в угольных пластах и углевмещающих породах, а также отбор представительных проб для определения форм нахождения элементов.

В процессе выполнения исследований пробы угля и глинистых прослоев отбирались бороздовым способом с исходной массой единичной пробы 1200-1500 г. Общее количество проб по месторождению Шубарколь составляет 120 шт. Отбор проб осуществлялся на Центральном и Западном разрезах месторождения – из горизонтов 2В, 1В и 1В2 с интервалом 30-50 см между участками отбора проб (рис. 2.1). При этом участки 1 и 2 расположены в пределах Западного разреза, участки 3-6 – в пределах

Центрального разреза. Схема отбора проб приведена на рис. 2.2. Дополнительно было отобрано 10 проб угля с отдельных участков Майкубенского бурогоугольного бассейна, включённых в анализ для расширения геохимического охвата региона. Схема отбора проб приведена на рис. 2.2 и 2.3.

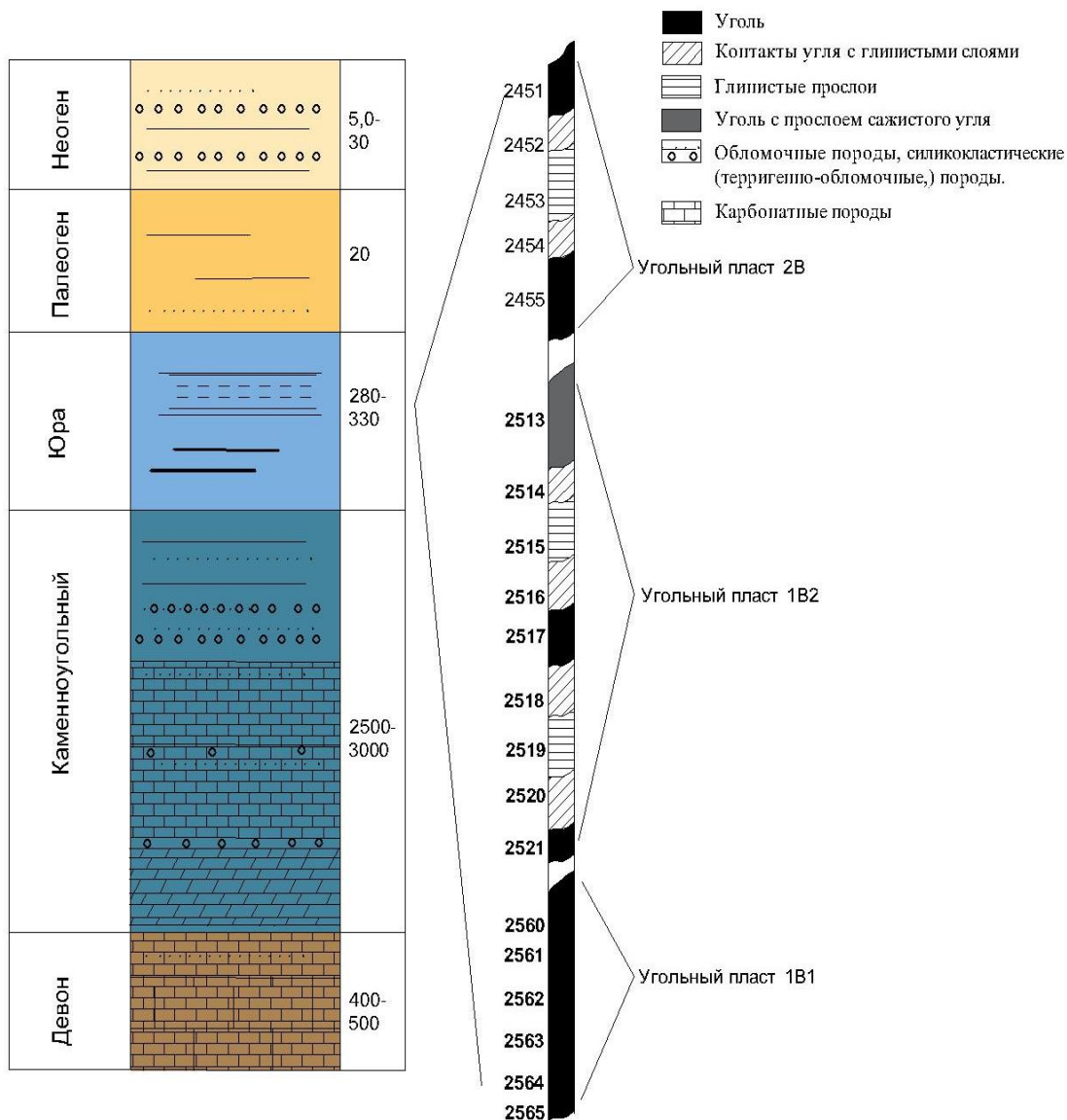


Рисунок 2.1 – Геологическая позиция угольных пластов на месторождении Шубарколь

Выбор участков для отбора проб из глинистых прослоев осуществлялся с учётом геологического строения месторождения. После предварительного детального ознакомления с разрезом были выделены шесть участков, характеризующихся неизменной протяжённостью слоёв по латерали, мощностью 3–5 см и характерной окраской от белого до светло-коричневого. В качестве объекта сопоставительного исследования рассмотрены угли и

вмещающие породы Талдыкульского и Сарыкольского месторождений Майкубенского угольного бассейна. Для проведения сравнительного анализа использованы данные по 20 пробам, характеризующимся сходным геологическим возрастом и аналогичными геодинамическими условиями формирования по отношению к Шубаркольскому месторождению.



Рисунок 2.2 – Схема отбора проб на Шубаркольском месторождении



Рисунок 2.3 – Схема отбора проб на Майкубенском бурогольном бассейне

Подготовка проб к аналитическим исследованиям во всех случаях осуществлялась по стандартной методике и включала сушку в естественных условиях, дробление, квартование и истирание до состояния пудры (рис. 2.4).

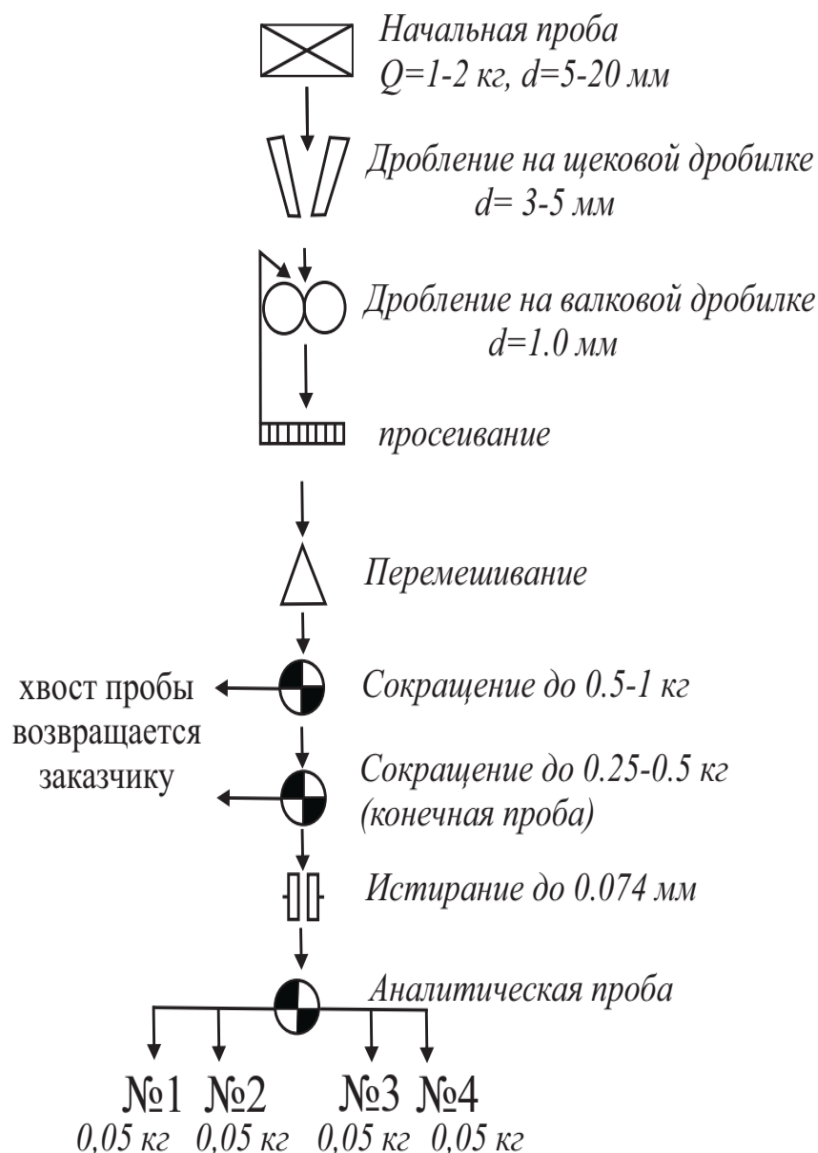


Рисунок 2.4 – Схема обработки геологического образца

2.2 Аналитические методы. Методы определения элементного состава (ИНАА, ICP-AES, ICP-MS)

Комплекс исследований был выбран исходя из поставленных задач на определение содержаний элементов примесей в пробах угля и породных прослоев, минерального состава породных прослоев, минеральных форм нахождения элементов-примесей в углях.

2.2.1 Инструментальный нейтронно-активационный анализ (ИНАА)

Изучение проб проводилось методом инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА) на определение средних содержаний 28 элементов Sm, Ce, Ca, Lu, U, Th, Cr, Yb, Au, Hf, Ba, Sr, Nd, As, Br, Cs, Ag, Tb,

Sc, Rb, Fe, Zn, Ta, Co, Na, Eu, La, Sb в ядерно-геохимической лаборатории кафедры геоэкологии и геохимии Национального исследовательского Томского политехнического университета. Данный метод использовался в качестве основного метода (аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.518623 от 10.10.2011 г.; НСАМ ВИМС № 410-ЯФ)), выполненный в аккредитованной (аттестат № РОСС RU.0001.511901) ядерно-геохимической лаборатории кафедры геоэкологии и геохимии Томского политехнического университета по аттестованным методикам (НСАМ ВИМС № 410-ЯФ) (аналитики А.Ф. Судыко), методика утверждена Научным советом по аналитическим методам (НСАМ 1984) при ВИМСе. Облучение образцов потоком нейтронов выполнено на исследовательском ядерном реакторе ИРТ-Т Физикотехнического института ТПУ. Рентгенно-структурный анализ выполнен в лаборатории кафедры технологии силикатов и наноматериалов ТПУ на установке ДРОН-3М. Этот вид анализа позволяет получить информацию о качественном составе микроминеральных включений. Данный метод позволяет диагностировать микроминеральные фазы в золе угля и породе (аргиллите) по их атомной структуре [35, 36]. Методика не требует специальной пробоподготовки, кроме истирания до состояния пудры. Была проанализирована порошковая навеска пробы аргиллита, которая измельчалась в агатовой ступке, предварительно промытой и ротертой с применением спирта.

Так же элементный состав проб определялся методами атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ICP-AES) на спектрометре *iCAP 7600 Duo* (Thermo Scientific, США) и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) на спектрометре *Agilent 7700x* (Agilent Technologies, Япония). Анализы проводились в аналитическом центре Дальневосточного геологического института ДВО РАН (г. Владивосток) при участии аналитика Зарубиной Н.В. Контроль качества осуществлялся с использованием стандартных образцов углей CLB-1 и SARM 19 Геологической службы США, а также параллельных измерений и сравнения результатов методов ICP-AES и ICP-MS для ключевых элементов.

Результаты по определению содержания 28 химических элементов Sm, Ce, Ca, Lu, U, Th, Cr, Yb, Au, Hf, Ba, Sr, Nd, As, Br, Cs, Ag, Tb, Sc, Rb, Fe, Zn, Ta, Co, Na, Eu, La, Sb в образцах некоторых проб углевмещающих пород, пород на контакте с углями, а также самих углей Западного разреза приведены в таблице 2.1.

По результатам нейтронно-активационного анализа (ИНАА) установлены средние содержания редкоземельных элементов (РЗЭ) в пробах углей Шубаркольского месторождения и Майкубенского бассейна (таблица 2.2).

По результатам ИНАА оценена степень обогащения элементами-примесями юрских углей бассейна Майкубень соответственно: сопоставимое с кларковыми значениями для бурых углей (табл.2.3).

Таблица 2.1 – Результаты ИНАА содержаний элементов Западного разреза месторождения Шубарколь

Эле- мент	Глинистый прослой							Контакт глинистый прослой-уголь									Уголь				
№ про- бы	3	8	13	26	29	34	2	4	7	9	12	18	21	25	1	6	10	11	15	16	20
Sm	0,90	0,85	0,87	1,80	3,12	2,65	0,57	0,58	0,86	0,59	0,64	3,26	0,92	1,89	0,82	0,59	0,35	0,26	1,11	0,80	1,11
Ce	12,1	12,2	10,5	20,8	30,6	21,8	8,11	8,32	12,4	8,71	9,18	65,0	16,3	13,3	5,36	6,82	5,92	3,15	20,4	15,0	15,8
Ca	0,45	0,46	0,51	0,16	0,43	0,43	0,17	0,25	0,39	0,29	0,31	1,04	0,11	0,15	0,11	0,10	0,13	0,08	0,10	0,18	0,18
Lu	0,18	0,19	0,19	0,10	0,23	0,26	0,15	0,13	0,17	0,14	0,14	0,44	0,08	0,13	0,06	0,08	0,09	0,04	0,09	0,07	0,11
U	2,47	2,24	2,52	0,29	1,37	1,81	1,89	1,72	1,62	1,98	1,51	2,18	0,10	0,34	0,28	0,55	1,69	0,11	0,30	0,18	0,39
Th	3,43	3,80	4,06	0,65	4,13	5,41	1,77	1,48	2,65	2,58	2,65	11,3	0,21	0,48	0,27	0,39	0,99	0,12	0,18	0,53	0,71
Cr	26,2	30,0	31,4	4,49	30,0	48,9	18,3	19,6	19,5	24,1	22,2	42,2	2,44	7,48	3,50	7,80	17,1	2,01	1,80	3,26	6,85
Yb	1,37	1,38	1,37	0,81	1,48	1,64	1,0	0,93	1,27	0,96	1,00	2,86	0,60	0,93	0,51	0,67	0,67	0,33	0,64	0,54	0,79
№ про- бы	3	8	13	26	29	34	2	4	7	9	12	18	21	25	1	6	10	11	15	16	20
Au	0,01	0,01	0,001	0,003	0,001	0,002	0,021	0,001	0,011	0,003	0,001	0,001	0,00	0,04	0,090	0,003	0,004	0,001	0,001	0,001	0,001
Hf	1,33	1,61	1,82	0,28	2,38	3,50	0,67	0,11	1,21	1,18	1,13	4,93	0,08	0,23	0,10	0,14	0,33	0,04	0,05	0,20	0,38
Ba	49,6	55,5	61,3	35,5	97,7	148,7	36,4	30,7	51,4	39,2	42,0	186,9	22,6	47,1	16,9	26,7	16,3	13,2	90,6	48,5	44,8
Sr	30,2	32,4	33,8	20,5	33,6	34,1	34,2	34,3	35,1	35,3	34,6	39,1	38,0	36,5	28,6	22,3	26,3	20,9	58,1	14,9	15,9
Nd	4,72	6,83	3,66	8,01	14,2	11,6	3,08	4,62	4,37	1,14	3,53	21,3	5,26	5,44	2,18	1,90	1,26	0,84	6,91	5,52	6,15
As	7,30	6,84	7,41	1,14	0,57	1,43	5,31	4,61	2,97	8,00	4,24	2,31	0,24	0,39	0,86	0,57	3,86	0,85	0,98	0,36	0,38
Ag	0,45	0,35	0,4	0,38	0,34	0,3	0,29	0,36	0,24	0,28	0,3	0,21	0,25	0,30	0,35	0,38	0,29	0,31	0,34	0,36	0,34
Br	0,79	0,69	0,58	1,25	0,30	1,86	0,82	0,63	0,56	0,40	0,53	1,74	2,02	1,05	0,37	0,51	0,51	0,40	0,36	2,83	2,15
Cs	4,52	4,98	5,65	0,67	4,98	6,30	1,48	2,59	3,37	3,67	3,47	15,0	0,05	0,19	0,80	0,08	0,58	0,14	0,1	0,52	0,76
Tb	0,19	0,21	0,21	0,22	0,40	0,47	0,19	0,13	0,24	0,11	0,10	0,74	0,17	0,30	0,09	0,11	0,12	0,07	0,18	0,15	0,23
Sc	3,5	3,76	3,96	1,19	8,19	14,2	3,10	2,67	3,21	3,03	2,86	11,4	1,12	3,07	1,02	1,69	2,19	0,81	1,38	1,06	3,82
Rb	19,7	23,9	24,4	2,42	33,7	41,5	4,10	9,00	15,5	17,5	14,2	101,3	2	2,56	2,8	2,60	0,30	2,28	2,20	2,89	4,92
Fe	1,04	0,55	0,56	0,11	0,42	0,43	0,84	0,77	0,25	0,58	0,30	1,32	0,06	0,07	0,04	0,05	0,19	0,08	0,10	0,16	0,12
Zn	21,7	16,6	13,0	6,92	14,9	108,	15,1	16,1	20,7	8,33	18,3	22,0	3,95	6,26	7,71	8,69	2,97	42,9	3,32	5,81	7,47
Ta	0,15	0,19	0,32	0,01	0,296	0,419	0,01	0,09	0,11	0,09	0,11	0,77	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,00	0,04	0,02
Co	32,8	17,1	14,5	9,83	17,4	12,3	59,4	26,4	13,4	10,5	9,03	2,55	8,98	15,5	2,70	3,80	7,49	8,11	6,68	5,69	13,5
Na	0,08	0,08	0,06	0,05	0,05	0,07	0,13	0,04	0,05	0,04	0,04	0,11	0,03	0,04	0,04	0,03	0,02	0,04	0,03	0,05	0,03
Eu	0,27	0,24	0,32	0,37	0,85	0,73	0,25	0,23	0,26	0,20	0,21	1,07	0,26	0,42	0,14	0,17	0,15	0,09	0,33	0,20	0,36
La	3,61	4,06	4,68	4,84	12,1	10,6	2,46	2,11	3,75	2,62	3,15	29,5	2,95	2,40	0,69	0,77	0,67	0,55	6,29	3,59	3,54
Sh	0,40	0,29	0,38	0,09	0,72	1,41	0,37	0,35	0,25	0,40	0,23	0,50	0,05	0,29	0,06	0,09	0,40	0,02	0,06	0,07	0,30

Таблица 2.2 – Средние содержания элементов в пробах, определенные методом ИНАА

Угли	Редкоземельные элементы, ppm															
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Y	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE
Майкубенский бассейн	10,4	25,9	-	10,8	2,4	0,7	-	0,5	-	-	-	-	-	1,6	0,26	52,4
Шубарколь	8,06	17,5	2,11	9	1,97	0,4	2	0,31	1,79	10,1	0,38	1,13	0,17	1,19	0,18	56,4
УСС [81]	30,0	64,0	7,1	26	4,50	0,9	3,8	0,64	3,50	22,0	0,80	2,30	0,33	2,20	0,32	168,4
Каменные угли [80]	11,0	23,0	3,4	11	2,40	0,4	2,7	0,31	2,10	8,20	0,57	1,00	0,30	1,00	0,20	67,6
Бурые угли [80]	10	22	3,5	11	1,9	0,5	2,6	0,32	2,00	8,6	0,50	0,85	0,31	1,00	0,19	65,27

Таблица 2.3 – Геохимические параметры редкоземельных элементов в образцах угля Майкубеньского бассейна по результатам ИНАА

Образец	Тип обогащения	Lan/Ybn	δEu	δCe	La/Sm	Lan/Lun	$\Sigma\text{PЗЭ}$
6-Т	Н	0,37	1,56	0,96	0,90	0,57	62,84
8-Т	Н	0,53	1,16	1,08	0,79	0,45	44,02
9-Т	Н	0,67	1,28	1,00	0,78	0,56	106,34
12-Т	Н	0,49	1,08	1,15	0,50	0,42	46,15
15-Т	Н	0,46	1,16	1,02	0,62	0,41	60,51
8-С	Н	0,77	1,20	1,08	0,60	0,64	32,60
12-С	Н	0,45	1,30	1,16	0,49	0,40	31,84
15-С	Н	0,40	1,09	1,56	0,49	0,34	52,56
17-С	Н	0,33	1,48	1,11	0,53	0,27	37,23
19-С	Н	0,41	1,34	1,10	0,81	0,33	50,33

2.2.2 ICP-AES и ICP-MS анализы

Определение элементного состава образцов угля и глинистых прослоев с использованием атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-AES и ICP-MS); визуализация и качественный элементный анализ материала перенесенных порошковых образцов и кускового материала угля и глинистых прослоев с использованием аналитической сканирующей электронной микроскопии в комбинации с энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией (SEM-EDS).

Метод ICP-AES использовался для определения содержания Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K, P в пересчете на оксиды; методом ICP-MS определяли содержание Li, Be, S, Al, Sc, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Rb, Sr, Sn, Sb, Te, Y, Mo, Ag, Zr, Cd, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Tl, Pb, Bi, Th, U.

Используя высоколокальный метод аналитической сканирующей электронной микроскопии (SEM-EDS), была охарактеризована морфометрия твердофазных компонентов в предоставленных образцах и определено содержание в них химических элементов.

Это включало автоматизированный поиск минеральных фаз с заданными характеристиками с использованием программных модулей AZtecFeature, включая электронное документирование изображений (снимков) в различных режимах под сканирующим электронным микроскопом и получение спектров дисперсии состава с помощью рентгеновского спектрометра.

Согласно многочисленным исследованиям, угли содержат большое количество химических примесных элементов, в том числе ценных и токсичных, что делает сами угли и продукты их переработки потенциальным источником нетрадиционного сырья для извлечения ценных компонентов.

В то же время в процессе сжигания угля (в том числе при природных пожарах) токсичные элементы могут попадать в окружающую среду, нанося вред ее экологическому состоянию.

Неорганические примеси в угле, отражающие его качественный состав, влияют на состояние технологического оборудования, задействованного в процессе переработки угля. Поэтому их содержание нормируется и должно контролироваться.

Изучение содержания микроэлементов в углях имеет научное значение для геохимических исследований. Все это указывает на необходимость применения новых, совершенствования и оценки существующих аналитических подходов к определению элементного состава углей и угольного сырья.

Угли традиционно являются сложным объектом для аналитических исследований с целью оценки содержания в них широкого спектра химических элементов. Это связано со сложностью подготовки пробы для анализа, спецификой пробы угля и физико-химическими свойствами определяемых элементов.

В настоящее время опубликовано большое количество работ, посвященных определению микроэлементного состава углей и продуктов их переработки с использованием различных аналитических методов.

Эти методы можно разделить на разрушающие, такие как плазменная спектрометрия (масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) и атомно-эмиссионная спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ICP-AES), атомно-абсорбционная спектрометрия (AAS), электрохимические (вольтамперометрия) и некоторые другие неразрушающие методы, например инструментальные нейтронно-активационный анализ (INAA), методы рентгеноструктурного анализа, электронная микроскопия).

Все эти методы имеют как свои преимущества, так и недостатки при проведении анализа.

Матричные эффекты, наложения на аналитические сигналы определяемых элементов, присущие многим методам, могут увеличить пределы обнаружения, а также трудности, связанные с неоднородностью образца и, как следствие, с репрезентативностью образца, в результате использования небольших образцов для анализа (часто встречающиеся при использовании неразрушающих методов). Это может повлиять на точность полученных результатов.

При проведении анализа методами ICP-MS, ICP-AES и AAS в классическом варианте пробы подвергаются предварительному разложению и переводу определяемых компонентов в раствор.

Данная процедура может быть связана с рядом ограничений, влияющих на выбор метода подготовки пробы для анализа. В результате должны быть достигнуты следующие условия:

- полнота перевода в раствор элементов с различными химическими свойствами;
- стабильность получаемого раствора;

- максимально возможное снижение уровня концентрации в растворе компонентов матрицы, которые препятствуют определению;
- предотвращение загрязнения образца анализируемыми химическими элементами на этапе пробоподготовки.
- предотвращение загрязнения образца анализируемыми химическими элементами на этапе пробоподготовки.

Чтобы устранить эти трудности, в некоторых работах описываются методы, при которых при использовании разрушающих методов образцы не подвергаются предварительному химическому разложению.

В частности, в методе электротермической атомно-абсорбционной спектроскопии (ET-AAS) порошкообразный образец помещается в графитовую ячейку; электротермическое испарение твердого образца также используется в методе ICP-MS. Использование лазерной абляции образца в этом методе является хорошо известным подходом.

Следует подчеркнуть, что проблема корректного, с требуемой точностью, определения микроэлементов в углях и углеродистых породах все еще может возникнуть при анализе этих объектов.

Однако, как показывает аналитическая практика, в случае многоэлементного анализа углей использование методов ICP-MS и ICP-AES, сопровождающееся предварительным химическим разложением проб, позволяет определить максимальное количество химических элементов одновременно из одной пробы с наименьшими пределами обнаружения и высокие метрологические показатели полученных результатов.

Существует ряд опубликованных методологических исследований по определению содержания широкого спектра микроэлементов при изучении угольных материалов с использованием метода ICP-MS.

В ходе исследовательской работы была изучена возможность использования открытого кислотного разложения с использованием азотной, хлорной и фтористоводородной кислот, которое применяется для вскрытия геологических образцов со значительным содержанием органического вещества, включая угли и слои глины, и последующих измерений, чтобы подготовить исследуемые образцы для инструментального анализа концентраций элементов используя методы ICP-AES и ICP-MS.

Контроль качества результатов исследований и их достоверности проводился с использованием стандартных образцов состава углей CLB-1 и SARM 19.

Геологическая служба США предоставила подробное описание инструментальной части анализа, включая выбор режима съемки и другие настройки ICP-AES спектрометра iCAP 7600 Duo и квадрупольного ICP-MS Agilent 7700x, позволяющие максимально устранить спектральные перекрытия и добиться удовлетворительных результатов при определении химических веществ. элементы в анализируемых образцах, их точность.

Атомно-эмиссионная спектроскопия с индуктивно связанной плазмой (ICP-AES) – метод атомно-эмиссионной спектроскопии, в котором в качестве источника возбуждения атомов используется индуктивно-связанная плазма

(ICP). Эмиссия происходит тогда, когда имеется достаточное количество тепловой или электрической энергии для перевода атома в нестабильное энергетическое (возбужденное) состояние. В возбужденном состоянии атомы могут находиться недолго (доли секунды) и они самопроизвольно возвращаются в основное или возбужденное состояние с меньшей энергией.

При переходе в нормальное состояние атом испускает квант света характеристической длины волны. Интенсивность эмиссии пропорциональна концентрации определяемого элемента. Спектрометр ICP-AES серии iCAP 7000 Duo представлен на рисунке 2.5.



Рисунок 2.5 – Атомно-эмиссионный спектрометр с индуктивно-связанной плазмой iCAP 7600 Duo

Аналитические характеристики метода обеспечиваются источником возбуждения – высокочастотным индукционным разрядом в аргоне при атмосферном давлении, который обладает хорошей временной стабильностью, высокой температурой и обеспечивает эффективную атомизацию и возбуждение поступающего в него анализа (анализируемого раствора). ICP-AES обладает широким динамическим диапазоном. Данный метод позволяет определять элементы как на низком уровне концентраций (много ниже 1 мкг/мл), так и на высоком уровне (сотни и тысячи мкг/мл), достигаются необычайно низкие пределы обнаружения. Метод применим для анализа различных образцов: горных пород, донных отложений, минералов, металлов, природных и питьевых вод, атмосферных осадков. Методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-AES) при проведении экспертизы выполнено определение TiO_2 , Al_2O_3 , MnO , CaO , MgO , Fe_2O_3 , Na_2O , K_2O в образцах каменного материала с месторождения Шубарколь (табл. 2.4).

Таблица 2.4 – Результаты определения содержания петрогенных элементов (в пересчете на оксиды) в пробах углей и аргиллитов, мас.%

	№ проб	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
уголь	2446	0,03	0,71	0,02	0,004	0,08	0,14	0,08	0,01	0,002
контакт угля с аргиллитом	2447	0,10	3,43	1,24	0,005	0,15	0,19	0,21	0,07	0,007
аргиллит (светло-серый)	2448	0,24	7,05	1,49	0,004	0,16	0,16	0,13	0,22	0,007
контакт угля с аргиллитом	2449	0,12	3,71	1,13	0,004	0,10	0,12	0,07	0,09	0,006
уголь с прослойкой сажистого угля	2450	0,02	0,89	0,05	0,005	0,08	0,19	0,07	0,02	0,044
уголь	2451	0,03	0,64	0,09	0,004	0,07	0,14	0,06	0,01	0,004
контакт угля с аргиллитом	2452	0,21	5,04	0,29	0,004	0,15	0,12	0,10	0,18	0,007
аргиллит (светло-серый)	2453	0,25	7,78	0,64	0,004	0,18	0,10	0,12	0,29	0,005
контакт угля с аргиллитом	2454	0,18	5,73	0,72	0,003	0,13	0,09	0,07	0,23	0,006
уголь	2455	0,04	0,96	0,43	0,003	0,06	0,11	0,05	0,03	0,004
контакт угля с аргиллитом	2457	0,18	5,53	0,36	0,003	0,14	0,11	0,08	0,20	0,002
аргиллит (светло-серый)	2458	0,26	7,72	0,59	0,003	0,17	0,11	0,10	0,28	0,005
контакт угля с аргиллитом	2459	0,13	4,88	0,48	0,004	0,11	0,11	0,08	0,12	0,004
уголь	2460	0,02	0,92	0,10	0,004	0,07	0,16	0,06	0,01	0,037

Масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS). Метод исследования элементного состава вещества, основанный на превращении определяемых компонентов в ионизированные частицы и разделении в газовой фазе в соответствии с их массовыми числами – отношение массы частицы(*m*) к её заряду(*z*). Метод масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) является комбинацией индуктивно связанной плазмы и масс-спектрометра. Он основан на использовании индуктивно связанной плазмы в качестве источника ионов и масс-спектрометра для их разделения и детектирования.

Масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) - высокочувствительный метод многоэлементного анализа, который позволяет одновременно определять почти все химические элементы с пределами обнаружения до 10⁻¹⁵ г/мл (1*10⁻¹⁰ %).

Методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) определяется более 50 элементов таблицы Менделеева. По этим причинам ICP-MS является одним из самых распространенных методов определения элементного состава. Данная методика анализа является весьма точной и требует для анализа малое количество вещества.

Спектрометр ICP-MS Agilent 7700x представлен на рис. 2.6.

Методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой при проведении экспертного геохимического исследования объектов экспертизы выполнено определение Li, Be, Sc, V, Co, Cr, Cu, Ni, Zn, Ga, Ge, As, Se, Rb, Sr, Y, Nb, Mo, Cd, Sb, Te, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Yb, Lu, Hf, Ta, Re, Tl, W, Pb, Th.

Определение Ge, Zr, также выполнено после кислотного разложения смесью указанных выше кислот с последующим измерением концентраций

этих элементов методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой.

Использование методов ICP-AES и ICP-MS предполагает перевод анализируемых образцов в раствор. При проведении экспертизы образцов каменного материала анализ выполнен после разложения образцов с использованием фтористоводородной кислоты (HF) в сочетании с азотной (HNO_3) и хлорной (HClO_4) кислотами.

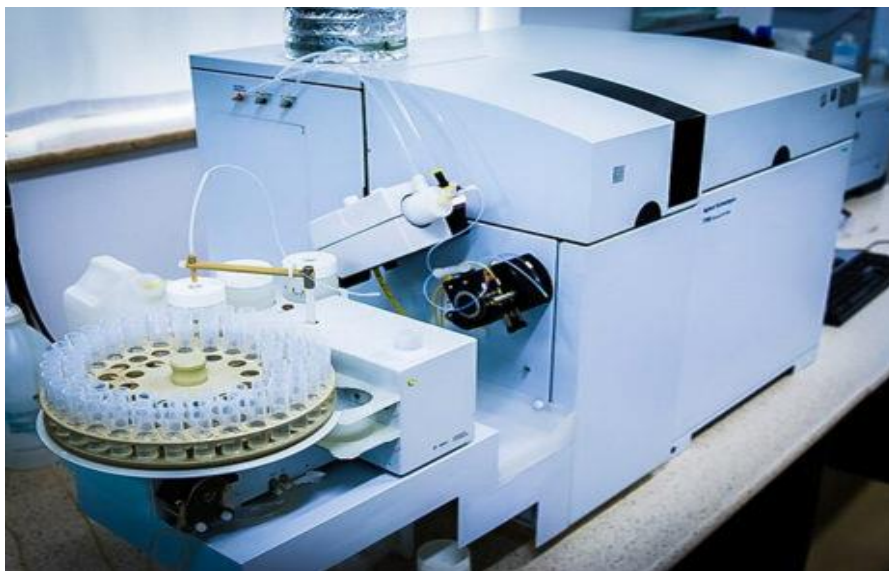


Рисунок 2.6 – Масс- спектрометр с индуктивно-связанной плазмой Agilent 7700

2.2.3 Гравиметрический метод

Метод количественного химического анализа, основанный на точном измерении массы малорастворимого соединения, содержащего определяемый элемент. Это соединение освобождают от сопутствующих (примесей) и отделяют от раствора (отфильтровывают). Метод осуществим, если это соединение имеет постоянный состав или легко превращается при прокаливании (высушивании) в соединение постоянного состава.

Этапы гравиметрического анализа:

1. Подготовка раствора
2. Осаждение
3. Старение осадка (операции, способствующие лучшему осаждению).
4. Фильтрование
5. Промывание осадка
6. Высушивание или прокаливание
7. Взвешивание
8. Расчет содержания аналита (определяемого компонента)

Гравиметрический метод анализа обычно используется для определения содержания элемента от $n \cdot 10^{-1}\%$ и выше и относится к

наиболее точным методам анализа. Этот метод относится к числу классических методов анализа. Основным недостатком метода является его трудоемкость и длительность выполнения. Но при определении элементов с содержанием более 20% массовой доли этот метод дает результаты с меньшей погрешностью, чем современные инструментальные.

При проведении экспертизы этот метод был использован при определении SiO₂ (диоксида кремния), представлен в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Результаты определение кремния, в пересчете на оксид (SiO₂), % мас.

№ п/п	Шифр пробы	SiO ₂	Состав пробы	Участок
1.	2447	6,85	контакт	западный
2.	2449	8,10	контакт	
3.	2467	18,38	контакт	
4.	2511	37,43	контакт	центр
5.	2536	5,39	контакт	
6.	2458	21,22	аргиллит	запад
7.	2483	63,61	аргиллит	запад
8.	2506	58,78	аргиллит	центр
9.	2547	48,25	аргиллит	центр
10.	2455	2,09	уголь	запад
11.	2456	0,65	уголь	запад
12.	2470	1,30	уголь	запад
13.	2471	2,80	уголь	запад
14.	2486	0,95	уголь	центр
15.	2499	1,70	уголь	центр
16.	2508	1,79	уголь	центр
17.	2522	11,87	уголь	центр
18.	2504	6,54	уголь	центр
19.	2513	4,77	уголь	центр
20.	2531	6,00	уголь	центр
21.	2550	5,76	уголь	центр
22.	2555	6,24	уголь	центр
23.	2563	7,23	уголь	центр

2.3 Минералогические исследования

2.3.1 Сканирующая электронная микроскопия

Минералогическое изучение образцов проведено в два этапа. Первый этап проведен в Национальном исследовательском Томском политехническом университете Образцы исследовались на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-3400N с энерго-дисперсионным спектрометром (EDS) Bruker X@Flash 5010 для проведения

рентгеноспектрального анализа. Исследование проб проводилось в режиме низкого вакуума, использовался детектор обратно-рассеянных электронов. Перед изучением пробы закреплялись на углеродный скотч и обдувались сжатым газом. Определение состава отдельных минералов выполнено с использованием EDS (рис. 2.7, 2.8). Диагностика минералов проводилась с помощью интернет-баз минералов (<https://www.mindat.org/>, <http://webmineral.com/>).

Преимуществом данного метода является то, что порошок может быть нанесен на подложку вплоть до 5 см в диаметре, что значительно превышает размеры стандартного аншлифа. Поскольку изучение, как порошка, так и скола угля могут повредить микроскопу и вакуумному насосу при откачке воздуха, изучено малое количество проб такого вида. В ходе исследований данным методом изучено 90 проб угля Шубаркольского месторождения.



Рисунок 2.7 – Ознакомление с процедурой подготовки образцов для анализа в лаборатории сканирующей электронной микроскопии НИ ТПУ (г. Томск). Процесс вакуумного напыления проводящего слоя на угольные шлифы перед SEM-исследованием. Фото совместно со старшим преподавателем Института природных ресурсов, кандидатом геолого-минералогических наук Ильенко С.С.



Рисунок 2.8 – Сканирующий электронный микроскоп (SEM) Hitachi S-3400N

Второй этап проведен в помещениях и на оборудовании лаборатории микро- и наноисследований Аналитического центра ДВГИ ДВО РАН (рис. 2.9.) Использованы аналитический сканирующий электронный микроскоп Jeol JSM-6490LV с EDS INCA Energy, X-max и аналитический двухлучевой сканирующий электронный микроскоп Tescan Lyra 3 XMN, укомплектованный EDS спектрометром AZtec XMax 80 Standart (рис. 2.10). Были применены: 1) детектор вторичных электронов SE, сигнал которых чувствителен к общей морфологии образцов и рельефу (скульптуре) их поверхности; 2) детектор обратно отражённых электронов BSE (по-иному, детектор обратно рассеянных электронов), сигнал которых чувствителен к композиционному (фазовому) контрасту, т.е. компоненты образца, имеющие разный состав, будут иметь разные оттенки в градациях серого на BSE4 изображениях; 3) EDS спектрометр служил для энергодисперсионного анализа состава частиц.



Рисунок 2.9 – Автономные вакуумные системы (посты, распылительные установки) для распыления препаратов с углеродом и/или металлами.
Лаборатория микро- и наноисследований ДВГИ ДВО РАН

При рентгеноспектральном EDS – анализе использовано явление того, что при взаимодействии тонкого пучка высокоэнергетических электронов (электронного зонда) с атомами твердотельного образца возникает ряд явлений, на основе которых могут быть получены разнообразные аналитические сигналы. К ним относится, например, возбуждение характеристического рентгеновского излучения, которое служит аналитическим сигналом в микроанализе.

При этом эмиссия обратно рассеянных первичных и вторичных, низкоэнергетических электронов используется в SEM для получения изображений поверхности либо с фазовым, либо с топографическим

контрастом. В настоящем исследовании аналитические определения методом РСМА основаны на регистрации характеристического рентгеновского излучения элементов, входящих в состав образца.

Идентификация регистрируемых линий позволяет вести качественный анализ. Сравнение интенсивности линий образца, выбранных в качестве аналитических, с интенсивностью этих же линий от стандарта обеспечивает выполнение количественного анализа. Возможно определение практически всех элементов, входящих в периодическую систему, за исключением водорода и гелия, хотя в области легких элементов определения сопряжены с известными трудностями. Локальность метода порядка 1-2 мкм. Точность определения основных компонентов характеризуется относительным стандартным отклонением около 1 %, причем воспроизводимость измерений прогнозируется.

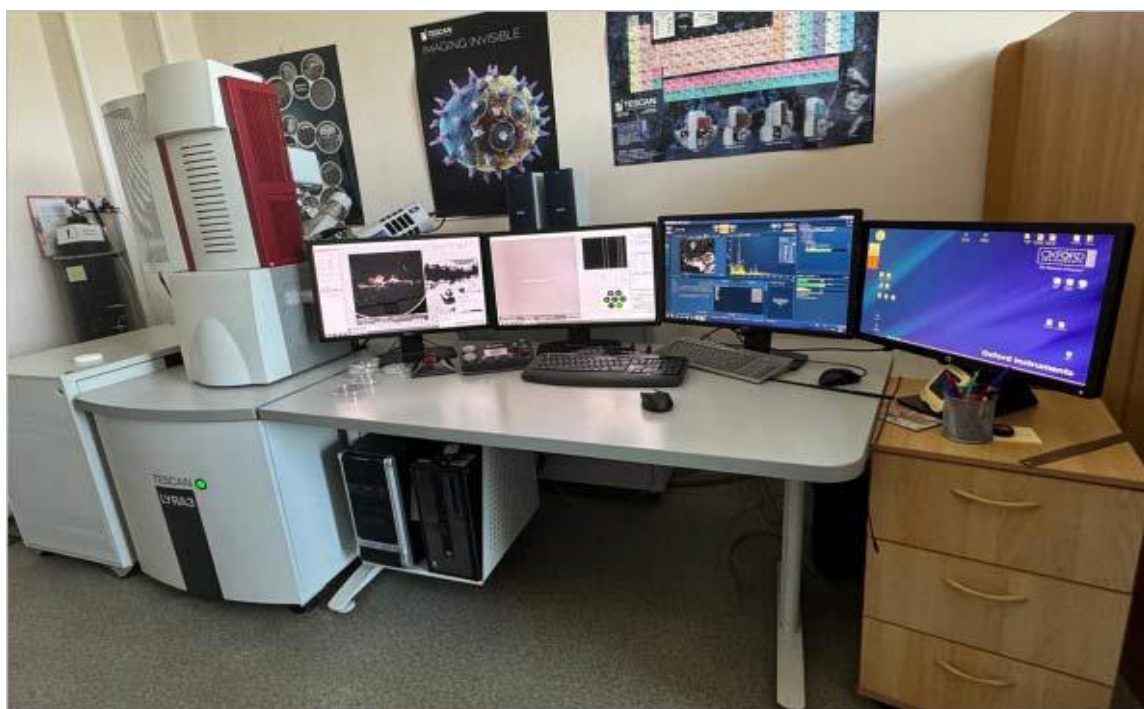


Рисунок 2.10 – Приборный комплекс на базе двухлучевого сканирующего электронного микроскопа Tescan Lyra 3 XMН (SEM-FIB), оснащенного стандартным энергодисперсионным спектрометром AZtec X-Max 80 (EDS).
Лаборатория микро- и наноисследований ДВГИ ДВО РАН

Пространственное распределение отдельных элементов может быть записано в виде линейных профилей или двумерных карт. Для регистрации рентгеновского излучения, важнейшего аналитического сигнала в анализе использован рентгеновский спектрометр с энергетической дисперсией (ЭД) одновременно и с высокой эффективностью регистрируют рентгеновское излучение во всем энергетическом диапазоне вплоть до характеристического излучения легких элементов.

В случае автопоиска частиц и их классификации в порошковых пробах был задействован сканирующий электронный микроскоп с катодом типа

Шоттки (с термополевой эмиссией) для получения высококачественных изображений. При элементном рентгеноспектральном микроанализе микрозерен с заданными характеристиками на энергодисперсионном спектрометре AZtec X-Max 80 Standart, интегрированном с SEM, для автоматизированного их поиска-классифицирования и анализа использовалось программное приложение INCAFeature Oxford Instruments. Это инновационная система анализа частиц, специально оптимизированная для удобства использования и высокой производительности, сочетает в себе высокую скорость и чувствительность детектора кремниевого дрейфа Ultim Max с превосходными аналитическими характеристиками и простотой использования аналитического пакета AZtecEDS на весьма совершенной платформе. AZtecFeature использует технологию Tru-Q для обеспечения беспрецедентной идентификации элементов и количественного анализа, не требующего вмешательства пользователя, что делает его идеальной системой для автоматического сбора данных.

Результаты проведенных исследований подтвердили высокую эффективность применения аналитической сканирующей электронной микроскопии для визуализации, морфометрии и элементного анализа микрочастиц минеральных образований.

Важно подчеркнуть особую важность применения локального элементного EDS-анализа для получения информации о качественном и количественном составе образца. К настоящему времени этот вид анализа занимает лидирующее положение в ряду аналитических методов как метод анализа тонких минеральных и иных фаз, в частности в минералогии, технологии, экологии и т.д.

2.3.2 Порошковая рентгеновская дифрактометрия

Цель данного аналитического метода – определение количественного содержания минералов в образцах углевмещающих пород и пород на контакте с углями.

Подготовка пробы для исследования в условиях лаборатории включала 2 этапа:

1. Заполнение кюветы для порошковых препаратов с углублением пробой;
2. Срезание в одно касание ребром стеклянной пластины избытка пробы для получения ровной, совпадающей с верхним краем кюветы, поверхности пробы.

Порошковая рентгеновская дифрактометрия (XRD) выполнялась на дифрактометре ДРОН-3М; съемка дифрактограмм выполнялась с использованием программного комплекса DIFRAC.Measurement, расшифровка дифрактограмм и идентификация минеральных фаз осуществлялись с применением программ EVA и TOPAS.

Принадлежность использованного прецизионного оборудования к мировому классу исследовательских приборов обуславливают соответствующий уровень качества полученных материалов. Результаты определения минерального состава углевмещающих пород и пород месторождения Шубарколь, находящихся в контакте с углями, приведены в табл. 2.6. и в рисунке 2.11.

Таблица 2.6 – Результаты порошковой рентгеновской дифрактометрии месторождения Шубарколь.

№ п/п	1участок	2 участок	3 участок	4 участок	5 участок
Кварц	38,8	75,8	57,71	76,16	64,2
Каолинит	45,3	18,7	17,27	18,88	25,08
Мусковит	4,25	14,1	16,6	3,07	8,74
Альбит	2,43	0,84	0,65	-	3,2
Микроклин	5,03	4,74	4,51	2,9	-
Полыгорскит	4,4	-	-	-	-
Ярозит	2,6	-	-	-	-
Барит	1,25	0,7	-	-	0,2
Гипс	2,4	-	-	-	-
Розенит	2,4	-	-	-	-
Пирит	2	-	-	-	-
Сфалерит	0,9	-	-	-	-
Флогопит	8,8	-	-	1,22	1,45
Анализ	8,1	2,2	1,77	1,97	2,17
Гематит	0,7	-	-	-	-
Сидерит	-	1,2	1,66	-	-

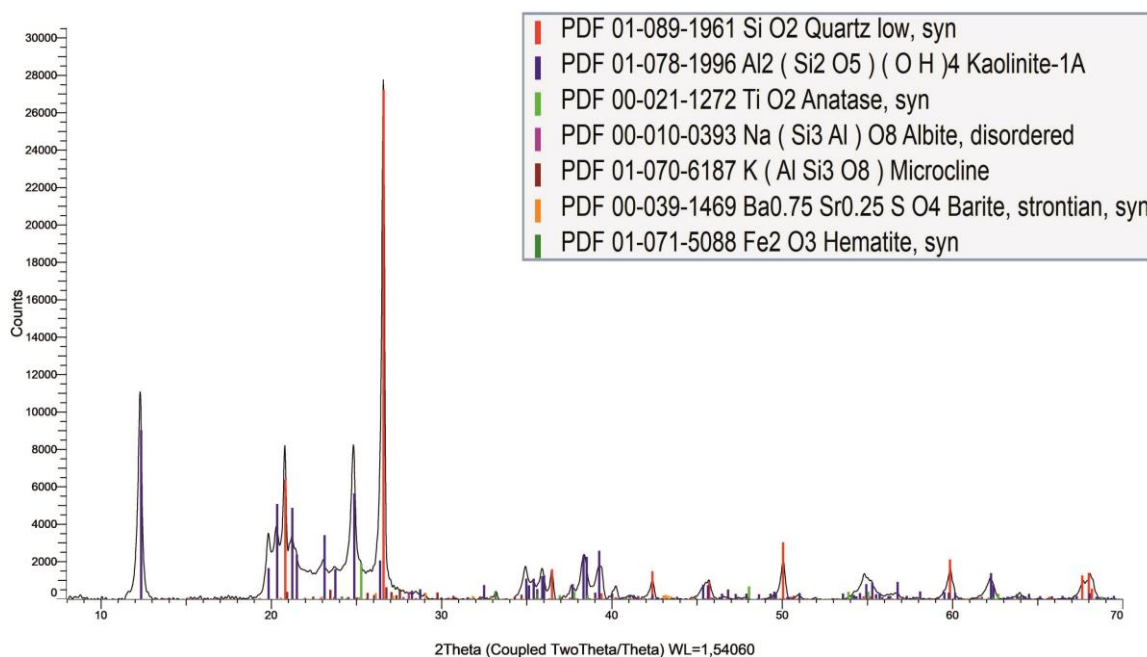


Рисунок 2.11 – Результаты порошковой рентгеновской дифрактометрии месторождения Шубарколь

2.4 Методика обработки информации

Данные результатов анализов заносились в базу данных. Оценка основных статистических показателей, построение диаграмм и корреляционных зависимостей проводилось с использованием электронных таблиц Excel. При расчетах средних, значения анализов ниже предела обнаружения заменялись нулевыми значениями что, как показывает опыт работ и проведенные построения, позволяет избежать завышения средних значений.

Построение разрезов и карт проводилось в программе CorelDraw, AutoCad, QGis. Доработка растровых изображений производилась в программах Photoshop.

Используя данные комплексных геохимических и минералогических данных выполнен анализ геолого-структурных и палеотектонических условий формирования месторождения, изучены особенности палеотектонического развития района и проведена палеотектоническая реконструкция формирования месторождения, с помощью которой установлена природа накопления элементов-примесей в углях и вмещающих породах месторождения Шубарколь. Проанализированы факторы формирования обогащенных элементами-примесями углей и углевмещающих пород и условия необходимые для его выщелачивания и транспортировки в угольный пласт.

Статистическая обработка. Во время научной стажировки совместно с зарубежным научным руководителем *Сунгатуллиным Рафаелем Харисовичем* выполнен статистический анализ геохимических данных, включая корреляционную обработку и интерпретацию выявленных закономерностей (рис. 2.12).



Рисунок 2.12 – Совместное фото с зарубежным научным руководителем Сунгатуллиным Рафаелем Харисовичем а) и б) директором ЦДОМКиМ КФУ И.А. Чукмаровым

Для 58 компонентов (9 петрогенных оксидов и 49 элементов-примесей) были рассчитаны основные статистические показатели и построены диаграммы и корреляционные зависимости с использованием Microsoft Excel. Для анализа сложных зависимостей применялись методы многомерной статистики (кластерный и факторный анализ) в программе STATISTICA 10.

Кластерный анализ позволил выделить группы проб с близкими характеристиками на основе древовидной иерархии.

Факторный анализ применялся для выявления скрытых факторов, определяющих вариации в распределении элементов. Метод главных компонент обеспечил редукцию данных и интерпретацию основных факторов в геологическом контексте, результаты представлены в табл. 2.6.

При изучении сложных геологических систем применяются методы многомерной математической статистики – кластерный и факторный анализы. Первый выделяет на основе множества переменных, характеризующих геологические объекты, классы (кластеры) параметров таким образом, чтобы объекты, входящие в один класс, были более сходными по сравнению с объектами, входящими в другие классы. Наиболее распространенным методом кластерного анализа в научных исследованиях, который использовался и в данной работе, является метод объединения (древовидной кластеризации), в результате которого создается иерархическое дерево с возможностью обнаружения кластеров (ветвей) и их интерпретации.

Факторный анализ применяется для исследования статистически связанных признаков с целью выявления определенного числа скрытых факторов, которые позволяют исследовать внутренние причины, формирующие специфику изучаемого явления. С помощью факторного анализа определяется мера связи между параметрами, и выявляются обобщенные факторы, лежащие в основе изменений характеристик. Целью подобного анализа выступает выражение большого числа рассматриваемых параметров через меньшее число более емких внутренних характеристик явления (редукция данных с помощью метода главных компонент), которые являются одновременно и наиболее существенными, определяющими. Основные результаты подобного анализа выражаются в виде факторных нагрузок и факторных весов. Для проведения многомерного статистического анализа применялась программа STATISTICA 10.

ГЛАВА 3 ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ И МЕЗОЗОЙСКОЕ УГЛЕОБРАЗОВАНИЕ ЦЕНТРАЛЬНОГО КАЗАХСТАНА

Формирование угленосных формаций юрского возраста в Центральном Казахстане было обусловлено сменой геодинамических режимов на рубеже палеозоя и мезозоя и сопровождалось развитием разрывной тектоники и локальных осадочных депрессий. Тектоническая дифференциация территории определила пространственное распределение угленосных бассейнов, характер осадконакопления и условия накопления органического вещества в континентальных аллювиально-озёрно-болотных обстановках. Именно в этот период, в конце палеозоя и в начале мезозоя, породы Центрального Казахстана подвергались новым дислокациям, преимущественно разрывного характера, что и обусловило дальнейшее развитие угленосных бассейнов региона.

В этом контексте рассмотрение геодинамических условий и связанных с ними структурных преобразований региона является ключом к пониманию механизмов формирования и размещения юрских угленосных формаций Центрального Казахстана, а также для понимания механизмов накопления элементов-примесей и выработки прогнозных критериев их рудоносности. Регион представлен системой осадочных палеобассейнов, закладывание и заполнение, которых происходили в различных тектонических режимах. В качестве репрезентативных кейсов рассматриваются месторождение Шубарколь и Майкубенский бассейн – две локальные, но типичные угленосные депрессии в пределах мезозойской геодинамической структуры Центрального Казахстана.

В конце палеозоя и в начале мезозоя породы Центрального Казахстана подвергались снова новым дислокациям, теперь уже главным образом разрывного характера, причем перемещения в виде крупных надвигов или взбросов происходили с юга на север. Вероятно, с этими дислокациями связано образование депрессий, впадин типа грабенов, которые в дальнейшем в отдельных случаях послужили местами отложения новых песчано-глинистых осадков, заключающих мезозойскую (нижне-юрскую флору), среди этих осадков произошло местами накопление значительных количеств органического вещества давшего углистые сланцы и разного рода угли. В это время в континентальных аллювиально-озерно-болотных условиях сформировались высококачественные, малозольные угли таких бассейнов, как Майкубенский бассейн и др., а также крупные и мелкие месторождения как Шубарколь, Юбилейное и др. К началу поздней юры углеобразование прекратилось, и лишь в конце палеогена торфяные болота охватили обширные площади юго-западного, северного и восточного Казахстана [37].

Формирование и пространственная дифференциация юрских угленосных формаций Центрального Казахстана непосредственно контролировались региональными геодинамическими и тектоническими

условиями мезозойского этапа развития территории. В связи с этим далее рассматривается геотектоническое положение Центрального Казахстана в мезозое как основа для анализа структурной организации осадочных бассейнов и условий их формирования.

3.1 Геотектоническое положение Центрального Казахстана в мезозое

В конце палеозоя и в начале мезозоя породы Центрального Казахстана подвергались снова новым дислокациям, теперь уже главным образом разрывного характера, причем перемещения в виде крупных надвигов или взбросов происходили с юга на север. Вероятно, с этими дислокациями связано образование депрессий, впадин типа грабенов, которые в дальнейшем в отдельных случаях послужили местами отложения новых песчано-глинистых осадков, заключающих мезозойскую (нижне-юрскую флору). Среди этих осадков происходило накопление значительных количеств органического вещества, давшего углистые сланцы и различные виды угля. На геодинамической схеме Центрального Казахстана (рис. 3.1) показаны основные структуры, контролировавшие образование впадин и локальных угленосных бассейнов. В это время в континентальных аллювиально-озерно-болотных условиях сформировались высококачественные, малозольные угли таких бассейнов, как Майкубенский бассейн и др., а также крупные и мелкие месторождения как Шубарколь, Юбилейное и др. К началу поздней юры углеобразование прекратилось, и лишь в конце палеогена торфяные болота охватили обширные площади юго-западного, северного и восточного Казахстана [37].

Центральный Казахстан занимает ключевое положение в пределах Центрально-Азиатского орогенного пояса (ЦАОП), представляя собой мозаичную мегапокровно-складчатую структуру герцинского возраста, переработанную в условиях мезозойского дейтероорогенеза. На схеме (рис. 3.2) показано расположение Майкубенского бассейна и месторождения Шубарколь в системе геодинамических структур региона, что наглядно отражает роль крупных разломов и блоков в контроле осадконакопления и формирования угленосных бассейнов [32, 38-40]. Такое положение региона между Сибирским и Восточно-Европейским кратонами на севере и Таримским и Северо-Китайским кратонами на юге предопределило сложную мозаику блоков и разломов, контролировавших мезозойское осадконакопление и угленакопление в Центральном Казахстане (рис. 3.2).

Позднепалеозойские орогенные комплексы, сформировавшиеся при закрытии бассейнов Палеоазиатского океана и последующих коллизиях, составляют фундамент мезозойских впадин. Наиболее выраженные деформации связаны с продольными сдвигами, формировавшими сигмоидальные изгибы. В мезозое территория приобрела черты мезоплатформенного массива, расчленённого блоками и осложнённого

глубинными разломами [2]. Именно блоково-разломная тектоника, дифференцированные вертикальные движения и реорганизация дренажной сети обусловили заложение и развитие внутриконтинентальных депрессий главных центров юрского угленакопления [41].

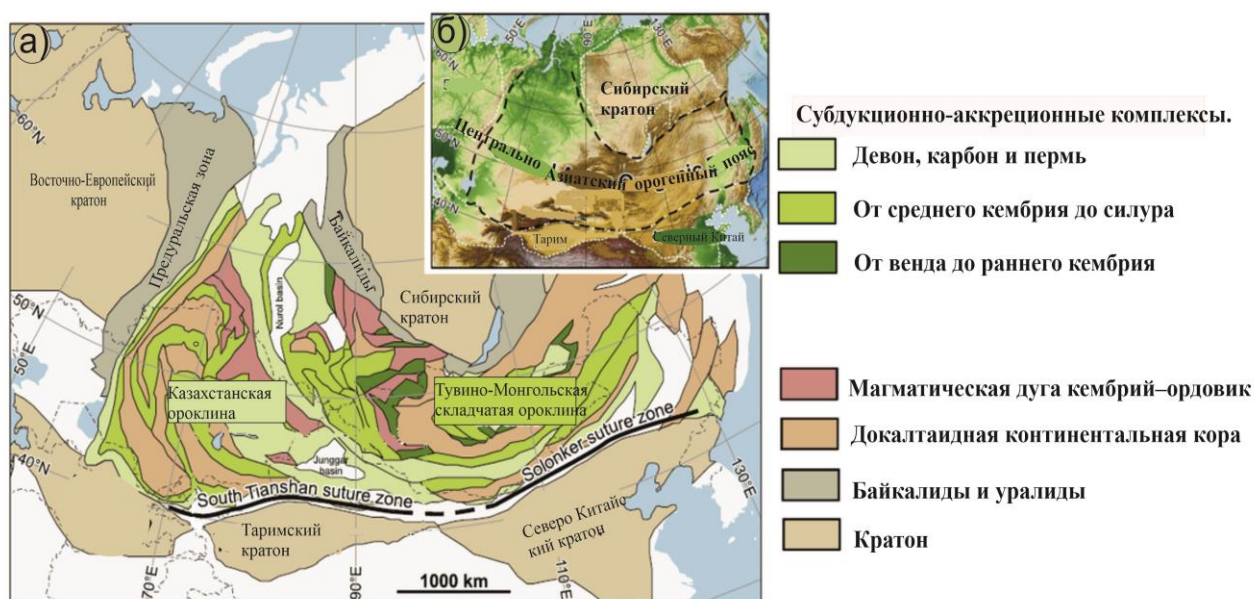


Рисунок 3.1 – Геодинамическая схема Центрально-Азиатского орогенного пояса с позиционированием Центрального Казахстана. Из работы Хана и Чжоу, 2015 г. [42]

Ключевой мегаструктурой района является Сарысу-Тенизское поднятие, сформированное как инвертированная палеобассейновая зона, разделяющая Чу-Сарысу и Тенизский впадины. Инверсия, связанная с позднепалеозойской (герцинской) тектоникой, задавала блоково-разломный каркас, на который трангрессивно легли мезозойские угленосные толщи. Это определило как локальные депрессии осадконакопления, так и каналы миграции флюидов, важные для последующей перераспределяющей минерализации [43,44,45].

Сарысу-Тенизское поднятие представляет собой массивный блок, заметно приподнятый относительно окружающих территорий, с протяжённостью около 250-300 км и шириной примерно 200 км. Этот регион характеризуется сложной тектонической организацией и чётким зонированием. На западе его границей служит Каракенгирский разлом, ориентированный почти строго по меридиану. Здесь структуры поднятия соединяются с более складчатыми образованиями Кенгирской зоны брахискладок. Южная граница определяется Жезказган-Теректинским разломом, на востоке массив плавно стыкуется с Атасуйскими структурами.

Внутри Сарысу-Тенизского поднятия особенно выделяется Каиндинская зона погружений. Она объединяет несколько структурных элементов: Каиндинский грабен, Улжанскую синклиналь, Тантальскую и

Шубаркульскую грабен-синклинали, а также чередующиеся горст-антиклинали. Зона простирается преимущественно в северо-западном направлении, накладываясь на меридиональные структуры каледонского фундамента. Общая длина зоны достигает около 300 км, ширина варьируется от 20 до 40 км. На северо-востоке элементы представлены разломами и складчато-глыбовыми структурами с ярко выраженным северо-западным направлением, тогда как юго-западная часть характеризуется наложением структур, ориентированных ближе к субширотной линии. Таким образом, Каиндинская зона является «зоной контакта» двух тектонических систем, где меридиональные и северо-западные структуры пересекаются и взаимодействуют, что подчёркивает сложность геологического строения региона.

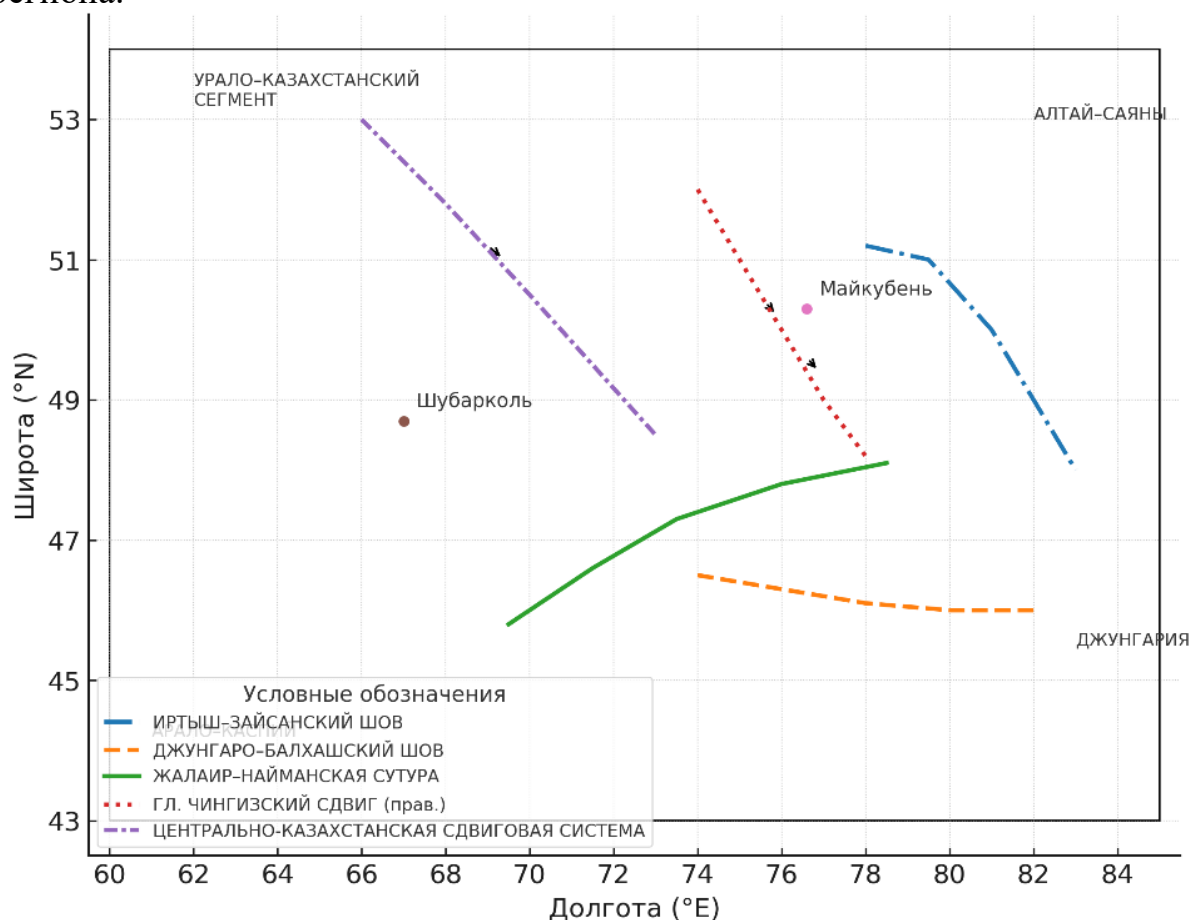


Рисунок 3.2 – Положение Майкубеньского бассейна и месторождения Шубаркуль в системе геодинамических структур западной части Центрально-Азиатского орогенного пояса [составлена автором по данным 38, 41, 46, 47, 48]

В палеозойскую эру, а частично и в мезозое-кайнозое, происходили сложные горизонтальные перемещения земной коры, включая продольные и поперечные сдвиги, а также надвиги. Эти движения постепенно усложняли исходное строение подвижных зон, формируя новые тектонические структуры. Наиболее заметные наложенные деформации связывают с

продольными сдвиговыми процессами, которые часто сопровождались сигмоидальными изгибами складчатых тел.

Структурное строение палеозойского орогена Казахстана принято характеризовать как «мозаичное», поскольку здесь отсутствует чёткая линейность и строгая упорядоченность, типичная для многих других орогенов мира. На схеме, приведённой для Центрального Казахстана (рис. 3.3), показаны основные складчатые системы и зоны тектоно-магматической активизации (ТМА).

После позднепалеозойского столкновения и коллажирования блоков Казахского континента регион перешёл к внутриконтинентальному режиму с реактивацией разломов и чередованием фаз растяжения и сжатия. Это создало цепочку прогибов (Шу-Сарысу/Чу-Сарысу, Тениз, Майкубенская депрессия) и подпирающих поднятий (Сарысу-Тенизское), которые одновременно служили источниками терригенного материала и ловушками для торфонакопления в речных и озёрных бассейнах [49, 42].

В мезозое территория Центрального Казахстана находилась в условиях активной внутриконтинентальной тектоники, связанной с завершающими стадиями коллизионных процессов герцинского цикла и последующей посторогенной перестройкой. Это определило формирование как внутриплитных депрессий, так и краевых прогибов [41]. В этих условиях происходило накопление мощных осадочных толщ, мощность которых варьирует от сотен метров на поднятых блоках до нескольких километров в депрессиях. Большинство депрессий имеет асимметричное строение: крутой борт контролируется активными разломами, фиксируя зоны максимальных амплитуд субсиденции, тогда как противоположное крыло более пологое и принимает клиновые тела осадков. Это отражается в тектоно-седиментационных «клиновидных» и латеральной изменчивости фаций.

Осадочные толщи бассейнов чередуются между песчано-алевролитовыми и глинистыми породами с угольными пластами значительной мощности. Угли характеризуются хорошей сохранностью растительного детрита и сравнительно низкой степенью метаморфизма, что отражает мягкие постседиментационные условия. Накопление угля велось в тёплом и влажном климате, формировавшем обширные болотные системы в пределах внутриконтинентальных впадин и межгорных прогибов. Основным источником терригенного материала, это размыв повышенных орогенных областей и доставка в угленосные бассейны обеспечивала густая сеть палеоречных систем, ориентированных по унаследованному разломному каркасу.

В ряде депрессий угленосные толщи ассоциируют с вулканогенными слоями щелочной специализации, что указывает на локальные фазы внутриплитного магматизма в зонах тектонического ослабления. Эти эпизоды играли двоякую роль: создавали дополнительные очаги субсиденции, модулируя пространство осадконакопления, и обеспечивали флюидно-геохимическое обогащение, способствующий минерализации и перераспределению элементов в углях и вмещающих породах. Такая связь

структурного контроля и флюидопроводимости согласуется с данными по Сарысу-Тенизскому сегменту.

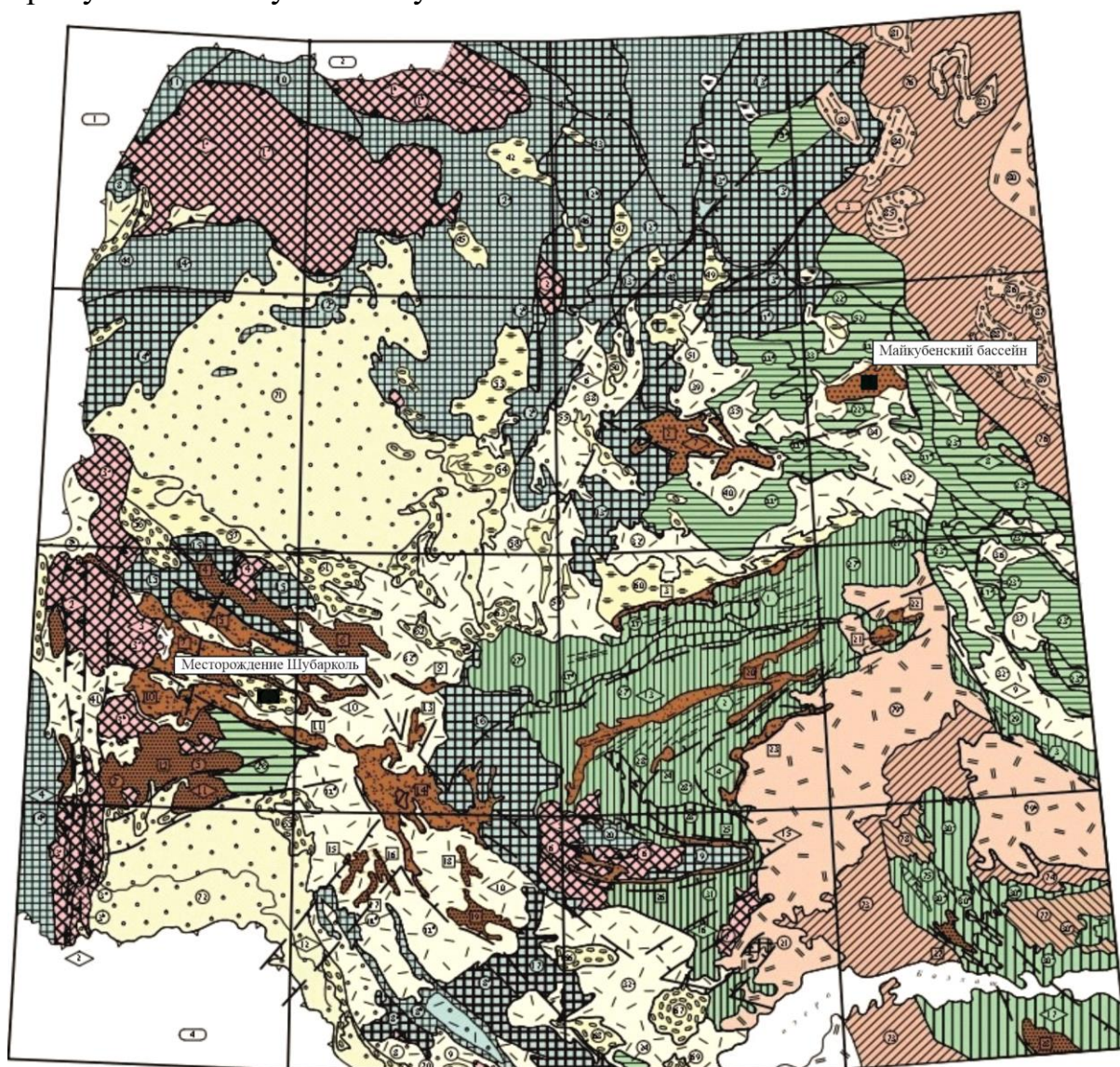


Рисунок 3.3 – Схема основных структур Центрального Казахстана [50]

Цифрами в кружках обозначены структуры геосинклинально-орогенного и квазиplatformного этапов развития: докаледонские структуры и их фрагменты: 1 – Кокчетавская глыба (мегантуклиорий): 1^а – Зерендинский антуклиорий (ан.), 1^б – Шатский ан.; 2 – Ешкеольмесский выступ (в.); 3 – Улутау-Арганатинский мегантуклиорий (меган.): 3^а – Арганатинский ан., 3^б – Карсакпайский синуклиорий (с.), 3^в – Улутауский ан., 3^г – Майтубинский ан., 3^д – Ц. Улутауский в., 3^е – Ескулинский в.; 4 – Ц. Кирейский в.; 5-3 – Карамендиснский в.; 6 – Актау-Монитинский массив: 7 – Кызылэспинский в., 8 – Жуантобинский в., 9 – Чуйская глыба; каледонские собственно геосинклинальные структуры: область ранних каледонид: 10 – Азатский с.; 11 – Марьевский с.; 12 – Степняк-Селетинский мегасинуклиорий (мегс.): 12^а – Степнякский с., 12^б – Ешкеольмесский ан., 12^в – Селетинский с.; 13 – Бозшаколь - Ерементаский меган.: 13^а – Ерементаский ан., 13^б – Бозшакольский ан., 13^в – Ащикольский с., 13^г – Жингельды-Краснокутский ан., 13^д – Корниловский с., 13^е – Железинский ан.; 14 – Байконур-Ишимский мегс.: 14^а – Калмаккольский с., 14^б – Жаркаинагашский ан., 14^в – Байконурский с.; 15 – Кирейский ан.; 16 – Атасуйский ан.; 17 – Булаттауский ан.; 18 – Чу-Илиский меган.: 18^а – Бурунтауский ан., 18^б – Жалаир-Найманский с., 18^в – Бетпакдолинский ан.; 19 – Киикский ан.; 20 – Узенский с.; 21 – Мыншукурский в.;

область средних каледонид: 22 - Баянаульский мегс.: 22^а - Кендыктинский с., 22^б - Шакшанский с., 22^в - Майкаинский ан., 22^г - Александровский ан., 22^д - Кызылтасский ан., 22^е - Семизбугинский с.; 23 - Чингиз-Тарбагатайский меган.: 23^а - Алкамергенский ан., 23^б - Эдрейский с., 23^в - 3. Чингизский с., 23^г - Канчингизский ан., 23^д - Чунайский с., 23^е - Абралинский с., 23^ж - Ю. Акчатауский с., 23^з - Акчатауский ан.; 24 - Мынаральский с.; 25 - Конский с. (фрагмент); 26 - Карамендинский в.; область поздних каледонид: 27 - Сарысу-Нурунский мегс.: 27^а - Нурунский с., 27^б - Спасский ан., 27^в - Карасорский с., 27^г - Коктасжалынский в., 27^д - Тектурмасский ан.; 27^е - Сарысуыйский с.; 28 - Жаман-Сарысуыйский мегс.: 28^а - Шетский с., 28^б - Агадырский ан.; 29 - Предчингизский с.; 30 - Балхашский меган.: 30^а - Кентарлауский ан., 30^б - Казык-Итмурундинский в., 30^в - Ащыозекский ан., 30^г - Котанбулакский с., 30^д - Майкамысский ан.; 30^е - Тюлькуламский в.; 31 - 3. Кызылэспинский с.; среднекаледонские орогенные структуры: 32 - вулканические впадины девонского вулcano-плутонического пояса: 32^а - 3. Балхашская, 32^б - Приатасульская, 32^в - Жаксыеонская, 32^г - Карагандинская, 32^д - Чингизская; прочие вулканические впадины: 33 - Экибастузская; 34 - Кайдаульская; 35 - Коджанчадская; 36 - Муржикская; 37 - Кайнарская; малососовые впадины: 38 - Павловская; 39 - Олентинская; 40 - Шатская; 41 - Талды-Шагырлинская; эпикаледонские квазиplatformенные прогибы (п.), мульда (м.) и впадины (вп.): 42 - Естаулетская м.; 43 - Коксенгирская м.; 44 - Ишимская м.; 45 - Яблоновская м.; 46 - Богембайская м.; 47 - Тамсорская м.; 48 - Ушсорская м.; 49 - Койтасская м.; 50 - Кумаинская м.; 51 - Тениз-Коржунскольская м.; 52 - Экибастузская м.; 53 - Первомайская м.; 54 - Рождественская м.; 55 - Ишимская м.; 56 - Терсакканская м.; 57 - Кыпшакский п.; 58 - Завьяловская м.; 59 - Самарская м.; 60 - Карагнадинский п.; 61 - Узкунская и Аршатинская м.; 62 - Саналинская м.; 63 - Куланутпесская м.; 64 - Шубаркольская м.; 65 - Тюемойнакская м.; 66 - Дуванынсорская м.; 67 - Талкудукская м.; 68 - Кызылкенгирская м.; 69 - Кашкан-Тенизская м.; 70 - Тасбулакская м.; 71 - Тенизская вп.; 72 - Джекказганская вп.; герцинские собственно геосинклинальные структуры: область ранних герцинид: 73 - Коунрадская с.; 74 - Музбельский с.; 75 - Каражирикская с.; 76 - Сарсазанский мегс.; область поздних герцинид: 77 - Саякская с.; 78 - Кокпексульская с.; ранне герцинские орогенные структуры: 79 - вулканические впадины позднепалеозойского вулcano-плутонического пояса: 79^а - Торауская, 79^б - Котанэмельская; Иртыш-Зайсанская система: 80 - Екатерининская вулканическая вп.; молассовые угленосные впадины: 81 - Веселорощинская; 82 - без названия; 83 - Качарская; 84 - Краснокутская; 85 - Тайконоырская; 86 - Богдановская; 87 - Киймалинская; 88 - Белогорская; 89 - Кайнаминская.

Цифрами в квадратных обозначены фрагменты зон раннегерцинской активизации рифтогенного типа: 1 - Сарыкольская м.; 2 - Акжар-Борлинская м.; 3 - южное крыло Карагандинского п.; 4 - Кагильская грабен-синклиналь (г.с.); 5 - Айдагарлинская г.с.; 6 - Босагинская и Жиделинская г.с.; 7 - Улжанская и Антальянская м.; 8 - Шанканская г.с.; 9 - Кулербайская г.с.; 10 - Амантобинская м.; 11 - Талдысайская г.с.; 12 - Кенгирская группа брахискладок; 13 - Кунекская м.; 14 - Жаильминская г.с.; 15 - Таганская м.; 16 - Кенжебайская м.; 17 - Коктасская м.; 18 - Коктас-Каратасская м.; 19 - Майканарская м.; 20 - Успенский п.; 21 - Карагайлинская м.; 22 - Акжальская м.; 23 - Уралбайская п.; 24 - Кайрактинская м.; 25 - Акжал-Аксоранский п.; 26 - Акбастауский п.; 27 - Акшокинская м.; 28 - без названия м.

Цифрами в ромбах обозначены зоны ТМА, раннекаледонской: 1 - Кокчетавская; 1^а - Зерендинская, 1^б - Шатская; 2 - Майтобинская; 3 - Каптаадырская; 4 - Карсакпайская; 5 - Узеньская и раннегерцинской: 6 - Койтасская; 7 - Баянаульская; 8 - Тлеумбетская; 9 - Ю. Чингизская; 10 - Жаильма-Караобинская; 11 - Уйтас-Джекказганская; 12 - Кенжебай-Жаманайбатская; 13 - Успенская; 14 - В. Жамансарысульская; 15 - Акбастау-Акжальская; 16 - Керегетасская; 17 - Сусызкаринская.

Формирование угленосных бассейнов Центрального Казахстана происходило в условиях посторогенной тектоники после завершения герцинского орогенеза. В течение мезозоя наблюдалось чередование этапов субсиденции и тектонической активизации, обеспечивавшее благоприятные условия для накопления угленосных толщ в пределах внутриплатформенных прогибов и грабенов [41, 38, 49].

Мезозойская тектоническая эволюция региона характеризуется преобладанием спокойных осадочных режимов в юрский период с последующим влиянием региональной растяжимости в меле. Особенно важны разломно-блоковые структуры, контролировавшие пространственное размещение прогибов, таких как Шубаркольский грабен и Майкубенская синеклиза, и формировавшие условия для аккумуляции органического вещества в болотных и озёрных фациях.

Таким образом, геодинамическая обстановка мезозоя в Центральном Казахстане является ключевым фактором не только в формировании угленосных бассейнов, но и в создании условий для аккумуляции ценных примесей, включая редкоземельные элементы, германий, ванадий и др.

3.2 Классификация бассейнов осадконакопления

Формирование мезозойских угленосных формаций Центрального Казахстана контролировалось структурно-тектонической обстановкой региона. Сарысу-Тенизское поднятие выполняло роль основного источника терригенного сноса, тогда как прилегающие Чу-Сарысу и Тенизские прогибы служили аккумулятивными зонами. В этих внутриконтинентальных впадинах формировались благоприятные палеогеографические условия – дельтово-озёрные равнины и обширные болотные массивы, обеспечившие торфонакопление. Согласно современным переинтерпретациям, взаимодействие поднятий и прогибов обусловило неравномерность мощности и качества угленосных толщ в пределах региона [51].

В целом, для юры характерен блоково-растяжённый режим, благоприятный для длительной субсиденции и накопления органического вещества в замкнутых или полужамкнутых депрессиях (intracontinental post-collisional basins) [41, 51].

Майкубенский бассейн и Шубарколь представляют собой осадочные палеобассейны платформенного типа с элементами внутриплитного рифтогенеза. Их заложение происходило на фоне дифференцированных вертикальных движений с локальными зонами растяжения, контролировавшими седиментационные ловушки. Структуры приурочены к древним авлакогенам, унаследованным от позднепалеозойской тектоники.

Согласно принятой классификации [52] и современной системной геодинамической схеме бассейнов [53, 201-205 с.], исследуемые структуры относятся к внутриконтинентальным постколлизийным прогибам, сформированным в пределах унаследованных впадин складчатых областей. Развитие велось над древними осадочными комплексами аккреционно-

складчатого каркаса, а от предшествующих бассейнов их отделяют поверхности структурного и стратиграфического несогласия. По данным региональных исследований, западная и восточная части Казахского нагорья имели разную историю палеозойского развития [3, с. 5-7]. В восточной части сохранялся длительный геосинклинальный режим до конца герцинской складчатости, тогда как западная часть уже в среднем-позднем палеозое перешла к полуплатформенному (сингерцинскому) этапу.

В этот период формировались внутриконтинентальные депрессии (intracontinental basins), контролируемые разломами сдвигового и растяженного типа. Их заложение было связано с постколлизией трансформацией коры, локальным растяжением и дифференциальными вертикальными движениями, что согласуется с современной геодинамической классификацией [53].

Классификация осадочных бассейнов является фундаментальным элементом анализа геодинамических условий и прогноза угленосности. С середины XX века она претерпела значительную эволюцию: от подходов, основанных на теории геосинклиналей и платформ [54, 55], к современным схемам, учитывающим тектонику плит и динамику литосферы [56, 23]. Первые классификации опирались преимущественно на свойства фундамента и тип земной коры, тогда как современные концепции акцентируют внимание на геодинамической среде – условиях растяжения, сжатия и сдвига [57].

Современные схемы классификации осадочных бассейнов учитывают геодинамическую обстановку их формирования: растяжение, сжатие или сдвиг литосферы, а также влияние сублитосферных процессов [58, 59, 23, 26]. Важное место в этой системе занимают внутриконтинентальные бассейны, формирующиеся в условиях растяжения на кратоне или континентальной плите без образования океанической коры.

К данному типу относятся внутриконтинентальные рифтовые впадины и авлакогены [60, 31]. Эти бассейны развиваются в результате утонения литосферы и ограничены нормальными разломами. Их эволюция обычно включает две стадии:

1. Стадия рифтогенеза (сбросообразования) – бассейны проявляются как грабены или полуграбены (при этом для читателя можно пояснить: «грабен» – пониженный блок между разломами, а «мегаантиклинорий» – крупная антиклинальная структура, блок поднятия), классические примеры: Провинция Бассейнов и Хребтов (США) [61], Восточно-Африканская рифтовая долина [62].

2. Стадия термического опускания – рифт постепенно преобразуется в широкую впадину, аналогами служат Североморский бассейн и бассейн Бохайвань [63].

Особый интерес для Центрального Казахстана представляют внутриконтинентальные бассейны, формирующиеся в пределах складчатых областей или платформ при постороженных и постколлизийных условиях. Эти бассейны характеризуются развитием впадин, связанных с

унаследованными разломными структурами, что особенно ярко проявляется в юрских угленосных формациях региона [53].

Опускание предгорного бассейна обусловлено главным образом термическим ослаблением литосферы и нагрузкой или изгибом складчато-надвиговых поясов или реактивированных орогенных поясов в верхней коре. (рис 3.4) [64, 65].

Воздействия на поверхность Земли включают гравитационную нестабильность (рис 3.5), атмосферное выветривание, перемещение и эрозию рек, а также взаимодействия биосферы и геосферы, которые в основном влияют на формирование и эволюцию бассейнов [53].

Внутриконтинентальные рифтовые бассейны представляют собой бассейны растяжения, образованные растяжением и утонением литосферы и ограниченные нормальными разломами (рис. 3.6) и хорошо развитые в мире, в основном в мезозое и кайнозое [66].

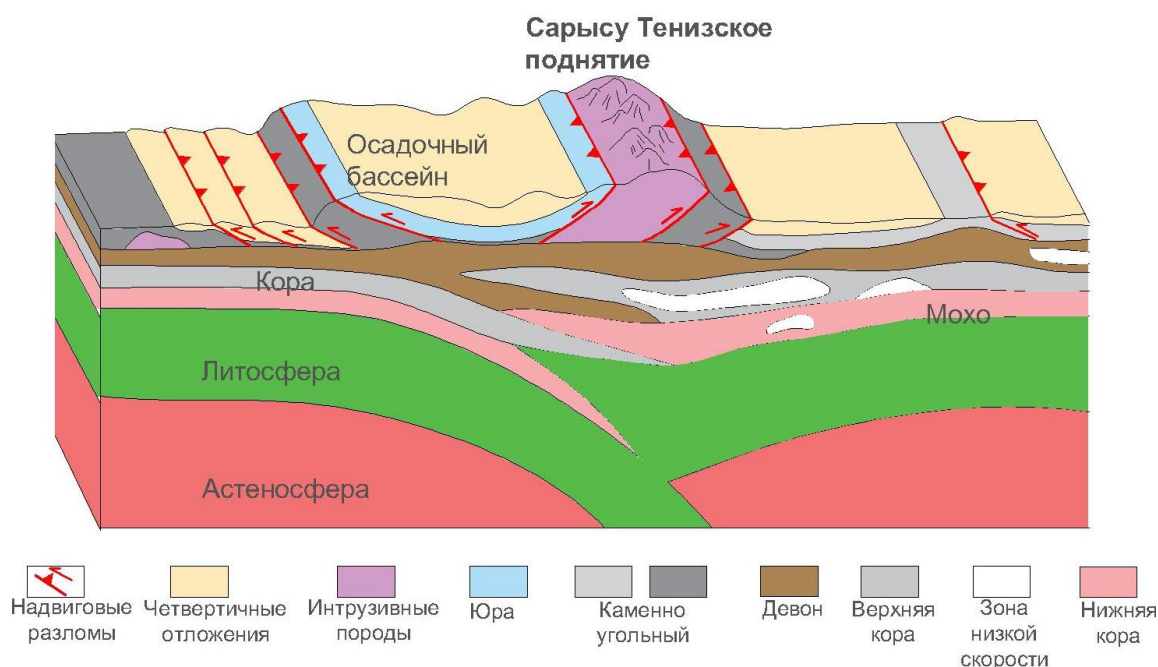


Рисунок 3.4 – Геодинамическая модель внутриконтинентального бассейна, вызванная подлитосферными воздействиями

Помимо рифтовых впадин, к числу внутриконтинентальных структур относятся и флексурные бассейны, которые формируются в результате сжатия и выпучивания континентальной литосферы. По механизму образования они связаны с флексурным изгибом и прогибанием земной коры под воздействием тектонических нагрузок (рис. 3.7).

Этого типа бассейны формируются преимущественно в зонах сжатия и коллизии, часто сопряжены с орогенами и играют ключевую роль в аккумуляции терригенного материала, поступающего с горных систем. Их седиментационные особенности характеризуются высокими темпами осадконакопления, развитием моласс и значительными вариациями фаций от аллювиальных до лагунных.

В условиях Центрального Казахстана угленосные формации мезозоя приурочены преимущественно к рифтовым внутриконтинентальным бассейнам:

- Литосферные процессы – ослабление и разуплотнение коры в зонах позднепалеозойских сдвигов.
- Литосферные факторы – локальная мантия-плюмовая активность и тепловое перерезогревание нижней коры.
- Супергенные процессы – значительный снос терригенного материала с орогенов в условия замкнутых и полузамкнутых бассейнов.

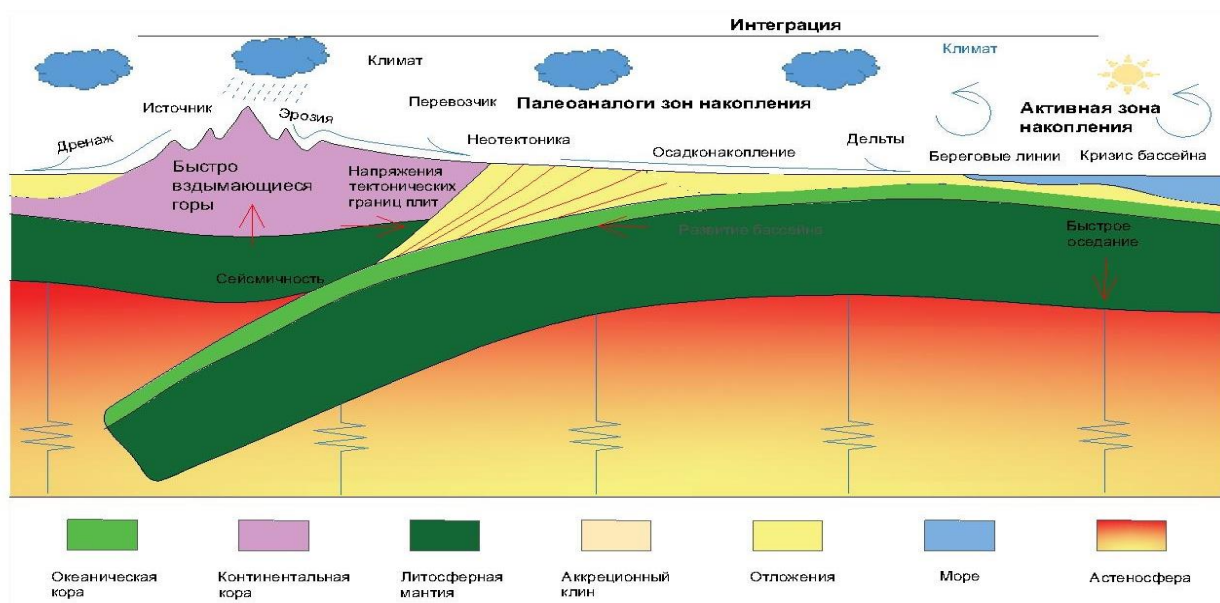


Рисунок 3.5– Механизм формирования бассейна, подверженный влиянию земной поверхности (изменено из [53])

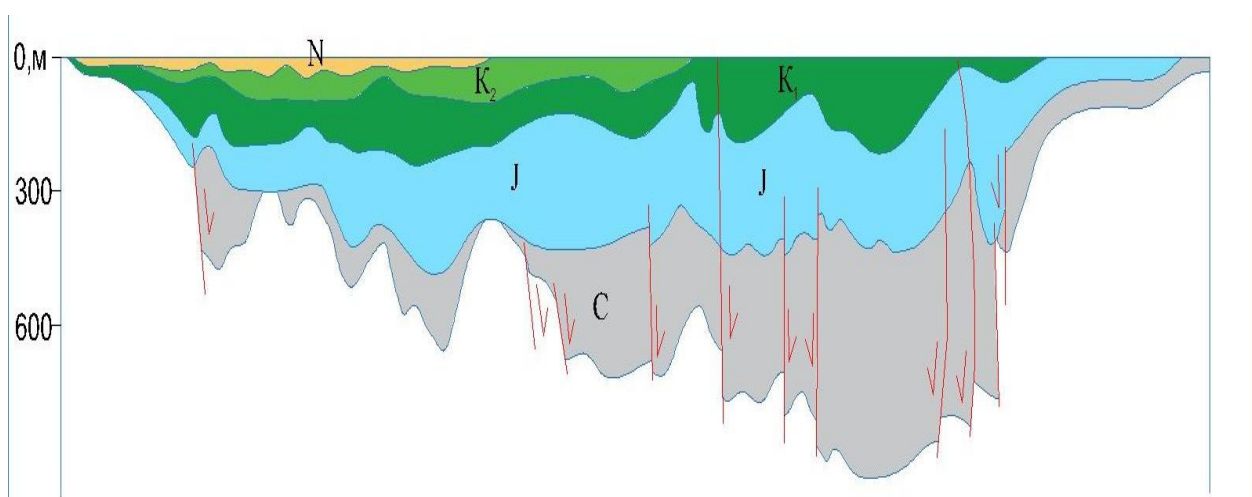


Рисунок 3.6 – Поперечный разрез типичного внутриконтинентального бассейна растяжения (изменено из [53])

Такой тип бассейнов характеризуется медленным неравномерным оседанием, развитием обширных аллювиально-озёрных систем и благоприятными условиями для накопления мощных угленосных толщ.

Шубаркольский угленосный район (юго-запад региона) интерпретируется как постколлизийная рифтовая впадина юрского времени, возникшая в условиях внутриконтинентального растяжения. Месторождение генетически и пространственно связано с поперечным рифтом девонского краевого вулcano-плутонического пояса Центрального Казахстана и перекрывающим его терригенным бассейном карбона. Унаследованный рифт заложил линии слабости, которые в мезозое «перезапустились» как каналы субсиденции и флюидопроводящие зоны, контролировавшие угленосные осадочные ловушки.

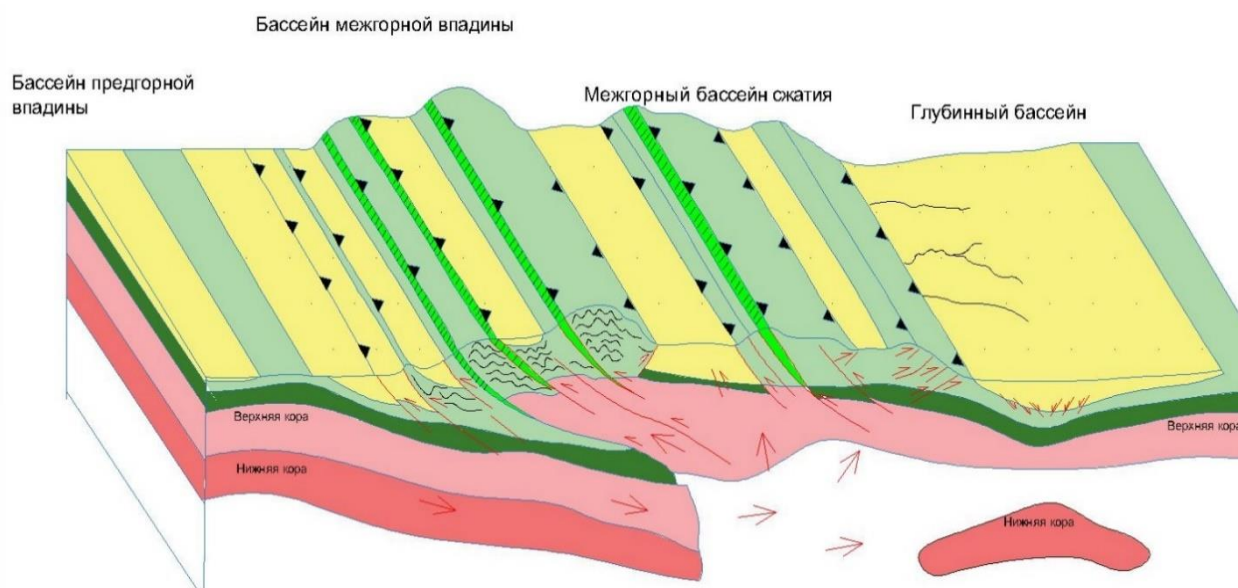


Рисунок 3.7 – Пространственное распределение внутриконтинентальных флексурных бассейнов (изменено из [53])

Майкубенский буроугольный бассейн (северо-восток региона) рассматривается как внутриконтинентальная структура растяжения, развивавшаяся на краю Сарысу-Тенизской зоны. Бассейн демонстрирует постепенный рост угленакопления от ранней к средней юре (J1→J2) на фоне стабилизации блока-фундамента и локального растяжения. Его положение относительно Сарысу-Тенизского поднятия подчёркивает роль последнего как водораздельной и седиментационной границы между системами Чу-Сарысу и Тениз [1]. Они принципиально отличаются от флексурных впадин по ряду параметров в таблице 3.1:

Таблица 3.1 – Внутриконтинентальные бассейны: рифтовые (растяжение) и флексурные (сжатие)

Аспект	Рифтовые внутриконтинентальные бассейны (растяжение)	Флексурные внутриконтиненталь ные бассейны (сжатие)	Вывод для Ц. Казахстана
Геодинамич еский режим	Растяжение, утонение литосферы; наследование зон слабости	Сжатие/выпучивание литосферы, изгиб коры под нагрузкой орогена	В регионе оба механизма присутствуют, но мезозойская

			угленосность привязана преимущественно к растяжению
Типы разломов	Нормальные, листраловые; рифт-параллельные	Обратные/надвиги, флексурно-связанные сдвиги	Шубарколь/Майкубенский бассейн контролируются нормальными разломами
Геометрия бассейна	Грабены/полуграбены; позднее – широкие депрессии термооседания	Асимметричные прогибы с передовым и внетыловым флангами	Рифтовая морфология благоприятствует локальным угленакопительным ловушкам
Преобладающие фации	Болотные, озёрные, дельтовые; тонкие терригенные серии	Молассы, аллювиальные конусы, конгломераты; грубообломочный разрез	Рифтовые бассейны более «углеёмкие» по фациям
Источники осадков	Локальные бортовые уступы рифта; ограниченные водосборы	Крупные орогены – мощный терригенный приток	Флексурные впадины – «пылесосы» терригенного материала, но не оптимальные для угля
Потенциал угленакопления	Высокий (устойчивые редокс-условия, заболачивание)	Ниже (частые размывы, грубый материал, неустойчивые водно-болотные условия)	Шубарколь и Майкубенский бассейн – «рифтовый сценарий» угленакопления
Глобальные аналоги	Провинция Basin & Range; Восточно-Африканский рифт; Североморский бассейн (на стадии термооседания)	Предгорные/межгорные прогибы Анд, Гималаев, Тянь-Шаня	
Ц. Казахстан	Шубарколь – постколлизийная рифтовая впадина юры; Майкубенский бассейн – рифт с ростом угленакопления J1→J2	Флексурные впадины у фронтов орогенов (меньшая угленосность мезозоя)	Акцент на различии механизмов и фаций

Угленосные формации Центрального Казахстана являются продуктом взаимодействия интенсивных тектонических движений, контролировавших морфологию впадин, и благоприятных палеогеографических условий, обеспечивавших аккумуляцию растительного материала в условиях обильного увлажнения и замедленного разложения органики. Их пространственное размещение и строение тесно связаны с региональной структурной зональностью мезозойского тектоногенеза [41].

3.3 Эволюция мезозойских угленосных бассейнов Центрального Казахстана

3.3.1 Общие геодинамические условия мезозоя

Геологическая история мезозоя Центрального Казахстана характеризуется чередованием фаз стабилизации и активизации разломно-блоковой тектоники, относимых к дейтероорогенезу. Эти фазы контролировали:

- скорость субсиденции;
- форму осадочных ловушек;
- распределение мощности осадочного чехла от локальных депрессий с максимальными мощностями до поднятых блоков с редуцированным разрезом.

Геодинамические модели бассейнов Шубарколь и Майкубень позволяют интегрировать данные о тектонике, стратиграфии и фациальной зональности в единую концепцию эволюции мезозойских угленосных формаций Центрального Казахстана.

На основе анализа и объединения литературных данных по триас-меловому периоду выделяются три ключевых этапа развития бассейнов:

1. *Триас-ранняя юра*. Формирование внутриконтинентальных прогибов постколлизийного типа в пределах ЦАОП. Закладываются основные рифтовые структуры, контролирующие положение будущих бассейнов.

2. *Средняя-поздняя юра*. Активизация блоковой тектоники и ускоренная субсиденция обусловили аккумуляцию мощных угленосных толщ. В этот период наблюдается чёткая фациальная зональность: болотные комплексы приурочены к окраинам впадин, дельтово-озёрные – к центральным частям бассейнов.

3. *Мел*. Продолжение неравномерной субсиденции с локальной инверсией. Угленосность постепенно сокращается, но сохраняются условия для накопления тонких угольных пластов в отдельных депрессиях (рис. 3.8).

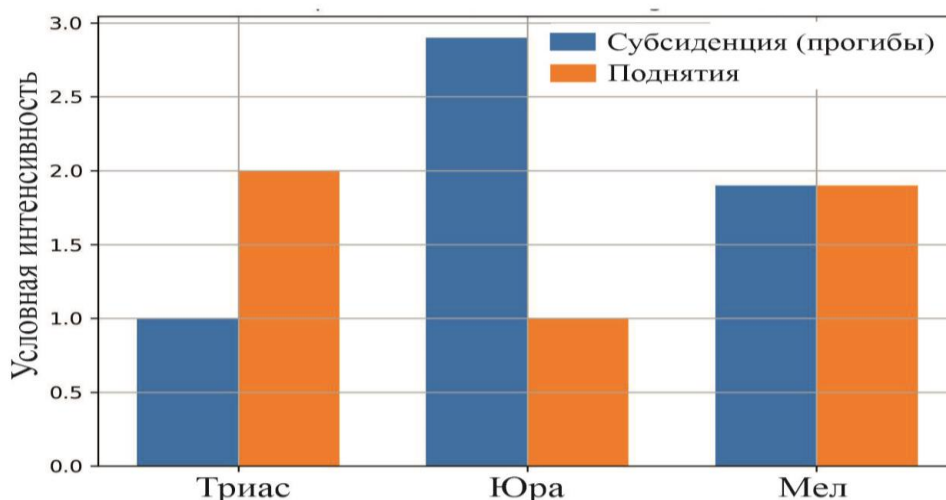


Рисунок 3.8 – Геодинамическая эволюция бассейнов Центрального Казахстана (триас → юра → мел) [составлено автором по материалам 41, 46; 38]

3.3.2 Мезозойские субсиденционные зоны

Опираясь на данные по геодинамической эволюции региона, выделяются мезозойские субсиденционные зоны, контролируемые глубинными разломами. Согласно тектоническим картам Buslov [41], такие зоны имеют линейно-вытянутую конфигурацию и приурочены к разломно-блоковым структурам, в пределах которых вероятно формирование угленосных бассейнов типа Шубаркольского и Майкубенского.

В интерпретации А.А. Моссаковского [67] эти структуры соответствуют постколлизийным прогибам Центрально-Азиатского складчатого пояса, сформированным в условиях дейтероорогенеза. Материалы [2] «Геологии СССР» уточняют стратиграфическое положение и структурные этапы юрско-мелового времени, фиксируя чередование фаз тектонической активизации и относительной стабилизации.

В представленной схеме (рис. 3.9) показаны относительные изменения интенсивности субсиденции и поднятий, отражающие основные пульсации мезозойской геодинамики региона. Схема отражает относительные изменения вертикальных движений, позволяя визуализировать этапы активизации и затухания геодинамических процессов.

Сравнение с альтернативными моделями, где основным фактором углеобразования считался климат, показывает, что тектоника имела ведущую роль, а климат выступал лишь модифицирующим элементом.

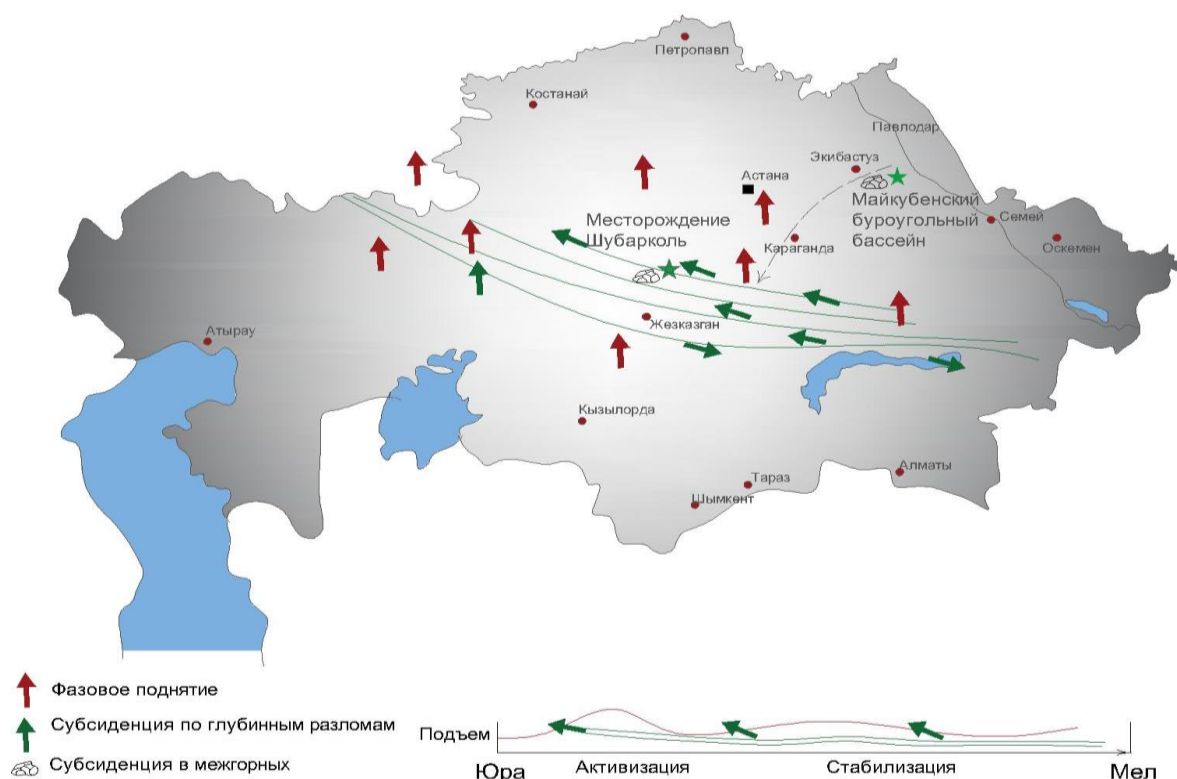


Рисунок 3.9 – Обобщённая интерпретационная схема мезозойской геодинамики Центрального Казахстана [составлена автором по материалам 41, 46; 38]

3.3.3 Этапы мезозойского углеобразования

На основе обобщённых данных [41, 3, 68] выделяются четыре основные эпохи углеобразования, отражающие региональные этапы геодинамического развития и климатические изменения. Эти этапы представлены в виде следующей схемы (табл. 3.2). Юрский этап угленакопления по своей интенсивности сравним с карбоновым и охватил всю территорию Казахстана. Он начался в позднем триасе и закончился к поздней юре [69].

Таблица 3.2 – Этапы мезозойского углеобразования Центрального Казахстана

Этап	Возраст	Геодинамические условия	Фациальная обстановка	Характер угленакопления
I	Поздний триас (Т ₃) (нижний-средний кейпер)	Постороженная денудация, формирование прогибов	Озёрно-речные и пойменные фации	Локальные линзы углей
II	Ранняя юра (J ₁) (ретский-средний лейас)	Стабильное оседание депрессий	Озёрно-дельтовые, болотные комплексы	Формирование мощных пачек бурых углей (Майкубенский бассейн)
III	Средняя юра (J ₂) (байос-батон)	Максимум увлажнения и субсиденции	Протяжённые болотные равнины, торфяники	Наиболее продуктивные пласты бурых углей (Шубарколь)
IV	Поздняя юра (J ₃)	Ускорение денудации и регрессии	Преобладание песчаников, сокращение болот	Локальные угольные горизонты

Далее подробно рассматривается каждый цикл:

1. Поздний триас (нижний-средний кейпер). Проявился в Урало-Каспийском и Тургайском бассейнах. Угленосными являются курашасайская и узынкольская свиты.

2. Ранняя юра (ретский возраст). Перерыв в углеобразовании на ранний лейас с накоплением грубообломочных пород. Нижнеюрские угленосные осадки представлены в Тургайском, Карагандинском и Майкубенском бассейнах (кушмурунская, дубовская, ащикольская и талдыкольская свиты).

3. Средняя юра (байос-батон). Широкое распространение и высокая интенсивность угленакопления. Крупнейшие месторождения: Шоптыкольское, Михайловское, Восточно-Уральское, Орловское, Кызылтальское, Койтас, Юбилейное, Илийский бассейн, Урало-Каспийский бассейн, Мангышлакская группа.

4. Поздняя юра (доггер). Начало терригенного и грубообломочного осадконакопления ааленского возраста. Угленосность снижена, кроме Майкубенского бассейна, где осадки содержат значительные пласты угля.

Общность разрезов юрских отложений различных бассейнов Казахстана свидетельствует о единстве геологического развития и сходных

климатических условиях мезозоя. Пространственное распределение и типизация угольных месторождений подчёркивают определяющую роль геодинамического фактора, контролировавшего характер субсиденции, морфологию бассейнов и интенсивность угленакопления.

3.3.4 Классификация угольных бассейнов по геотектоническому положению

Мезозойские угольные месторождения Казахстана делятся на три типа:

1. Первый тип – Тургайский, Карагандинский, Майкубенский, Орский бассейны, Койтасская группа и Юбилейное:

- сформированы в пределах крупных грабеноподобных впадин;
- контролируются линейно вытянутыми субсиденционными зонами;
- характеризуются мощными, ритмичными угольными пластами (Шубарколь-Майкубенская модель).

2. Второй тип – Илийский бассейн, месторождения Ленгер, Алаколь, Кендырлик:

- крупные межгорные впадины;
- окаймлены антиклинориями;
- мощности угольных пластов ниже из-за меньшей интенсивности субсиденции.

3. Третий тип – Урало-Каспийский бассейн:

- угленосные отложения связаны с прикупольными мульдами компенсационного характера;
- формировались синхронно с ростом соляных диапиров.

Шубарколь-Майкубенская модель является примером влияния глубинного разломного контроля и пульсационного режима субсиденции на угленакопление. Сравнение с другими типами бассейнов Казахстана демонстрирует, что различия в тектоническом положении и морфологии впадин напрямую влияли на характер угленакопления, подчёркивая ведущую роль геодинамического фактора в мезозойской истории региона.

3.4 Особенности строения и угленосности месторождения Шубарколь и бассейна Майкубень

Наиболее продуктивные мезозойские угленосные комплексы Центрального Казахстана связаны с юрским этапом. Для анализа выбраны два ключевых объекта, отражающих разные структурно-фациальные зоны региона: Шубаркольское месторождение (юго-запад) и Майкубенский бассейн (северо-восток).

Шубаркольское месторождение расположено на юго-западном фланге Сарысу-Тенизского поднятия и формировалось в унаследованной депрессии каледонских аккреционно-складчатых зон. Структурно представляет собой асимметричную мулду размером $\sim 7 \times 16$ км с пологим ядром ($3-5^\circ$) и крутыми крыльями (до 90°). Мощность нижнеюрских угленосных толщ

достигает 330 м, включающих три промышленных пласта: верхний, средний и нижний.

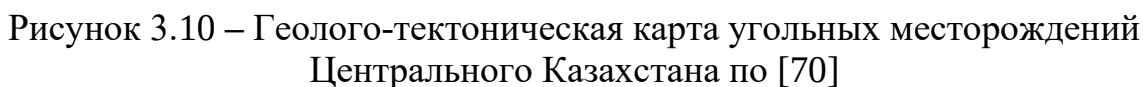
Геохимически угли Шубарколя обогащены литофильными элементами (Ba, Sr, Zr, Nb, Hf) и тяжелыми редкоземельными элементами (REE), а также минералами-носителями (барит, циркон, сфалерит). Такой состав определяется сочетанием гранитоидно-вулканогенных пород-источников и циркуляцией низкотемпературных гидротерм. Фациально бассейн представлен сочетанием озёрно-болотных, дельтовых и аллювиально-озёрных комплексов, с максимальной угленосностью в центральной озёрно-болотной зоне. Палеогеодинамически бассейн развивался в условиях рифт-контролируемой тектоники с локальным влиянием вулканокластики.

Майкубенский бурогольный бассейн локализован на Тургайской плите и приурочен к субсиденционной впадине платформенного типа. Мощность юрских отложений 1000-1500 м, с 4 основными свитами (Ашшыкольская, Талдыкольская, Шоптыкольская, Жиренкольская) и до 14 угольных пластов. Угли гумусовые, бурые, с низкой степенью метаморфизма, формировались преимущественно в болотных и озёрно-дельтовых фациях. Фациальное распределение характеризуется централизацией мощных угольных пластов в болотных зонах и постепенным утончением к периферии. Тектонические нарушения ограничены отдельными разломами, создавая локальные флексуры и сохранение синклинальной структуры бассейна.

Общие особенности:

- Юрские угленосные толщи формировались в унаследованных депрессиях на палеозойском фундаменте.
- Основные литологии: песчаники, алевролиты, аргиллиты и углистые сланцы, с переслаиванием тонких угольных пластов.
- Геодинамический режим контролировал мощность угленосных толщ, стратиграфию и геохимию углей.
- Тектонические и гидродинамические условия определяли пространственную фациальную дифференциацию, создавая зоны обогащения элементами-примесами.

Шубарколь и Майкубенский бассейн являются репрезентативными объектами мезозойского углеобразования Центрального Казахстана (рис. 3.10), демонстрируя различия в тектоническом контроле, литологическом составе и геохимическом облике углей, что важно для прогнозирования промышленной угленосности и металлоносности угольных пластов.



Месторождение формировалось в унаследованной депрессии Сарысу-Тенизского поднятия, в пределах структурного каркаса каледонских аккреционно-складчатых областей. Структурно оно представлено асимметричной мульдой с размерами около 7×16 км. Нижнеюрская угленосная толща достигает ~330 м и включает три главных пласта (верхний, средний и нижний), эксплуатируемых преимущественно в нижней части разреза (рис. 3.11).

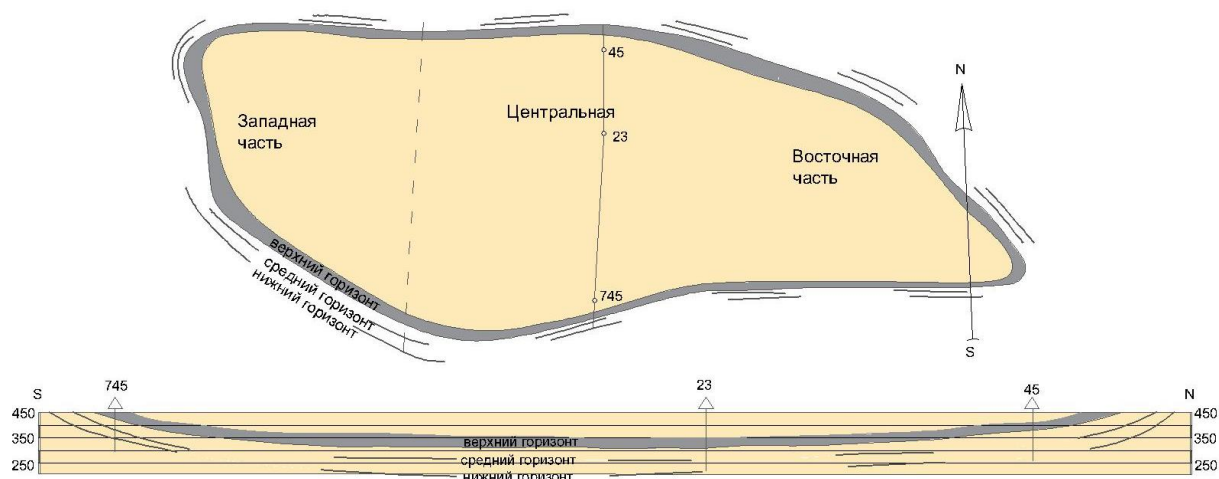


Рисунок 3.11 – Месторождение Шубарколь. Карта выходов угольных пластов

Стратиграфия и литология. В геологическом строении месторождения принимают участие терригенно-карбонатные отложения верхнего девона и нижнего карбона, терригенные породы средне-верхне каменноугольного возраста (палеозойские отложения), а также рыхлые продукты выветривания мезозоя и рыхлые отложения кайнозоя (рис. 3.12).

- Девон и каменноугольный палеозой представлены терригенно-карбонатными и морскими карбонатными отложениями, а также рыхлыми продуктами выветривания мезозоя и кайнозоя.

- Мезозойские юрские отложения представлены песчаниками, алевролитами, аргиллитами и углями, мощность ~250-280 м.

- Кайнозойские отложения (неогеновые и четвертичные) распространены по всей площади месторождения, включают монтморилонитовые глины, известняки, пески, щебенисто-пылеватые суглинки мощностью до 30 м (неоген) и 5–8 м (четвертичные).

Геохимическая специализация. Угли Шубарколя обогащены литофильными элементами (Ba, Sr, Zr, Nb, Hf) и тяжёлыми РЗЭ, с автогенными минералами (барит, сфалерит, циркон). Наиболее высокие концентрации отмечены в зонах выветривания углей.

Тектоническая характеристика. Месторождение связано с наследуемой депрессией, асимметричной мульдой с пологим ядром (3-5°) и более крутыми крыльями, расчленёнными палеозойскими разломами. Максимальные углы падения пород: северное и южное крыло 40-90° и 20-48°; внутренние участки 3-5°.

Промышленное значение. Промышленная угленосность сосредоточена в нижней части юрских отложений, три угольных горизонта, верхний – основной для открытой разработки. Угли имеют потенциал металлосырья благодаря повышенному содержанию редких элементов [33].



65

3.4.2 Майкубенский бассейн

Бассейн вытянут в широтном направлении, расположен на Тургайской плите, приурочен к кайнозойским внутриконтинентальным впадинам на герцинском фундаменте. Он представляет собой пологоувалистую равнину с речными долинами. Бассейн сформировался как субсиденционный прогиб, где угленосные толщи залегают в условиях слабой тектонической активности [71].

Стратиграфия. Мезозойские юрские отложения подразделяются на четыре свиты (снизу вверх): Ашшыкольская, Талдыкольская, Шоптыкольская и Жиренкольская, общая мощность ~1000-1500 м, до 14 пластов угля. В основании – конгломераты и грубозернистые песчаники, выше – алевролиты и глины с углями; кровля часто гравелиты/галечники. Основные угольные горизонты находятся на глубинах 500–650 м (рис.3.13).

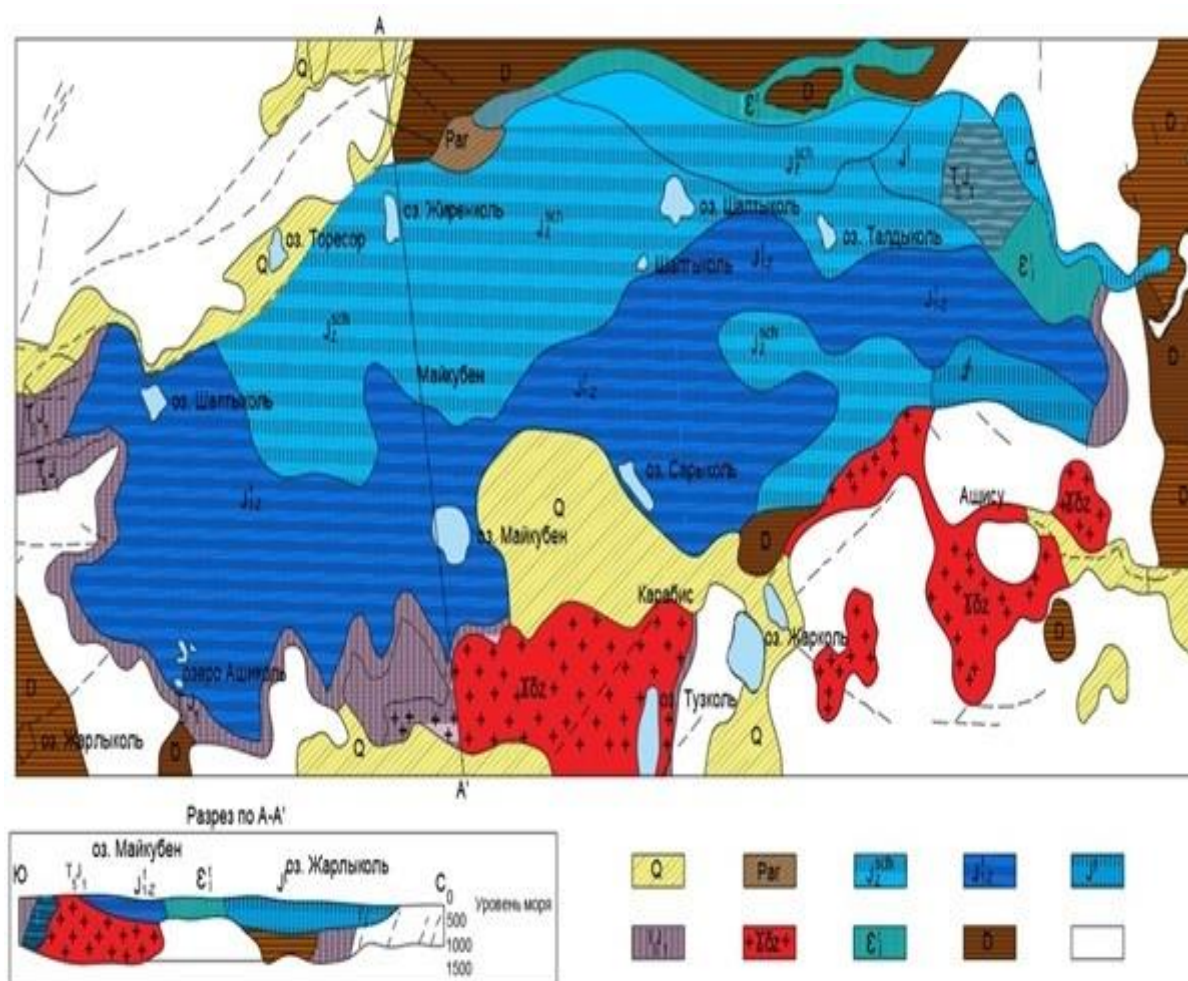
Литогенез и угли. Угли гумусовые, образованы остатками высших растений, с низкой степенью метаморфизма, высоким содержанием летучих веществ и значительным выходом смол. Это отражает молодой геологический возраст бассейна и умеренный климат мезозоя.

Тектоно-седиментационные условия. Формирование происходило в локальных депрессиях эпейрогенного типа, что обеспечило сохранение болотных экосистем и накопление мощных гумусовых залежей. Дислокации фундамента и локальная тектоническая активность создавали ритмично построенные угленосные толщи с нерегулярным чередованием пластов угля и терригенных пород.

Геохимическая специализация Майкубенского бассейна:

- Угли обеднены литофильными элементами, преобладают легкие элементы (Si, Al, Fe) и углеродные остатки;
- Содержание редких и тяжелых элементов значительно ниже, чем в Шубарколе;
- Минералогический состав включает кварц, полевой шпат, глинистые минералы и карбонаты;
- Геохимические особенности отражают преимущественно болотное и озёрно-дельтовое происхождение углей и низкую тектоническую активность бассейна.

Экономико-промышленное значение. Майкубенский бассейн содержит значительные промышленные запасы бурых углей, стратегически важный для энергетики региона.



1 – современные отложения; 2 – нижний олигоцен; 3 – шоптыкульская свита; 4 – талдыкульская свита; 5 – сарыкульская свита; 6 – свита базального конгломерата; 7 – ранневарисский интрузивный комплекс; 8 – турнейский ярус; 9 – девонские отложения; 10 – додевонские отложения

Рисунок 3.13 – Геологическая карта Майкубенский бассейнового угольного бассейна

3.5 Пространственная фациальная дифференциация угленосных отложений

В юрском периоде Казахстан был расположен в зоне умеренного климата с периодическими дождями, что способствовало образованию обширных болот и водоемов. Эти условия обеспечили благоприятную среду для роста растительности и накопления органических отложений [1]. Общими чертами юрских отложений месторождений являются: генетически разобщенное залегание в унаследованных депрессиях и впадинах платформенного герцинского фундамента; литологический состав и характер зональности фаций озерного типа; континентальный облик осадков с относительно, большим количеством грубообломочных и осадочных отложений; коэффициент угленосности; фундамент морских отложений представлен метаморфизированными породами палеозоя, мезозойского цикла осадконакопления.

Фациальный анализ указывает на преобладание болотных, озёрных и дельтовых обстановок. В таких условиях формировались угли с различной степенью зольности и мощности. Особенно значимыми являются низкоэнергетичные фации, благоприятные для аккумуляции органического вещества.

«Угленосные отложения формировались в условиях низкоэнергетичных болотистых равнин с перемежающимися паводковыми наносами» [2, с. 245].

Шубаркольское месторождение (J2). Его пространственная структура отличается сочетанием озёрно-болотных, дельтовых и аллювиально-озёрных фаций, что обусловлено как тектоническими, так и гидродинамическими факторами седиментации. Фациальные условия представлены болотными и озёрными осадками. Геохимические исследования выявляют специфическое распределение редкоземельных элементов, включая отрицательную аномалию церия и присутствие автогенных минералов [32].

Гумидный климат способствовал росту растительности и замедленному разложению органики, а развитая палеогидросеть и гидродинамически слабая открытость депрессий накоплению мощных торфяников. В приразломных зонах на бортах впадин преобладают грубообломочные фации, в центральных частях алевроито-глинистые с устойчивыми углеперерывами.

Посторогенная внутриплитная депрессия, контролируемая субмеридиональными разломами; угленосные толщи до ~300 м в озёрно-болотных фациях. Наличие тонкодисперсных сорбентов (глинистые минералы, гидрослюды) благоприятствует накоплению Ge и V.

Центральная часть бассейна характеризуется озёрно-болотной фацией, в пределах которой происходило формирование мощных и равномерных угольных пластов. Как отмечают исследователи, «месторождение Шубарколь характеризуется аномально высокими содержаниями Ba, Sr, U, Th, Rb, Fe, Co, Ce, Zn и Sc в углях» (Parafilov et al., 2020). Более того, «средние концентрации Ce, Ba, Sr, Sc и Zn в углях Шубарколя превышают мировые кларковые значения для углей» [72].

Особое значение имеют тектонические факторы. Палеогеографическая реконструкция показывает, что «источниками минерализации, обогащающей угли Шубаркольского бассейна редкими и редкоземельными элементами, служили гранитоидные массивы Кокчетау, Каптядыр, Арганатинский и Улутау» [32]. Эти данные подтверждают тесную связь бассейна с крупными тектоническими структурами Центрального Казахстана. В частности, «палеотектоническая структура бассейна, связанная с поднятием Сарысу–Тениз, определяет пространственную приуроченность зон обогащения элементов-примесей».

Минералогические исследования последних лет усилили представления о внутренней неоднородности бассейна. Так, «угли Шубаркольского бассейна содержат ассоциации редкоземельных минералов, подтверждающие автогенное накопление REE в процессе диагенеза» [73]. Более того, «наличие тонкодисперсных REE-фаз в углях свидетельствует о

сложном механизме их поступления, включающем как кластогенные, так и гидротермальные источники».

Таким образом, пространственная фациальная дифференциация угленосных отложений Шубаркольского бассейна проявляется в латеральной смене озёрно-болотных, дельтовых и аллювиально-озёрных комплексов. Как было отмечено в фундаментальных трудах, *«пространственная дифференциация фаций Шубаркольского бассейна обусловлена тектоническим контролем и гидродинамическими условиями седиментации, что проявляется в латеральной смене озёрно-болотных, дельтовых и аллювиально-озёрных комплексов»* [2].

Майкубенский буроугольный бассейн ($J1 \rightarrow J2$). Геохимические особенности включают локальное обогащение углей элементами-примесями (Ge, Sr, Ba, редкоземельные элементы), что связывается с фациальным контролем и влиянием гидротермальных флюидов [74].

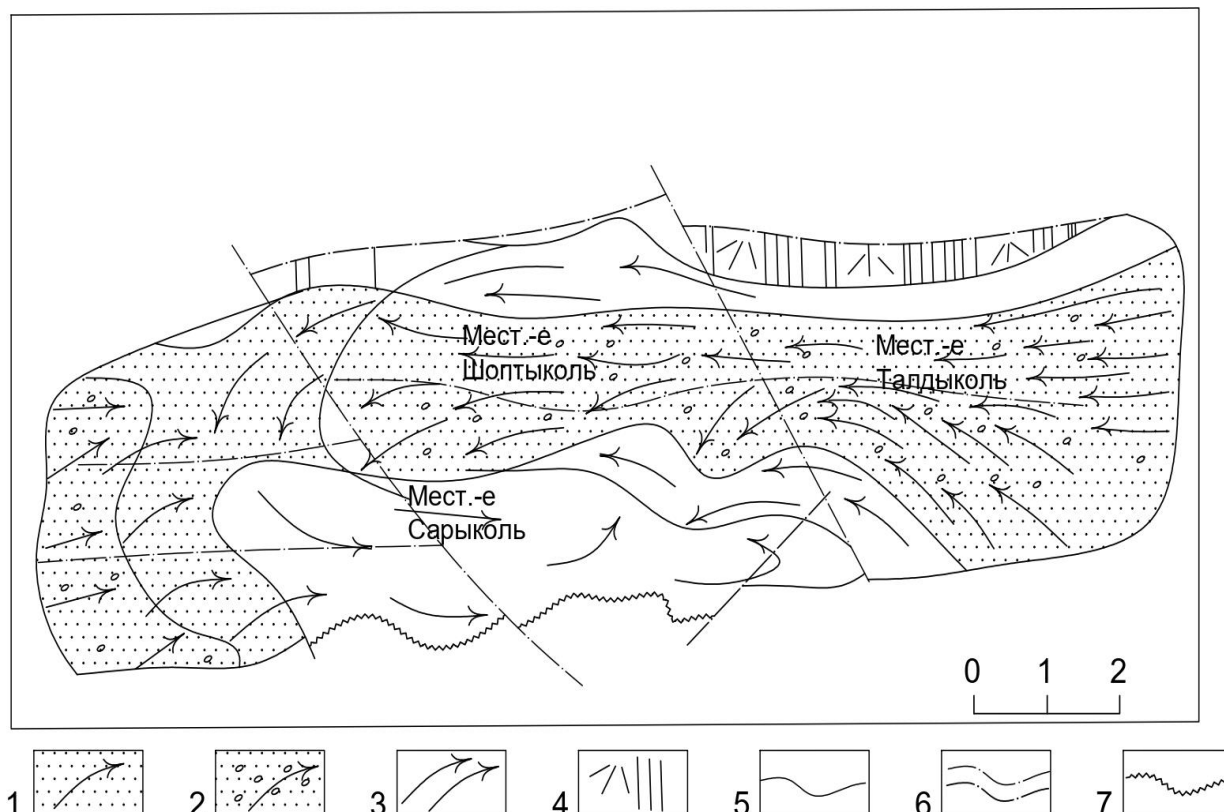
В пределах мульды выделяется несколько литолого-фациальных зон с различной мощностью и петрографическим составом угленосных толщ. Изучая стратиграфический разрез юрских отложений в различных частях региона, можно подметить некоторую закономерность в изменении литологического состава и замене одних фаций другими как в вертикальном, так и горизонтальном направлениях. На эту закономерность/цикличность/ впервые обратил внимание С.Н. Стулов, положивший её в основу своего стратиграфического подразделения юрских отложений на отдельные циклы и подциклы. Причем выделенным им циклам и подцикла С.Н. Стулов придал широкий региональный стратиграфический характер.

Поскольку наблюдается резкая смена условий накопления по площади бассейна Майкубень, можно предполагать, что фундамент депрессии, сложенный полеозойскими породами, был разбит на отдельные блоки, погружение которых происходило с неодинаковой скоростью.

Таким образом, смена фаций в пределах региона объясняется, с одной стороны, постепенным погружением ложа депрессии, приводившим к перемещениям по площади бассейна русел временных и постоянных водотоков, что, в свою очередь, влекло за собой изменение местоположения фаций пойм и болот, а с другой, неравномерным погружением отдельных блоков полеозойского фундамента на общем фоне длительного и спокойного погружения ложа депрессии [75, 76, 77]. В дальнейшем вся масса грубообломочных образований сносилась водными потоками во впадину, где она подвергалась дальнейшей переработке и перераспределению по площади. В зависимости от ослабления колебательных движений в области прогибания и поднятия, а также по мере заполнения впадины, выравнивания ложа депрессии и ослабления деятельности водных потоков, отложение грубообломочных пород сменялось отложением более тонкозернистых материалов (рис. 3.14).

Угли Майкубенья накапливались в условиях низкоэнергетичных болотных равнин, чередующихся с фазами активного аллювиального накопления, что обусловлено колебательным режимом осадконакопления и

неоднородной тектонической активностью. Это создало ритмично построенные угленосные толщи с нерегулярным чередованием пластов угля и терригенных пород.



1 – озеро с ослабленными водотоками, 2 – внутриозерное продолжение стреневых частей речных течений, 3 – проточное озеро, 4 – предполагаемые зоны осыпей с пересыхающими болотами, 5 – условные границы внутриозерных зон, 6 – сингенетические разломы, 7 – граница современного распространения юрских углевмещающих образований.

Рисунок 3.14 – Палеогеографическая схема времени накопления верхней части Талдыкольской свиты по [4]

Важно отметить, что тектоническая активизация на отдельных участках бассейна (особенно вблизи северо-восточных бортов) приводила к флексурному нарушению слоёв и локальной разорванности пластов. Некоторые угольные пласты проявлены не на всей территории бассейна, а приурочены к фациально стабильным участкам синклинали.

Фациальная дифференциация. В пределах бассейнов прослеживается закономерная смена фаций от континентальных болотных (с наибольшим накоплением органики) к дельтовым и озёрно-аллювиальным (обогащённым терригенным и вулканогенным материалом). На месторождении Шубарколь наблюдается более плавная латеральная смена фаций, а также наиболее продуктивные угленосные формации приурочены к озёрно-болотной центральной фации, в то время как аллювиальные зоны по периферии бассейна имеют ограниченный потенциал угленакопления (табл. 3.3 и рис. 3.15).

Таблица 3.3 – Сравнение фациальных зон месторождения Шубарколь и Майкубенского бассейна

Фация	Шубаркольское месторождение	Майкубенский бассейн
Озёрно-болотная	Центр, мощные угли, низкая зольность	Центр, мощные угли, равномерная зольность
Дельтовая / дельтово-болотная	Восток-ЮВ, перемежающиеся пласты	Центр, наиболее мощные угольные пласты
Аллювиально-озёрная	СЗ, тонкие прослои, вулканокластика	ЮЗ, песчано-гравийные толщи, слабая угленосность
Озёрно-дельтовая	Слабо выражена	Периферия, переходные комплексы

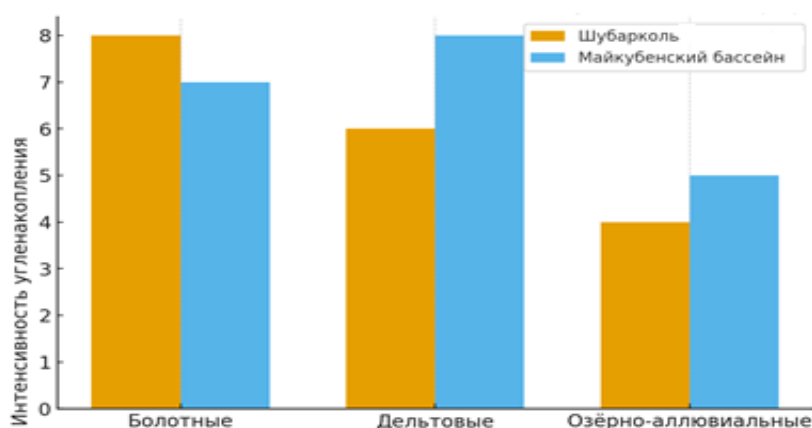


Рисунок 3.15 – Фациальная дифференциация угленосных формаций

Пространственная фациальная дифференциация юрских угленосных бассейнов Центрального Казахстана отражает контрастность геодинамических условий:

- месторождение Шубарколь развивался в условиях рифт-контролируемой тектоники с активным поступлением вулканокластики, что обусловило локальное обогащение углей редкими и редкоземельными элементами.

- Майкубенский бассейн формировался как субсиденционный прогиб, где доминировали болотные и дельтовые обстановки, обеспечившие развитие мощных и равномерных угольных пластов.

Различия в фациальной организации и геохимическом облике бассейнов подчёркивают ведущую роль тектоники и осадочных условий в пространственном распределении угленосных формаций и формируют основу для прогностических моделей выявления зон с аномальным содержанием элементов-примесей.

3.6 Сравнительная характеристика месторождений Шубарколь и Майкубенский бассейн

Месторождения Шубарколь и Майкубенский бассейн, расположенные в пределах Центрального Казахстана [72], представляют собой два репрезентативных объекта мезозойской угленосности региона, формировавшиеся в сходных, но не идентичных геодинамических и палеогеографических условиях. Их сопоставление позволяет выявить общие черты и различия в условиях осадконакопления, литолого-стратиграфическом строении и геохимических параметрах угленосных толщ (см. табл. 3.4).

Месторождение Шубарколь расположено в Карагандинской области, в пределах Нуринаского района, и приурочено к южному флангу Сарысу-Тенизского прогиба, где в мезозое преобладали условия пассивного subsidирования и озёрно-болотного осадконакопления. В свою очередь, Майкубенский бассейн локализуется в Павлодарской области, к юго-западу от Экибастуза, и приурочен к Иртышско-Экибастузскому прогибу, где формировалась преимущественно озёрная фациальная обстановка в условиях локализованной тектонической активности.

Майкубенский бассейн наряду с Экибастузом и Карагандой относится к основным центрам добычи бурых углей в Казахстане, в то время как Шубарколь характеризуется как крупное месторождение бурого и каменного угля с низкой степенью метаморфизма и значительным промышленным потенциалом.

Таким образом, несмотря на общую принадлежность к мезозойскому угленосному поясу Центрального Казахстана, каждое из месторождений демонстрирует индивидуальный путь фациального и геохимического развития, обусловленный различиями в тектоническом режиме, литогенезе и гидрогеологических условиях на этапе углеобразования (см. табл. 3.4).

Таблица 3.4 – Сравнительная характеристика месторождений Шубарколь и Майкубенский бассейн

Параметр	Шубаркольское месторождение	Майкубенский бассейн
Расположение	Карагандинская обл., южный фланг Сарысу-Тенизского прогиба	Павлодарская обл., Иртышско-Экибастузский прогиб
Тектонический контроль	Рифт-контролируемая депрессия, асимметричная мульда, активное влияние вулканокластики	Субсиденционный прогиб платформенного типа, локальная тектоническая активность, слабые сбросы
Структурные особенности	Пологие ядро (3-5°), крутые крылья (до 90°), разломы палеозойского фундамента	Пологоувалистая равнина, синклиналь, локальные флексуры и разломы на северо-востоке
Стратиграфия и литология	Песчаники, алевролиты, аргиллиты, угли; переслаивание тонких пластов; кайнозойские аллювиальные и	Конгломераты, песчаники в основании; алевролиты, аргиллиты, угли выше; гравелиты/галечники в кровле

	монтмориллонитовые отложения	
Фациальная дифференциация	Озёрно-болотная (центр), дельтовая, аллювиально-озёрная (периферия); латеральная смена фаций более плавная	Централизованная болотная фация, озёрно-дельтовая по периферии; ритмичное чередование угля и терригенных
Геохимическая специализация	Высокое содержание Ba, Sr, U, Th, Rb, Fe, Co, Ce, Zn, Sc; автогенные минералы (барит, циркон, сфалерит); REE-ассоциации	Локальное обогащение Ge, Sr, Ba, REE; влияние фациального контроля и гидротермальных флюидов; менее выраженные аномалии по сравнению с Шубарколь
Промышленное значение	Бурый и каменный уголь, три промышленных пласта, потенциальный источник редких элементов	Бурые угли, стратегическое значение для энергетики, до 14 промышленных пластов
Особенности углеобразования	Низкоэнергетичные болотные равнины с активным поступлением вулканогенных материалов; аномальные концентрации элементов-примесей	Низкоэнергетичные болотные равнины с фазами аллювиального накопления; локальные тектонические флексуры

Выводы

Комплексное исследование геодинамических условий формирования мезозойских угленосных формаций Центрального Казахстана показывает, что ключевую роль в их пространственной организации и стратиграфическом строении сыграли тектонические процессы посторогенной эволюции региона. Унаследованные разломно-блоковые структуры Центрально-Азиатского орогенного пояса (ЦАОП), реактивированные в мезозое, контролировали морфологию депрессий и условия аккумуляции органического вещества. Анализ показал, что Шубаркольский и Майкубенский бассейны формировались в условиях длительного тектоно-седиментологического развития посторогенной мезозойской плиты, преимущественно в грабеноподобных впадинах, что способствовало накоплению мощных юрских угленосных толщ (см. табл. 3.4).

Установлено, что определяющее влияние тектоники ЦАОП заключалось в формировании унаследованного блоково-разломного каркаса, который в мезозойское время контролировал не сами процессы углеобразования, а геометрию осадочных ловушек, режим субсиденции и пространственное размещение угленосных бассейнов Центрального Казахстана.

Формирование юрских угленосных формаций Центрального Казахстана происходило в условиях посторогенной эволюции Центрально-Азиатского складчатого пояса и было связано со сменой геодинамических режимов на рубеже палеозоя и мезозоя. Завершение герцинского орогенеза и последующий посторогенез обусловили реактивацию унаследованных разломов и формирование системы внутриконтинентальных депрессий.

Пространственная дифференциация угленосных бассейнов определялась разломно-блоковой тектоникой. Глубинные разломы контролировали закладку грабеноподобных прогибов и синеклиз, в пределах которых формировались мощные угленосные толщи в аллювиально-озёрно-болотных обстановках.

Геотектоническое положение Центрального Казахстана между крупными кратонами обусловило мозаичное строение региона, неравномерные вертикальные движения и формирование локальных центров субсиденции, в которых концентрировалось юрское угленакпление.

Сарысу-Тенизское поднятие и связанные с ним зоны погружений сыграли ключевую роль в структурной организации угленосных бассейнов, определяя их сегментацию, асимметрию и различия в мощности угленосных разрезов, включая Шубаркольский и Майкубенский бассейны.

Углеобразование в юрский период происходило при чередовании фаз субсиденции и тектонической активизации. Климатические условия были относительно благоприятными и устойчивыми, однако играли подчинённую, модифицирующую роль по отношению к тектоническому контролю.

Сопоставление Шубаркольского месторождения и Майкубенского бассейна показывает, что различия в строении и продуктивности угленосных толщ при сходных палеоклиматических условиях обусловлены прежде всего геодинамическими факторами.

Геодинамическая эволюция региона определяла не только формирование угленосных бассейнов, но и условия накопления элементов-примесей в углях, что важно для прогноза их геохимической специализации.

Угленосные формации Центрального Казахстана являются результатом комплексного взаимодействия геодинамических, палеогеографических и климатических факторов, что определяет их стратиграфическую, фациальную и геохимическую специфику. Выделенные закономерности позволяют рассматривать их не только как топливный ресурс, но и как стратегический источник критически важных элементов, создавая основу для прогнозирования зон редкометалльной специализации углей.

ГЛАВА 4 ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ-ПРИМЕСЕЙ В УГЛЯХ ЦЕНТРАЛЬНОГО КАЗАХСТАНА

4.1 Общая геохимическая характеристика углей и уровень накопления элементов-примесей

Геодинамические и фациальные выводы, сделанные в 3 главе, показывают, что формирование мезозойских угленосных толщ Центрального Казахстана происходило в контрастных условиях от рифт-контролируемых впадин с вулканогенным вкладом до субсиденционных прогибов с доминацией болотно-дельтовых систем. Эти различия обусловили характер минерального состава углей и закономерности распределения элементов-примесей и редкоземельных элементов (РЗЭ). Угли и их золы рассматриваются здесь как потенциальный источник стратегических элементов (REE, Zr, Nb, Ta, Ge, Li и др.), а также как индикатор палеоусловий и тектоно-фациальных взаимодействий [78, 31].

Геохимические особенности мезозойских угленосных формаций Центрального Казахстана определяются фациальной принадлежностью, источниками поступления элементов и постседиментационными процессами. Изучение этих закономерностей позволяет не только глубже понять процессы углеобразования, но и повысить эффективность прогноза редкометалльной специализации углей региона.

Результаты рассмотрения геодинамических условий и пространственной фациальной дифференциации угленосных формаций Центрального Казахстана показали, что формирование Шубаркольского месторождения и Майкубенского бассейна происходило в контрастных тектонических и седиментационных обстановках. В первом случае ключевую роль сыграли рифт-контролируемые процессы, сопровождавшиеся поступлением вулканокластического материала, во втором, спокойная субсиденция, способствовавшая развитию обширных болотных систем и формированию мощных угольных пластов.

Такие различия в условиях седиментации напрямую отражаются на геохимическом облике углей, определяя как их зольность и минеральный состав, так и характер распределения редкоземельных элементов (РЗЭ) и элементов-примесей. Геохимические особенности углей рассматриваются не только как показатель условий осадконакопления, но и как важный прогностический критерий, позволяющий выявлять зоны аномального обогащения стратегически значимыми элементами (Ge, Li, Nb, Ta, Zr, REE и др.).

Современные исследования Serendin, 2005; Dai, 2012; Arbuzov, 2019; Parafilov et al., 2020; Коробайева et al., 2021; Blyalova et al., 2025) [28, 29, 32, 72, 73, 79] демонстрируют, что угли и продукты их переработки (золы) могут рассматриваться как альтернативный источник критических металлов. В этой связи особое значение приобретает изучение закономерностей распределения элементов-примесей и их связи с фациальными обстановками.

Оба объекта демонстрируют признаки посторогенных внутриплитных бассейнов, однако различаются по фациальной организации и микроэлементной специализации углей: для Шубарколя чаще отмечают относительное обогащение Ge, Sc и REE, для Майкубеня Mo, V, W и частично Y (обобщение по опубликованным данным). Эти различия увязываются с литолого-фациальной контрастностью, ролью туфогенного материала и активностью флюидных систем.

Для Центрального Казахстана актуальность геохимического анализа обусловлена:

- выявлением зон накопления РЗЭ и стратегических металлов в пределах угленосных толщ;
- определением роли тектонического контроля и вулканогенной составляющей в их поступлении;
- разработкой прогнозных критериев для выделения перспективных угленосных районов с повышенными содержаниями элементов-примесей.

Исследования углей Центрального Казахстана показывают их преимущественно низкосолевой характер при значительном варьировании содержаний микроэлементов. По результатам анализа 120 проб угля и глинистых прослоев месторождения Шубарколь и 20 проб углей бассейна Майкубеня установлено, что геохимические спектры элементов-примесей в целом сходны и отражают близкие условия осадконакопления и источники терригенного материала. Вместе с тем отдельные элементы демонстрируют повышенную контрастность распределения, обусловленную локальными литолого-фациальными и минералогическими особенностями [78, 80].

Для юрских углей региона характерны следующие особенности. ΣREE в углях варьируют от 13,3 до 104,3 г/т, при этом средние значения составляют 52-56 г/т, что немного выше мирового уровня 46,9 г/т [73]. Преобладание LREE над HREE (отношение LaN/LuN 0,27-2,7) указывает на кластогенный привнос. Кроме того, наблюдается вариабельность δEu и δCe , которая связана с фациальными и окислительно-восстановительными условиями.

4.2 Особенности распределения элементов-примесей и редкоземельных элементов в углях Центрального Казахстана

Особенностью Центрального Казахстана является обогащение глинистых прослоев Sm, Ce, Nd, Yb и Eu, концентрации которых превышают кларковые значения для углей (Ketris & Yudovich, 2009) [81]. Эти прослои выступают главным аккумулятором РЗЭ и микроэлементов, что подтверждается данными SEM-EDS об аутигенных фазах [73].

Показано, что средние содержания большинства элементов-примесей в углях месторождения Шубарколь в целом ниже по сравнению со средними значениями для каменных углей по данным [81], а также по сравнению со средними содержаниями элементов в осадочных породах. При этом для ряда элементов характерна выраженная контрастность распределения,

проявляющаяся в формировании локальных аномалий. Высокая контрастность аномальных концентраций элементов-примесей позволяет рассматривать исследуемые угольные пласты как перспективные объекты для прогнозного выделения интервалов с промышленно значимыми содержаниями Ce, Ba, Yb, U, Sc, Sr и Zr.

Распределение среднего содержания элементов-примесей и РЗЭ в углях бассейна Майкубень, показывает, что большинство элементов-примесей в углях имеют содержание околокларковых значений (табл. 4.1, рис. 4.1) [81].

Установленная высокая контрастность аномалий элементов-примесей позволяет прогнозировать выделение угольных пластов со значимыми содержаниями Zn, As, Ag и U, а также Ce, Ba, Yb, Sr.

Таблица 4.1 – Среднее содержание элементов-примесей месторождений Талдыколь и Сарыколь Майкубеньского бассейна (г/т)

Элемент	Талдыколь	Сарыколь	Кларки для бурых углей [80]	Элемент	Талдыколь	Сарыколь	Кларки для бурых углей [80]
La,	13,1	7,7	10	Cr	34,9	17,7	15
Ce	30,7	21,0	22	Hf	2,1	1,9	1,2
Nd	13,9	7,7	11	Ba	248,0	278,5	150
Sm	2,8	2,0	1,9	Sr	119,3	139,9	120
Eu	0,8	0,5	0,5	Ag	0,4	0,4	0,09
Tb	0,6	0,3	0,32	Cs	1,4	2,9	0,98
Yb	1,9	1,3	1,00	Sc	8,7	7,9	4,1
Lu	0,3	0,2	0,19	Rb	21,6	30,9	10
U	9,0	1,0	2,9	Ta	0,2	0,1	0,26
Br	4,1	2,8	4,4	Co	7,1	6,6	4,2
As	3,4	11,7	7,6	Sb	0,5	0,7	0,84
Th	3,3	3,9	3,3	Zn	46,4	27,0	18

Также хотелось бы отметить, что содержание в углях токсичных и потенциально токсичных элементов не превышает «порог токсичности» для углей, но следует обратить внимание на повышенное содержание урана, уровни накопления которого в некоторых пробах месторождения Талдыколь, по расчетным данным, составляют 127 г/т золы, что выше кларкового содержания этого элемента в несколько раз. В связи с этим рекомендуется создать эффективную систему контроля качества угля по радиационно-гигиеническому фактору, во избежание загрязнения территории радиоактивными элементами.

Суммарное содержание редкоземельных элементов (Σ РЗЭ) в юрских углях Центрального Казахстана варьирует в пределах 13,3-104,3 г/т при средних значениях 52-56 г/т, что сопоставимо или несколько превышает среднемировой уровень для углей, но в 3 раза ниже значений верхней континентальной коры. Среднее Σ РЗЭ в углях Майкубеньского бассейна составляет 52,4 ppm, в углях Шубаркольского месторождения – 56,4 ppm.

Нормированные к ВКК спектры распределения РЗЭ характеризуются сходной формой и пониженными абсолютными концентрациями. Для исследуемых объектов установлено преобладание тяжёлых редкоземельных

элементов над лёгкими, что отражается в соотношениях La_N/Lu_N , изменяющихся от 0,16 до 2,74. Подобные значения указывают на доминирование Н-типа распределения РЗЭ.

а)

б)

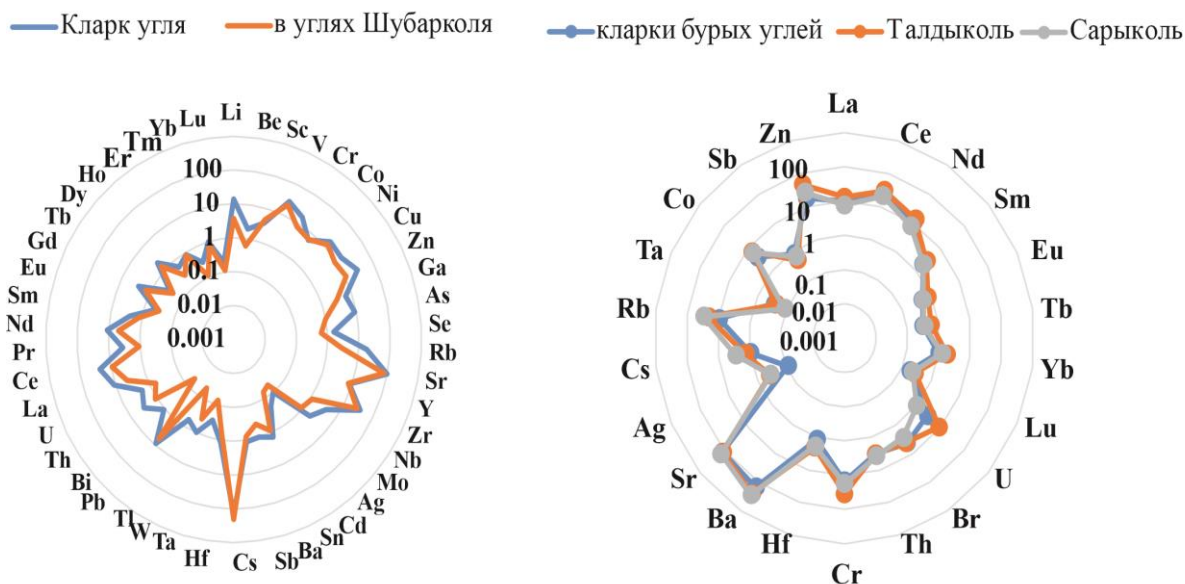


Рисунок 4.1 – Сравнение среднего содержания элементов-примесей и РЗЭ в углях а) месторождения Шубарколь с кларками для каменных углей, б) бассейна Майкубень с кларками для бурых углей [81]

Средние содержания редкоземельных элементов в углях месторождений Шубарколь и Майкубеньского бурого угольного бассейна с фоновыми значениями верхней континентальной коры (ВКК) и литературными данными для каменных и бурых углей приведены в таблице 4.2. Сравнительный анализ показывает, что исследуемые угли характеризуются пониженными концентрациями Σ РЗЭ. Так, суммарное содержание РЗЭ в углях Майкубеньского бассейна составляет 52,4 ppm, а в углях Шубаркольского месторождения – 56,4 ppm, что в 3 раза ниже значений УСС (168,4 ppm) и несколько ниже средних значений для каменных и бурых углей мира (65-68 ppm).

Анализ распределения элементов-примесей в образцах угля месторождения Шубарколь (рис. 4.2, а) показал, что наибольшие концентрации характерны для крупноионных литофильных элементов и элементов с выраженным минеральным контролем (Ba, Sr, Sc, Zr, V), тогда как большинство редкоземельных элементов характеризуются средним уровнем содержания. Такое распределение отражает преобладающую роль минеральной составляющей угля и устойчивых терригенных фаз в аккумуляции микроэлементов.

Оценка степени обогащения редкоземельных элементов в юрских отложениях Центрального Казахстана (рис. 4.2 а, б) показала, что концентрации микроэлементов близки к средним значениям для мировых

углей ($0,5 < KK < 2$) согласно классификации Dai et al. (2015) [83]. Это свидетельствует об отсутствии максимального редкоземельного обогащения и указывает на фоновый характер накопления РЗЭ в пределах исследуемых угленосных толщ.

Таблица 4.2 – Среднее содержание РЗЭ в углях, ppm

Угли	Редкоземельные элементы, ppm															
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Y	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE
Майкубенъ	10,4	25,9	-	10,8	2,4	0,7	-	0,5	-	-	-	-	-	1,6	0,26	52,4
Шубарколь	8,06	17,5	2,11	9	1,97	0,4	2	0,31	1,79	10,1	0,38	1,13	0,17	1,19	0,18	56,4
УСС [81]	30,0	64,0	7,1	26	4,50	0,9	3,8	0,64	3,50	22,0	0,80	2,30	0,33	2,20	0,32	168,4
Каменные угли [80]	11,0	23,0	3,4	11	2,40	0,4	2,7	0,31	2,10	8,20	0,57	1,00	0,30	1,00	0,20	67,6
Бурые угли [80]	10	22	3,5	11	1,9	0,5	2,6	0,32	2,00	8,6	0,50	0,85	0,31	1,00	0,19	65,27

Установлено, что концентрации микроэлементов в углях месторождения Шубарколь в целом близки к средним значениям для мировых углей ($0,5 < KK < 2$) согласно данным [83]. При этом наибольшими коэффициентами концентрации обладают литофильные элементы с крупными ионными радиусами (Ba, Sr, Sc, Zr, V), что указывает на их преимущественную фиксацию минеральными фазами угля. Совокупность полученных данных позволяет отнести угли месторождения Шубарколь к литофильно-халькофильному типу геохимической специализации, характеризующемуся повышенными содержаниями Ba, U, Au, Yb, Cd, La, Nb, Hg, Se, Sc, Sr и Zn [80, 84].

В образцах угля месторождений Майкубенского бассейна (Сарыколь и Талдыколь; рис. 4.2, б) отмечается относительное обогащение рядом критических элементов (Sc, Cs, U), а также элементов цветных металлов (Zn, Co, Ba) и благородных металлов (Ag).

Содержание элементов-примесей в углях месторождения Сарыколь в основном ниже соответствующих кларков для бурых углей [85]. Незначительные превышения ($0,5 < KK < 2$) над кларком установлены для литофильных элементов: REE Cr, Br, Th, Hf, Ba, Sr, Sc; Co (сидерофильный); Sb, Zn, As (халькофильные). Обогащены ($2 < KK < 5$) литофильными элементами Cs, Rb, и халькофильным элементом Ag. При этом полученные концентрации не имеют практического значения.

Для углей месторождения Талдыколь характерно накопление редкоземельных элементов иттриевой группы и Yb, заметно обогащение некоторых элементов. Незначительные превышения над кларком ($0,5 < KK < 2$) установлены для литофильных элементов: REE, Br, Th, Hf, Ba, Sr, Cs, Ta; сидерофильного элемента Co и для халькофильного элемента Sb. Обогащены ($2 < KK < 5$) литофильными элементами U, Rb, Cr, Sc и халькофильными элементами Ag, Zn.

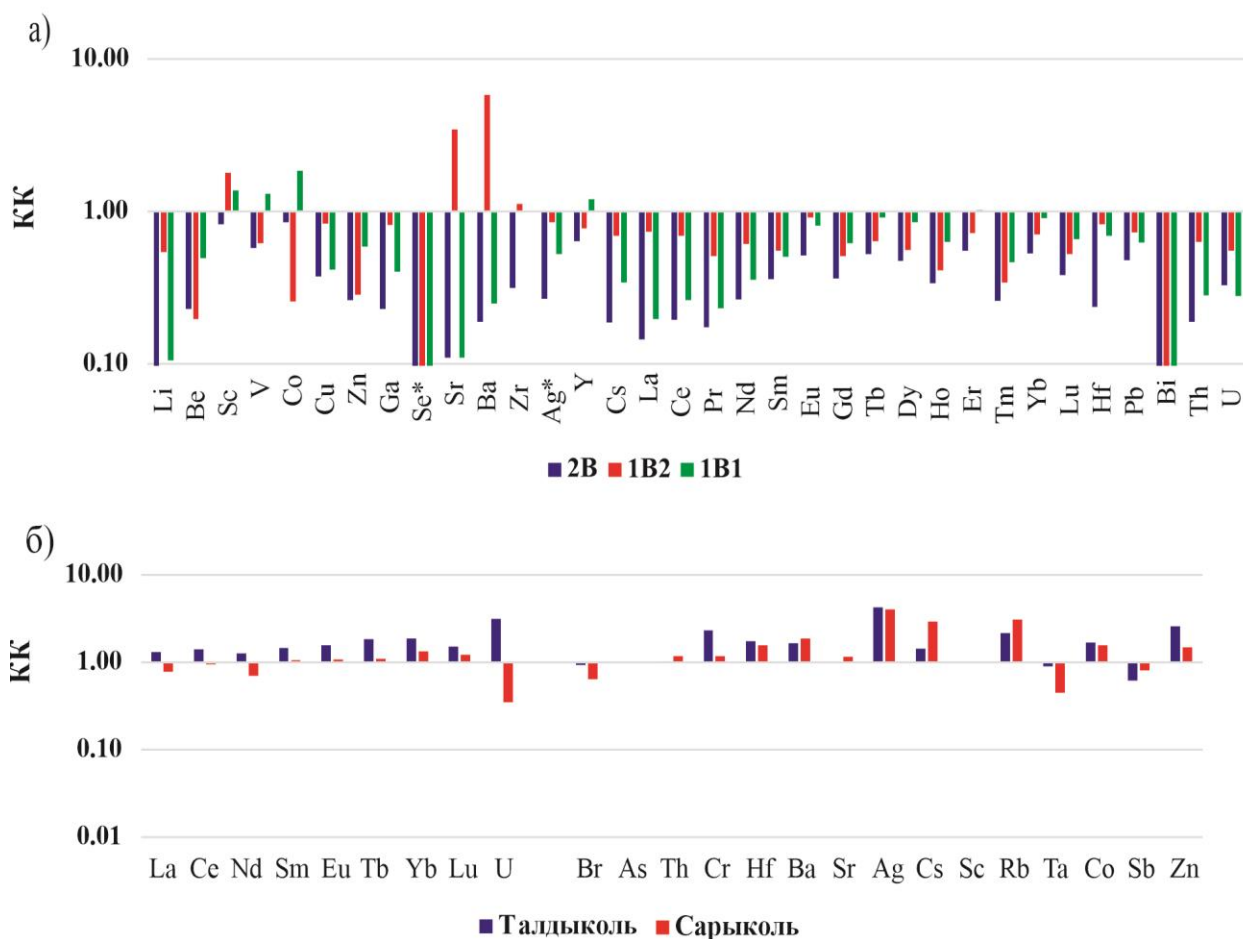


Рисунок 4.2 – Коэффициенты концентрации (КК) микроэлементов в углях а) пластов: 2В, 1В2, 1В1 месторождения Шубарколь и б) месторождений Талдыколь и Сарыколь Майкубеньского угольного бассейна.

Подобная геохимическая специализация, вероятно, связана с формированием угленосных отложений в условиях недифференцированного терригенного сноса с обрамления бассейна, сложенного преимущественно гранитоидными комплексами.

Повышенные содержания Sr и Ba в углях месторождения Шубарколь интерпретируются как результат участия апатитовых ассоциаций, которые могли поступать в осадочный бассейн из продуктов выветривания бокситоносных кор выветривания фундамента в области источника терригенного материала. Это указывает на существенную роль фосфатных минералов в формировании геохимического фона данных элементов.

В целом полученные результаты свидетельствуют о доминировании минерального контроля накопления элементов-примесей и редкоземельных элементов в юрских углях Центрального Казахстана при подчинённой роли органического вещества, а также о значительном влиянии терригенных источников и геодинамической обстановки на формирование геохимической специализации угленосных формаций.

По результатам анализа распределения редкоземельных элементов по КК значениям в юрских углях Центрального Казахстана установлено, что

исследуемые угли обеднены лёгкими редкоземельными элементами (LREE: La-Nd), незначительно обеднены средними редкоземельными элементами (MREE: Sm-Dy) и слабо обогащены тяжёлыми редкоземельными элементами (HREE: Ho-Lu).

Известно, что в последовательности La→Lu происходит уменьшение ионного радиуса редкоземельных элементов, сопровождающееся снижением их основности. Согласно данным Chen D.Q. et al. (1990) [80], способность РЗЭ к комплексообразованию возрастает в том же направлении, при этом тяжёлые редкоземельные элементы обладают большей склонностью к образованию устойчивых комплексов по сравнению с лёгкими, что обуславливает их более высокую миграционную способность в природных системах.

В этой связи предполагается, что возможными источниками относительного обогащения тяжёлыми РЗЭ в углях Центрального Казахстана являются снижение значений рН терригенного материала при его поступлении в торфяное болото, а также возрастание сорбционной способности органического вещества по отношению к РЗЭ в ряду от La к Lu, что способствовало их аккумуляции в торфяной стадии углеобразования [79]. Микроэлементы в углях могут составлять часть минералов, связываться органическим веществом и растворяться в поровой воде. Минералы являются основными носителями микроэлементов в углях [86].

4.3 Геохимическая дифференциация редкоземельных элементов в углях Центрального Казахстана

В пределах изучаемых месторождений изучены латеральное и вертикальное распределения РЗЭ. Анализ вертикального распределения La и Yb по пластам 2В и 1В2, 1В1 в трех сечениях на Западном и Центральном участке месторождения Шубарколь (рис. 4.3) показал, что наиболее высокие концентрации всех РЗЭ свойственны глинистым прослоям и окисленным углям. Отношение La/Yb при этом возрастает вверх по разрезу, указывая на преимущественно кластогенный механизм поступления РЗЭ в угли [87]. Такое распределение РЗЭ объясняется разной сорбционной способностью глинистых минералов. Также Середин [88] (Seredin V.V., 1996.) утверждает, что адсорбция глинистых и мелкозернистых минералов имеет второстепенное значение. Из-за различия химических свойств РЗЭ возможно фракционирование при поступлении РЗЭ в торфяное болото в ионном состоянии, что в основном проявляется в различии характера распределения.

РЗЭ в углях и вмещающих породах. HREE в углях относительно обогащены. Упомянутое выше фракционирование может не происходить при переносе РЗЭ в торфяное болото обломками. Поэтому предполагается, что включения РЗЭ в каменноугольных углях в настоящем исследовании в основном привнесены в уголь обломочными породами, которые в основном существуют в неорганических минералах. В то время как для юрских углей вполне вероятно поступление РЗЭ в угольный бассейн преимущественно в

растворенном состоянии, поскольку наблюдаются различия между закономерностями распределения и содержаниями РЗЭ в угле и пустой породе.

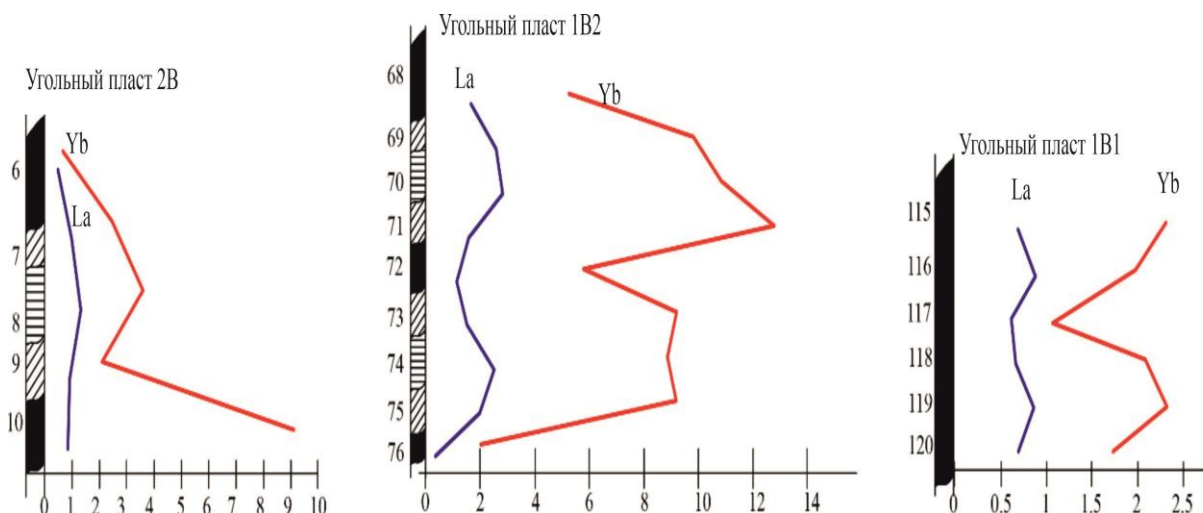


Рисунок 4.3 – Вертикальное распределение La и Yb в пластах 2B, 1B2, 1B1 месторождения Шубарколь

Исследование латеральной изменчивости содержаний редкоземельных элементов в пределах угольных пластов 2B (участок 1-2), 1B2 (участок 4-3) и 1B1 (участок 6-5) месторождения Шубарколь, а также в углях Майкубенского бассейна в целом, показало, что пространственные вариации концентраций РЗЭ выражены относительно слабо (рис. 4.4).

В то же время для месторождения Шубарколь установлено отчётливое снижение содержаний редкоземельных элементов от периферийных частей угольных пластов к их центральным зонам. Согласно Юдовичу Я.Э. и Кетрису М.П. (2006) [85], подобная закономерность указывает на существенное участие водных растворов в процессе аккумуляции РЗЭ и согласуется с характером распределения углефильных элементов. Аналогичный тип латеральной зональности типичен для элементов, склонных к органо-геохимической аккумуляции, таких как Li, Rb, Sr, Ba, Be, Sc и др.

Анализ латерального распределения лантаноидов в углях Майкубенского бассейна показал, что суммарное содержание РЗЭ возрастает в направлении с запада на восток бассейна. С учётом выраженных колебаний концентраций РЗЭ по отдельным точкам наиболее вероятным механизмом формирования их распределения является сочетание терригенного поступления вещества и гидротермального воздействия, контролировавших условия накопления редкоземельных элементов в углях бассейна.

Анализ полученных геохимических данных, приведенных ниже свидетельствует о существовании ряда независимых источников и различных механизмов накопления РЗЭ в отложениях месторождений Центрального

Казахстана. Все данные по РЗЭ нормированы к содержанию ВКК. Геохимические параметры редкоземельных элементов в образцах угля Центрального Казахстана приведены в табл. 4.3.

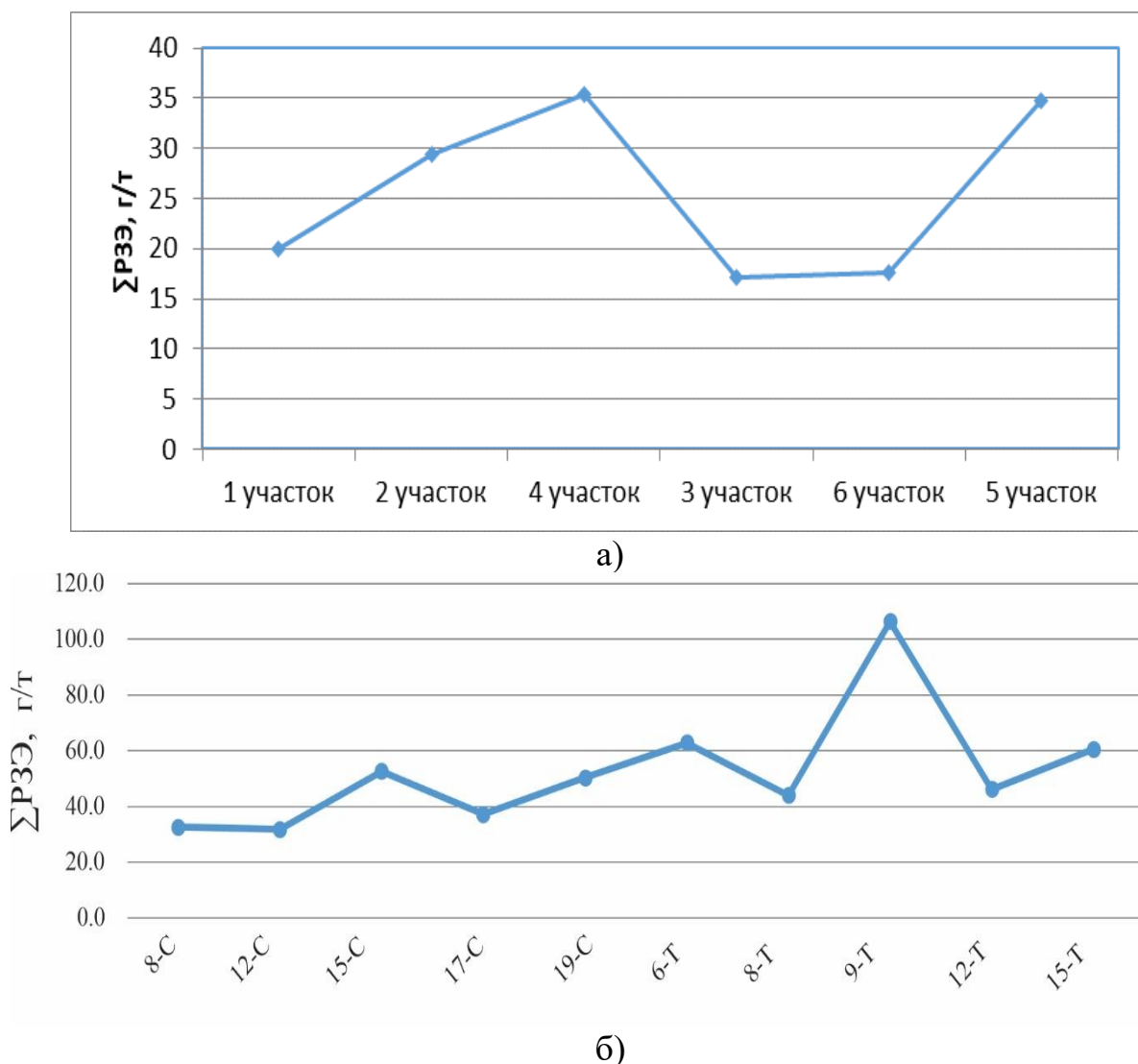


Рисунок 4.4 – Латеральное распределение суммы лантаноидов в углях с запада на восток: а) месторождение Шубарколь в участках (1-2 участки) - Западный и (3-6 участки) – Центральный; б) Майкубенского бассейна – (8-С, 12-С, 15-С, 17-С, 19-С) – Сарыкольское месторождение, (6-Т, 8-Т, 9-Т, 12-Т, 15-Т) – Талдыкольское месторождение.

Согласно геохимической классификации, предложенной Середин и Дай (2012) и нормализованные к средней концентрации REE в ВКК [82], закономерности обогащения REE в углях исследуемых месторождений были разделены на три группы (табл. 4.3): легкий (L-тип) ($La_N/Lu_N > 1$), средний (М-тип) ($La_N/Sm_N < 1$) и тяжелый (Н-тип) ($La_N/Lu_N < 1$). Усредненные по месторождениям Центрального Казахстана, представленные в данной работе значения соотношения $La_N/Lu_N \sim 1$ не значительно превышают единицу. Соотношение La_N/Lu_N в углях исследуемых месторождений обоих возрастов

колеблется от 0,16 до 2,74, что указывает на характерное преобладание тяжелых лантаноидов над легкими. РЗЭ в углях имеют низкие концентрации и характеризуются отчетливым обогащением Н-типа. Формирование углей Н-типа с околосларковыми уровнями накопления РЗЭ, согласно В.В. Середину [85], происходит при длительной разгрузке в торфяник углекислых вод с повышенными содержаниями НРЕЕ с последующим связыванием РЗЭ органическим веществом торфа, такая же ситуация возможно была и при формировании металлоносных углей Центрального Казахстана.

Таблица 4.3 – Геохимические параметры редкоземельных элементов в образцах угля и глинистых прослоев месторождения Шубарколь и Майкубенского бассейна

Угол ьный пласт	Обр а- зец	ΣР ЗЭ	La _n / Lu _n	La _n /Y b _n	δEu	δCe	Тип распре делени я	обр азе ц	ΣРЗЭ	La _n /L u _n	La _n /Y b _n	δEu	δCe
в углях								в глинистых прослоях					
(Шубарколь)													
2В	6	15,3	0,099	0,101	1,212	0,206	Н тип	7	23,4	0,237	0,234	1,121	0,826
	10	13,3	0,081	0,080	1,162	0,160	Н тип	8	26,1	0,254	0,248	1,133	0,807
	41	15,0	1,005	1,028	1,178	0,800	Л тип	9	14,5	0,223	0,225	1,092	0,777
	50	24,2	0,244	0,238	1,203	0,330	Н тип	42	66,2	0,836	0,867	1,143	0,858
	59	29,3	0,224	0,222	1,138	0,337	Н тип	43	133,9	1,052	1,052	1,122	0,855
1В2	68	33,8	0,225	0,227	1,110	0,478	Н тип	69	40,5	0,278	0,288	1,156	0,815
	72	31,7	0,410	0,427	1,201	0,694	Н тип	70	40,5	0,268	0,281	1,177	0,778
	76	15,6	0,461	0,493	1,131	0,642	Н тип	71	48,7	0,598	0,632	1,397	0,873
	85	56,5	0,987	1,018	1,354	1,203	Н тип	83	48,8	0,209	0,220	1,097	0,891
	86	90,6	2,744	2,981	1,745	0,879	Л тип	88	55,8	0,255	0,267	1,126	0,858
	100	52,1	1,051	1,063	1,584	0,860	Л тип	89	40,0	0,284	0,309	1,074	0,802
	104	52,7	1,471	1,456	1,552	0,967	Л тип	91	38,3	0,316	0,328	1,140	0,815
	105	37,8	0,818	0,805	1,592	0,808	М тип	92	49,4	0,317	0,331	1,133	0,806
1В1	109	36,4	0,621	0,627	1,494	0,711	М тип	93	38,2	0,374	0,407	1,119	0,792
	115	33,5	0,200	0,202	1,207	0,316	Н тип	118	32,3	0,216	0,228	1,183	0,386
	116	31,0	0,169	0,170	1,210	0,278	Н тип	119	32,8	0,180	0,179	1,242	0,272
	117	27,2	0,117	0,113	1,246	0,234	Н тип	120	27,0	0,164	0,168	1,182	0,257
		Майкубенский бассейн											
Талды коль	6-Т	62,84	0,57	0,37	1,56	0,96	Н тип						
	8-Т	44,02	0,45	0,53	1,16	1,08	Н тип						
	9-Т	106,34	0,56	0,67	1,28	1,00	Н тип						
	12-Т	46,15	0,42	0,49	1,08	1,15	Н тип						
	15-Т	60,51	0,41	0,46	1,16	1,02	Н тип						
Сарык оль	8-С	32,60	0,64	0,77	1,20	1,08	Н тип						
	12-С	31,84	0,40	0,45	1,30	1,16	Н тип						
	15-С	52,56	0,34	0,40	1,09	1,56	Н тип						
	17-С	37,23	0,27	0,33	1,48	1,11	Н тип						
	19-С	50,33	0,33	0,41	1,34	1,10	Н тип						

Примечание. Чередувание: $\Sigma \text{REY} = \text{La} + \text{Ce} + \text{Nd} + \text{Sm} + \text{Eu} + \text{Tb} + \text{Yb} + \text{Lu}$; $\delta\text{Eu} = \text{Eu}_N / \text{Eu}_N^* = \text{Eu}_N / [(\text{Sm}_N \times 0,67) + (\text{Tb}_N \times 0,33)]$, $\delta\text{Ce} = \text{Ce}_N / \text{Ce}_N^* = \text{Ce}_N / [(\text{La}_N \times 0,67 + \text{Nd}_N \times 0,33)]$; Sm_N , Eu_N , Gd_N , Tb_N , La_N , Lu_N , Ce_N , Nd_N - нормированное соотношение редкоземельных элементов в Верхней Континентальной коре. Формулы взяты из [82].

Для выявления особенностей распределения редкоземельных элементов в углях Центрального Казахстана был выполнен анализ значений РЗЭ, нормированных к верхней континентальной коре (ВКК) по Taylor S.R. и McLennan S.M. (1985) [82], для мировых углей, а также для юрских каменных и бурых углей Центрального Казахстана. Кривые распределения РЗЭ, нормированные к ВКК, представлены на рисунках 4.5 и 4.6. Исходя из полученных данных, для углей Центрального Казахстана выявляется сходство нормированных спектров редкоземельных элементов с мировыми углями, проявляющееся в преобладании пониженных значений по ряду РЗЭ.

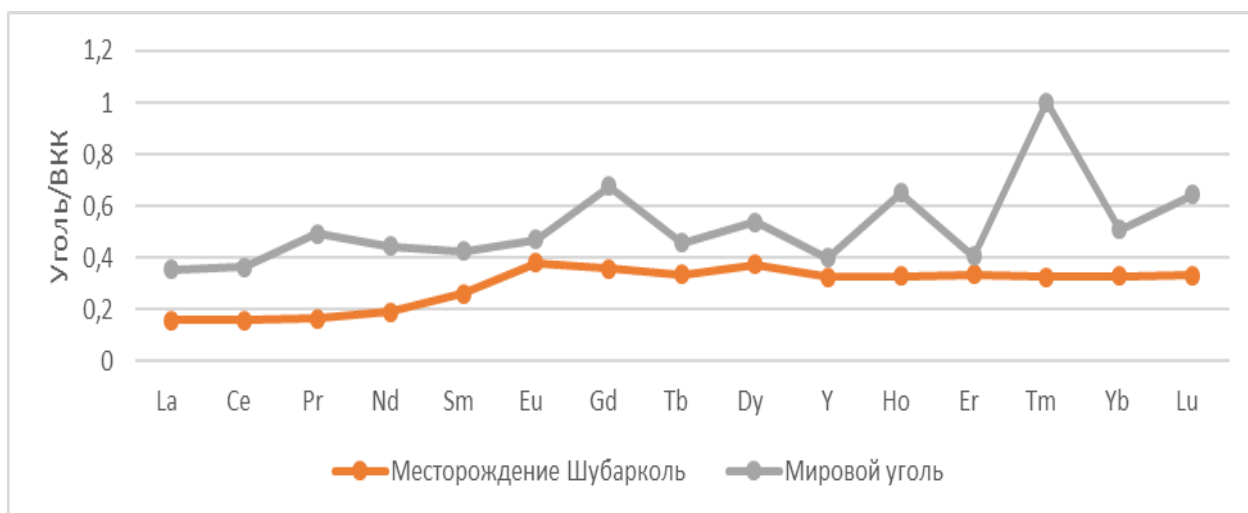


Рисунок 4.5 – Нормированные графики распределения РЗЭ в углях месторождения Шубарколь

По графикам распределения РЗЭ в углях Центрального Казахстана (рис. 4.5, 4.6), также подтверждается, что угли месторождений относятся к Н-М-типу и характеризуются отсутствием отрицательной Eu аномалии.

Eu-аномалии в осадочных породах унаследованы от материнских пород или подвержены влиянию высокотемпературных гидротермальных флюидов. Величина Eu/Eu^* в аргиллитах также является показателем состава размывавшихся на палеоводосборах комплексов пород. Установлено, что изученные образцы юрских углей имеют положительные аномалии Eu (Eu/Eu^* , среднее значение 1,1-2,3), которые указывают на гидрогенный механизм накопления лантаноидов.

Несмотря на близкое пространственное расположение объектов исследования, геохимические особенности пород имеют значительные отличия. Для юрских углей Шубаркольского месторождения характерно появление отрицательной цериевой аномалии δCe в пластах 2В, 1В2, 1В1 месторождения (колеблется между 0,1-0,8), что объясняется присутствием аутигенных минералов [89], а углеобразующий торфяник находился в условиях окисления. Если рассматривать минералогическое и геохимическое состояния, то эти концентрации могут быть вызваны действием морской воды или гидротермальными процессами [90], которые могли в свою очередь

повлиять на появление цериевого минимума в юрских углях, что обусловлено присутствием аутигенных минералов (например, минералы глин, которые наследует цериевый минимум от морской воды) [91], также РЗЭ возможно поступали в область седиментации в составе обломочного материала, что подтверждает влияние пород области сноса на формирование геохимического фона месторождения.

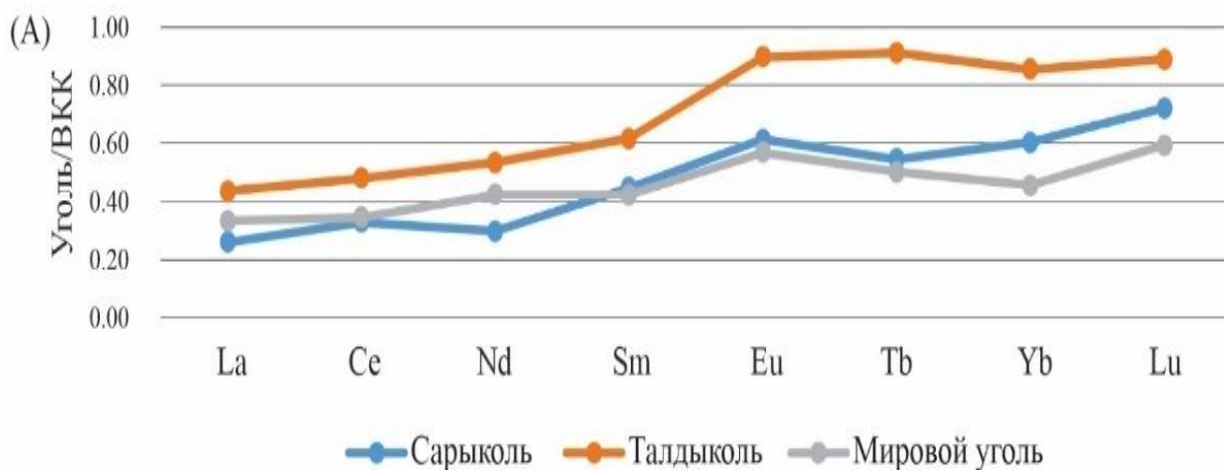


Рисунок 4.6 – Нормированные графики распределения РЗЭ в углях бассейна Майкубень: а – модели распределения среднего значения РЗЭ в мировом угле, юрском угле разрезов Сарыколь и Талдыколь

Обогащение торфа редкими землями могло происходить при инфильтрации кислых природных вод в эпигенетический период, о чем свидетельствует положительная цериевая аномалия. Аномалия δCe также является эффективным окислительно-восстановительным индикатором, который может быть использован для анализа осадочной среды и условий палеоводной среды. Выявлено, что только в пробах угля Майкубеньского бассейна цериевая аномалия положительная, на что могли повлиять породы с незначительной примесью “фоновой” обломочного материала. Наличие положительной цериевой аномалии на данном месторождении подтверждает особенность состава исходных пород и пути привноса РЗЭ в отложения в условиях восстановления. Известно, что церий хорошо мигрирует в кислых водах и осаждается в подщелочённой среде [92].

По особенностям нормированных кривых распределения РЗЭ в Майкубеньском бассейне можно отметить три особенности: а) присутствие положительных Ce-, Eu-аномалий; б) отсутствие Eu-минимума; в) распределение РЗЭ в юрском угле бассейна Майкубень в основном проявляется как распределение Н-типа с положительной аномалией Lu; предполагается, что флюид перенес ионы РЗЭ в угленосный бассейн, а тяжелые РЗЭ собираются в угле из-за различных химических свойств каждого РЗЭ. Также положительные Eu-аномалии ($\text{Eu}/\text{Eu}^*=1,08-1,56$)

свидетельствуют о гидрогенном механизме накопления лантаноидов. Обогащение торфяника редкими землями могло произойти при инфильтрации кислых природных вод в эпигенетический период, о чем свидетельствует положительная аномалия церия.

4.4 Закономерности распределения элементов-примесей в углях мезозоя Центрального Казахстана

4.4.1 Методические подходы и общая характеристика корреляционного анализа

С целью выявления закономерностей распределения петрогенных компонентов, микроэлементов и редкоземельных элементов в углях месторождений был проведён комплексный геохимический анализ, основанный на изучении корреляционных связей между элементами и их пространственного распределения в пределах угленосного бассейна. Корреляционный анализ выполнен на основе расчёта коэффициентов парной корреляции Пирсона (r), что позволяет количественно оценить степень совместного изменения концентраций элементов в углях и выявить устойчивые геохимические связи между ними, также позволяет установить характерные геохимические ассоциации, отражающие источники поступления вещества, условия осадконакопления и последующие постседиментационные преобразования углей. Корреляционный анализ использован как инструмент для установления генетических связей между элементами, оценки роли органической и минеральной составляющих угля, а также для выявления общих источников поступления и механизмов аккумуляции элементов-примесей, что соответствует общепринятым подходам в угольной геохимии [93] (Mukherjee et al., 1988, Sun et al., 2016, Lin et al., 2017).

Интерпретация коэффициентов корреляции проводилась с учётом их знака и абсолютных значений. Высокие положительные значения r интерпретировались как свидетельство общего источника поступления элементов, сходных механизмов их миграции и аккумуляции либо их приуроченности к одной и той же фазе угля. Отрицательные значения r рассматривались как индикатор различной геохимической природы элементов или их принадлежности к разным компонентам угольного вещества.

Петрогенные оксиды отражают вклад терригенного материала и степень его переработки, тогда как микроэлементы и редкоземельные элементы характеризуют как состав областей питания, так и влияние геохимических условий среды углеобразования, включая окислительно-восстановительный режим и сорбционные процессы.

При анализе корреляционных связей учитывалась специфика углей как сложной многофазной системы, включающей органическую матрицу и минеральные примеси различного генезиса. В этой связи корреляции между петрогенными оксидами рассматривались преимущественно как отражение

состава и количества терригенного материала, а также степени его переработки и перераспределения в процессе диагенеза и катагенеза. Связи между микроэлементами и петрогенными компонентами использовались для оценки роли алюмосиликатной и карбонатной минеральной фазы в концентрировании элементов-примесей. Корреляции микроэлементов и РЗЭ с показателями зольности и между собой интерпретировались с позиций сорбционных свойств органического вещества, влияния окислительно-восстановительных условий и возможного участия гидротермально-метасоматических процессов.

Отдельное внимание уделялось корреляционным связям редкоземельных элементов, поскольку их согласованное поведение и характер внутригрупповых корреляций позволяют судить о единстве источников питания бассейна, степени фракционирования РЗЭ и стабильности геохимических условий в период углеобразования. Выделение ассоциаций лёгких и тяжёлых РЗЭ, а также их связь с петрогенными компонентами, рассматривалось как важный критерий для реконструкции условий осадконакопления и постседиментационных преобразований углей.

В целом корреляционный анализ использован как вспомогательный, но информативный метод, позволяющий на основе статистически обоснованных связей перейти от описания распределения элементов к их генетической интерпретации. Полученные корреляционные зависимости послужили основой для последующего выделения геохимических ассоциаций и сопоставления особенностей элементного состава углей месторождения Шубарколь и Майкубеньского угольного бассейна. Коэффициенты корреляции для углей месторождения Шубарколь приведены в табл. 4.4, где отдельно представлены петрогенные компоненты, микроэлементы и редкоземельные элементы (РЗЭ). Для углей месторождений Сарыколь и Талдыколь Майкубеньского бассейна результаты корреляционного анализа приведены в табл. 4.5. В этих коэффициентах корреляции очевидны несколько геохимических ассоциаций.

Таблица 4.4 – Парные коэффициенты корреляции между химическими элементами в углях Шубарколь. Сверху вниз коэффициенты для а) петрогенных компонентов, б) микроэлементов, в) РЗЭ (51 проба в каждой из выборок).

а)

TiO ₂								
0,932	Al ₂ O ₃							
0,290	0,219	Fe ₂ O ₃						
0,530	0,459	0,411	MnO					
0,580	0,677	0,095	0,152	MgO				
-0,291	-0,284	-0,079	-0,018	-0,185	CaO			
0,154	0,115	-0,094	0,054	0,484	0,155	Na ₂ O		
0,604	0,734	0,163	0,167	0,937	-0,219	0,225	K ₂ O	
0,183	0,159	0,033	0,314	-0,092	0,518	-0,021	-0,081	P ₂ O ₅

б)

Sc														
0,683	Cr													
0,243	0,41	Rb												
0,221	0,132	0,072	Sr											
0,783	0,730	0,523	0,022	Zr										
0,707	0,562	0,642	0,126	0,900	Nb									
0,652	0,790	0,010	0,186	0,387	0,156	Sb								
0,173	0,348	0,972	0,018	0,436	0,580	0,040	Cs							
0,210	0,124	0,063	0,997	0,007	0,108	0,170	0,009	Ba						
0,776	0,718	0,538	0,020	0,997	0,910	0,368	0,446	0,005	Hf					
0,519	0,399	0,667	0,148	0,795	0,939	0,080	0,619	0,127	0,808	Ta				
0,263	0,219	0,627	0,102	0,521	0,696	0,159	0,614	0,078	0,532	0,715	Tl			
0,351	0,241	0,277	0,033	0,411	0,494	0,094	0,172	0,034	0,426	0,427	0,403	Pb		
0,662	0,528	0,633	0,136	0,910	0,972	0,078	0,564	0,115	0,919	0,936	0,686	0,469	Th	
0,643	0,544	0,320	0,189	0,800	0,818	0,195	0,241	0,161	0,796	0,751	0,600	0,505	0,837	U

в)

Y														
0,055	La													
0,100	0,967	Ce												
0,182	0,930	0,983	Pr											
0,332	0,806	0,912	0,965	Nd										
0,674	0,506	0,676	0,771	0,892	Sm									
0,618	0,579	0,713	0,807	0,905	0,969	Eu								
0,847	0,293	0,476	0,572	0,721	0,941	0,910	Gd							
0,935	0,074	0,247	0,350	0,512	0,824	0,790	0,958	Tb						
0,968	0,024	0,129	0,226	0,379	0,724	0,690	0,891	0,980	Dy					
0,974	0,061	0,074	0,160	0,298	0,647	0,614	0,829	0,942	0,987	Ho				
0,944	0,029	0,076	0,149	0,256	0,579	0,552	0,752	0,877	0,946	0,982	Er			
0,896	0,040	0,037	0,096	0,177	0,484	0,454	0,648	0,790	0,884	0,940	0,984	Tm		
0,851	0,022	0,039	0,089	0,150	0,438	0,407	0,590	0,736	0,839	0,902	0,963	0,992	Yb	
0,827	0,002	0,049	0,096	0,148	0,420	0,393	0,559	0,703	0,810	0,880	0,950	0,985	0,995	Lu

Таблица 4.5 – Парные коэффициенты корреляции между химическими элементами в углях месторождений Сарыколь и Талдыколь бассейна Майкубень. Сверху вниз коэффициенты для а) микроэлементов, в) РЗЭ

а)

As	-0,28	1.00												
Br	-0,29	0.37	1.00											
Th	-0,31	0.06	0.30	1.00										
Cr	0.31	-0,32	0.23	0.68	1.00									
Hf	-0,05	0.06	0.36	0.95	0.83	1.00								
Ba	0.15	0.45	0.19	0.30	0.20	0.41	1.00							
Sr	0.11	0.27	-0,53	-0,43	-0,40	-0,42	0.35	1.00						
Sc	0.24	-0,09	-0,07	0.76	0.78	0.84	0.52	-0,09	1.00					
Rb	-0,17	-0,04	0.00	0.93	0.59	0.86	0.25	-0,38	0.80	1.00				
Fe	-0,51	0.68	0.46	0.74	0.20	0.68	0.57	-0,07	0.45	0.61	1.00			

Ta	-0.00	-0.28	0.36	0.81	0.93	0.88	0.05	-0.61	0.71	0.70	0.34	1.00		
Co	0.12	0.39	0.37	0.58	0.46	0.65	0.72	-0.09	0.68	0.52	0.63	0.40	1.00	
Sb	0.36	0.27	-0.47	0.22	0.14	0.27	0.66	0.49	0.62	0.40	0.30	-0.05	0.56	1.00
Zn	0.63	-0.12	-0.64	-0.02	0.37	0.13	0.23	0.50	0.54	0.13	-0.18	0.10	0.14	0.70
	U	As	Br	Th	Cr	Hf	Ba	Sr	Sc	Rb	Fe	Ta	Co	Sb

б)

La	1.00													
Ce	0.95	1.00												
Nd	0.88	0.90	1.00											
Sm	0.90	0.88	0.68	1.00										
Eu	0.90	0.86	0.88	0.82	1.00									
Tb	0.71	0.73	0.86	0.60	0.87	1.00								
Yb	0.83	0.82	0.83	0.69	0.93	0.86	1.00							
Lu	0.85	0.82	0.66	0.82	0.79	0.57	0.86	1.00						
	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Tb	Yb	Lu						

4.4.2 Геохимические ассоциации петрогенных компонентов, микроэлементов и редкоземельных элементов в углях

В настоящем разделе основное внимание уделено интерпретации корреляционных зависимостей петрогенных компонентов, микроэлементов и РЗЭ, а также анализу их пространственной зональности и связи с зольностью углей. Полученные результаты рассматриваются в контексте геодинамических и седиментационно-диагенетических условий формирования Шубаркольского угольного месторождения и служат основой для последующего кластерного и факторного анализа геохимической структуры углей.

Петрогенные компоненты и их геохимические ассоциации (Шубарколь). Анализ корреляционной матрицы петрогенных компонентов (табл. 4.4а) свидетельствует об отсутствии устойчивых корреляционных связей железа с большинством других оксидов, что дает основание предположить независимость их образования в углях, например, путем привноса из окружающих плутонов и вулканитов, а также путем их формирования при угленакопления или в последующие периоды. Оксид титана в углях положительно коррелирует с Al_2O_3 ($r=0,93$), что может указывать на вхождение титана в состав глинистых минералов [94]. Данные ICP-MS подтверждают присутствие титана в каолините, вероятно, в форме субмикронных оксидных включений. Аналогичная ассоциация Ti-Al характерна для углей других регионов и рассматривается как индикатор литогенного контроля распределения титана.

Микроэлементы: литогенные и сорбционно-хемогенные ассоциации (Шубарколь). Корреляционный анализ микроэлементов (табл. 4.4 б) выявил устойчивую положительную связь Zr, Hf, Th и Ta, что свидетельствует о накоплении этих элементов преимущественно в тяжелых акцессорных

минералах [31]. Данная ассоциация указывает на ведущую роль циркона и родственных фаз в аккумуляции высокозарядных элементов.

Гафний демонстрирует высокие коэффициенты корреляции с Zr, Nb, Ta, Cs и Th, что отражает его геохимическое сходство с цирконием и отсутствие собственных минералов. Основными минералами-носителями гафния в углях являются циркон и бадделейт, где Hf изоморфно замещает Zr. Вместе с тем характер корреляций допускает и дополнительное сорбционное концентрирование гафния из водных растворов, а также возможное биогенное участие в его накоплении [95].

Значимая корреляционная связь между Nb и Ta ($r = 0,94$) указывает на их совместное поведение и общие механизмы фиксации. Положительные корреляции Zr-Al₂O₃ и Nb-Al₂O₃ (рис. 4.7) указывают на литофильный характер Zr и Nb и подтверждают их концентрацию преимущественно в алюмосиликатной составляющей, что обусловлено контролем со стороны акцессорных устойчивых минералов.

При этом тантал также демонстрирует устойчивые положительные связи с Th и Hf ($r > 0,70$), что характерно для элементов-гидролизатов, аккумулируемых в микроминеральной фазе пелитовой размерности, в том числе в рутиле [85].

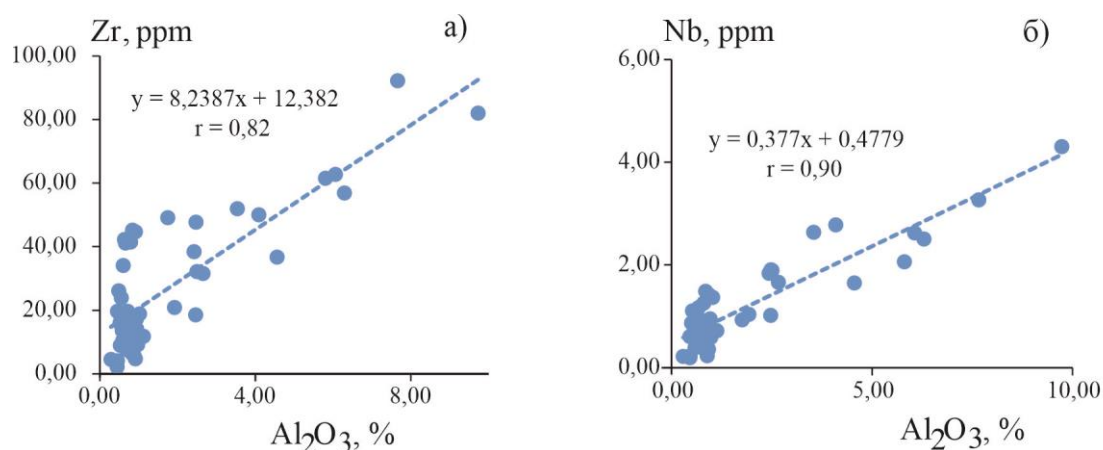


Рисунок 4.7 – Корреляция содержаний Al₂O₃ с содержаниями Zr и Nb

Корреляционная связь а) между Zr и Al₂O₃, описывается линейным уравнением (4.1):

$$y = 8,2387x + 12,382 \quad (4.1)$$

при коэффициенте детерминации $R^2 = 0,673$ и стандартной ошибке аппроксимации $Sy = f(x) = \pm 12,12$ ppm; где y – содержание Zr в породах, ppm; x – содержание Al₂O₃ в породах, %;

R^2 – коэффициент детерминации (квадрат коэффициента корреляции, равного $r = 0,82$); коэффициент корреляции подвергнут статистической оценке

и при выполнении условия $t_{\text{набл}} > t_{\text{табл}}$ установлено, что при уровне значимости $\alpha=0,001$ он достоверно отличается от нуля, что подтверждает наличие корреляционной связи между параметрами; $Sy=f(x)$ – стандартная ошибка определения содержания Zr по уравнению регрессии.

б) между Nb и Al_2O_3 , описывается линейным уравнением (4.2):

$$y = 0,377x + 0,4779 \quad (4.2)$$

при $R^2 = 0,8189$ ($r = 0,905$), $Sy = \pm 0,374$, $t_{\text{набл}} \gg t_{\text{табл}}$ при $\alpha = 0,001$.

Совокупность данных показывает [31, 96], что концентрирование Nb и Ta в углях Шубаркольского месторождения обусловлено как привнесением с кластогенным веществом, так и хемогенно-сорбционными процессами, включая фиксацию в органической массе угля и присутствие в виде тонкодисперсных минеральных фаз [31].

Установлена сильная положительная корреляция Cs и Rb ($r=0,97$), указывающая на их тяготение к глинистому веществу и аутогенной минерализации. Предполагается, что рубидий преимущественно сорбирован глинистыми минералами, тогда как цезий частично концентрируется и в органической составляющей угля.

Стронций демонстрирует тесную положительную связь с барием ($r>0,90$). Согласно данным корреляционного анализа и микроминералогических наблюдений (рис. 5.16 см гл. 5), основными носителями Sr и Ba являются карбонатные и сульфатные фазы, включая аутигенный Sr-барит и, предположительно, целестин. Повышенные содержания Sr и Ba могут также быть связаны с апатитовой минерализацией, обусловленной размывом кор выветривания пород фундамента в области источников осадочного материала.

Пространственная зональность микроэлементов (Sc и Zr) в углях Шубарколь. Пространственное распределение циркония и скандия в углях Шубаркольского месторождения (рис. 4.8, 4.9) согласуется с результатами корреляционного анализа, выявившего устойчивую ассоциацию Zr-Hf-Nb-Ta-Th-U. Зоны повышенных концентраций Zr и Sc приурочены к участкам с повышенной зольностью и развитием тонкодисперсной минеральной составляющей.

Максимальные содержания Sc и Zr зафиксированы в центральной и юго-восточной частях бассейна, соответствующих озёрно-болотным и дельтово-болотным фациям. Эти условия осадконакопления характеризовались низкой гидродинамической активностью и повышенным поступлением пелитового терригенного материала, обогащенного акцессорными минералами (циркон, монацит, апатит). В северо-западной части бассейна, где развиты аллювиально-озёрные отложения, концентрации Sc и Zr снижаются вследствие увеличения доли песчанисто-алевритовых фаций.

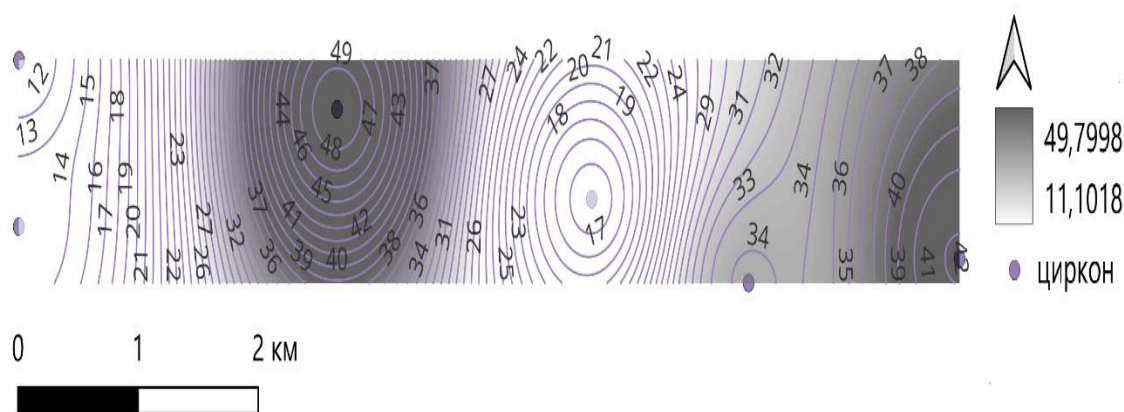


Рисунок 4.8 – Распределение циркония (Zr) в углях Шубаркольского месторождения

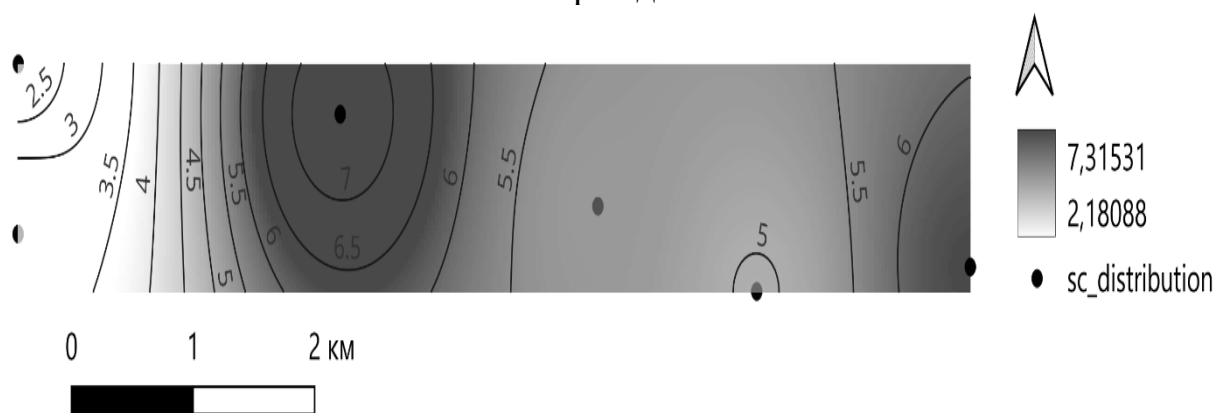


Рисунок 4.9 – Распределение скандия (Sc) в углях Шубаркольского месторождения

Закономерности распределения редкоземельных элементов в углях Шубарколь. Корреляционный анализ РЗЭ (табл. 4.4 в) выявил высокую степень упорядоченности их распределения. Между легкими лантаноидами (La-Ce-Pr-Nd) установлены очень высокие коэффициенты корреляции ($r = 0,81-0,98$), что указывает на их совместное поступление и накопление, преимущественно в минеральной части угля, вероятно, в составе фосфатных минералов (монацит).

Средние РЗЭ (Sm-Eu-Gd) демонстрируют тесные взаимные корреляции ($r=0,91-0,97$) и высокую связь с Nd, что отражает непрерывность геохимического поведения от LREE к MREE и слабое фракционирование на стадиях осадконакопления и диагенеза.

Тяжёлые РЗЭ (Gd-Lu) характеризуются очень высокой взаимной корреляцией и, по-видимому, аккумулируются в тонкодисперсных фосфатных фазах (ксенотимоподобные образования) и алюмосиликатной матрице. Иттрий демонстрирует слабую связь с LREE и высокую корреляцию с HREE ($r = 0,85-0,97$), что подчёркивает его геохимическое

сходство с тяжелыми РЗЭ и преимущественно минеральный контроль накопления.

Корреляционные особенности углей Майкубеньского бассейна. Корреляционный анализ элементного состава углей Майкубеньского бассейна выявил устойчивую геохимическую структуру, тесно связанную с минеральным веществом. Корреляционные коэффициенты для углей месторождений Сарыколь и Талдыколь Майкубеньского бассейна приведены в табл. 4.5. Анализ показал наличие устойчивого блока элементов Sc-Ta-Cs-Rb с высокими положительными корреляциями ($r \approx 0,77-0,89$),

Редкоземельные элементы демонстрируют высокие взаимные корреляции ($r \approx 0,65-0,90$) без выраженного разделения на LREE и HREE, что свидетельствует о доминирующем литогенном контроле и слабой фракционирующей роли органического вещества. Уран проявляет относительную геохимическую автономность, отражая влияние восстановительных условий осадконакопления и диагенеза. Редкоземельные элементы, а также Sc, Ta, Cs и Rb образуют устойчивые литогенные ассоциации. Уран характеризуется частичной геохимической автономностью, что отражает влияние восстановительных условий осадконакопления и диагенеза. Корреляционная структура элементов в углях бассейна свидетельствует о доминирующей роли терригенного материала типичного для алюмосиликатных и тяжелых минеральных ассоциаций континентального происхождения в формировании их геохимического облика.

Связь содержания РЗЭ с зольностью углей. Зависимость содержания РЗЭ от зольности углей Майкубеньского бассейна представлена на рис. 4.10 и 4.11. Широкий диапазон вариаций корреляционных зависимостей редкоземельных элементов (РЗЭ) с зольностью свидетельствует о многообразии форм их нахождения в углях, а также о различном вкладе органической и минеральной составляющих в процессы их аккумуляции. В углях установлена положительная корреляция между суммарным содержанием РЗЭ и зольностью ($r = 0,66$), тогда как в золе наблюдается отрицательная корреляция ($r = -0,77$). Данные зависимости указывают на сопоставимый вклад органического и минерального вещества в аккумуляцию РЗЭ и подтверждают разнообразие форм их присутствия в углях.

Увеличение содержания РЗЭ в угле при постоянстве содержания в золе с ростом зольности указывает на преимущественную связь концентраций с минеральной частью угля. Напротив, снижение концентраций элементов с увеличением зольности как в угле, так и в золе указывает на их преимущественную ассоциацию с органическим веществом.

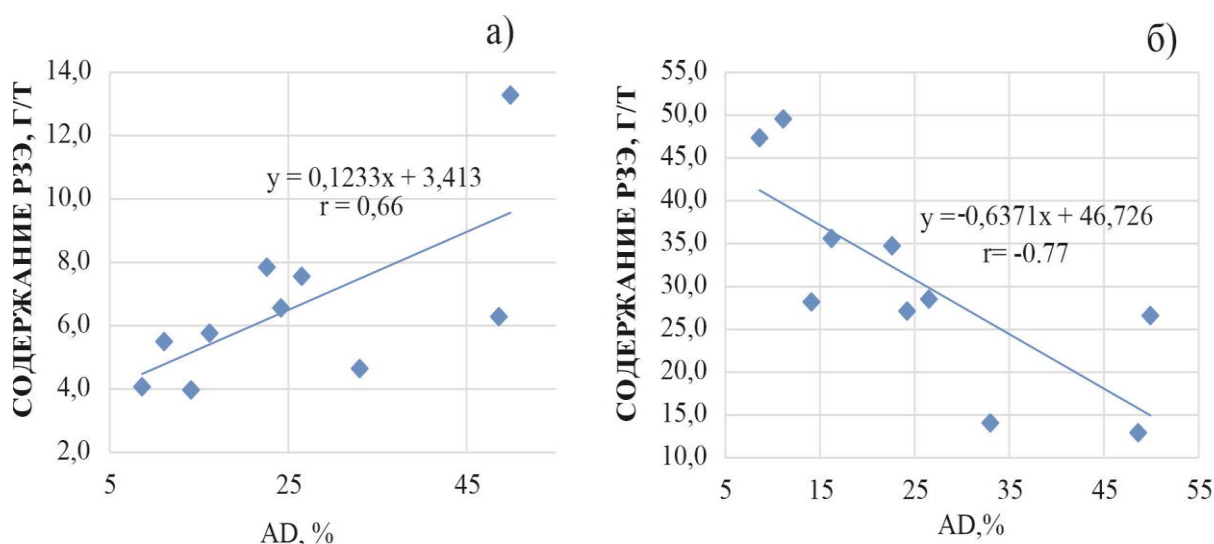


Рисунок 4.10 – Зависимость содержания РЗЭ: *а* – в угле от зольности, *б* – в золе углей от зольности

Зависимость содержания РЗЭ *а*) в угле от зольности описывается линейным уравнением (4.3):

$$y = 0,1233x + 3,413 \quad (4.3)$$

при $R^2 = 0,4371$ ($r=0.66$) и $Sy = \pm 2,67$, $t_{\text{набл}} > t_{\text{табл}}$ при $\alpha = 0,05$;

б) в золе углей от зольности, описывается линейным уравнением (4.4):

$$y = -0,6371x + 46,726 \quad (4.4)$$

при коэффициенте детерминации $R^2 = 0,5927$ ($r=0.77$), $Sy \approx \pm 8,25$, $t_{\text{набл}} > t_{\text{табл}}$ при $\alpha = 0,01$; $n=10$.

В работе Арбузова С.И. и соавт. [79], посвящённой формам нахождения РЗЭ в углях, показано, что на буроугольной стадии углефикации основными носителями редкоземельных элементов являются гуминовые вещества, тогда как роль минеральных компонентов в их накоплении считается второстепенной. Вместе с тем результаты последующих исследований [79] демонстрируют, что в углях месторождений Талдыколь и Сарыколь преобладающая доля РЗЭ (75-81%) сосредоточена в нерастворимой фракции, что указывает на их преимущественно минеральную форму нахождения. Это может свидетельствовать о перераспределении редкоземельных элементов на более поздних стадиях углефикации с их фиксацией в глинистых минералах.

При формировании углей типа Н с околочларковыми содержаниями РЗЭ основными носителями этих элементов являлось глинистое вещество терригенной золы. По мнению Середина В.В. [97], данный процесс был обусловлен длительной разгрузкой углекислых вод, обогащённых преимущественно тяжёлыми РЗЭ, в торфяную среду, где редкоземельные

элементы первоначально связывались с органическим веществом торфа. В работе [98] также показано, что тяжёлые РЗЭ обладают большей склонностью к взаимодействию с органическим веществом на торфяной стадии углеобразования по сравнению с лёгкими РЗЭ. Эти результаты хорошо согласуются с выводами обобщающей работы Арбузова С.И. и соавт. [79], в которой отмечается преобладание органической формы нахождения РЗЭ на стадии бурого угля.

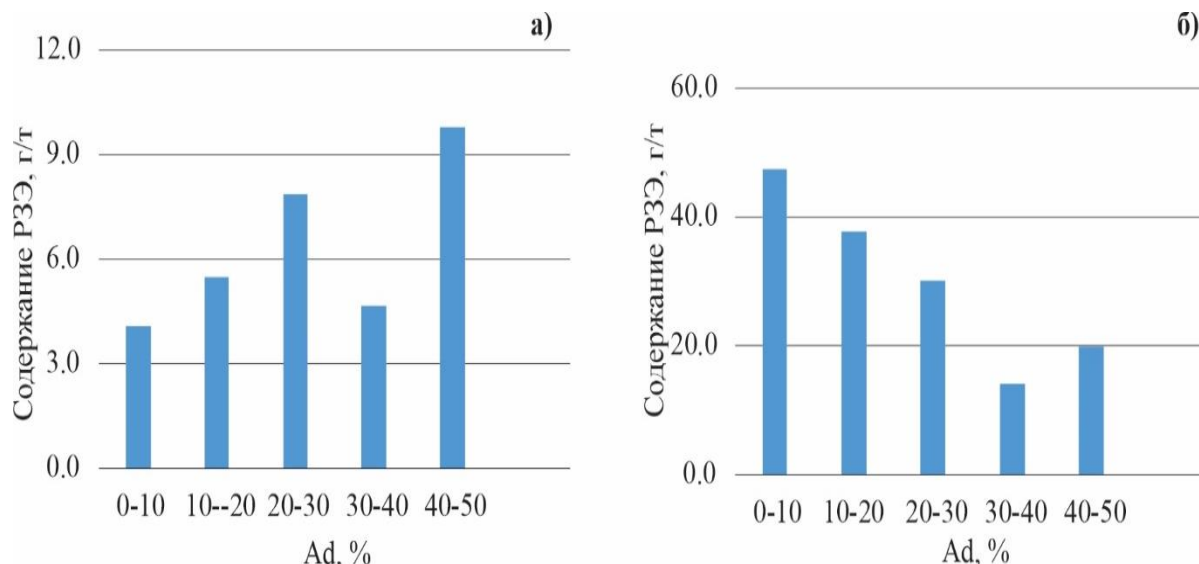


Рисунок 4.11 – Средние содержания РЗЭ: *а* – в углях по группам зольности, *б* – в золе углей по группам зольности

4.4.3 Результаты кластерного и факторного анализа элементного состава углей месторождения Шубарколь

Выявленные корреляционные связи между микроэлементами отражают наличие устойчивых геохимических ассоциаций, однако не позволяют в полной мере оценить сложность взаимодействия различных факторов накопления вещества. В связи с этим для более детальной интерпретации геохимической структуры углей был выполнен кластерный и факторный анализ.

Кластерный и факторный анализ. Совместный анализ петрогенных компонентов и микроэлементов позволил выделить пять кластеров (рис. 4.12):

- фосфатный;
- редкоземельный;
- гидротермальный;
- слюдистый;
- глинистый.
-

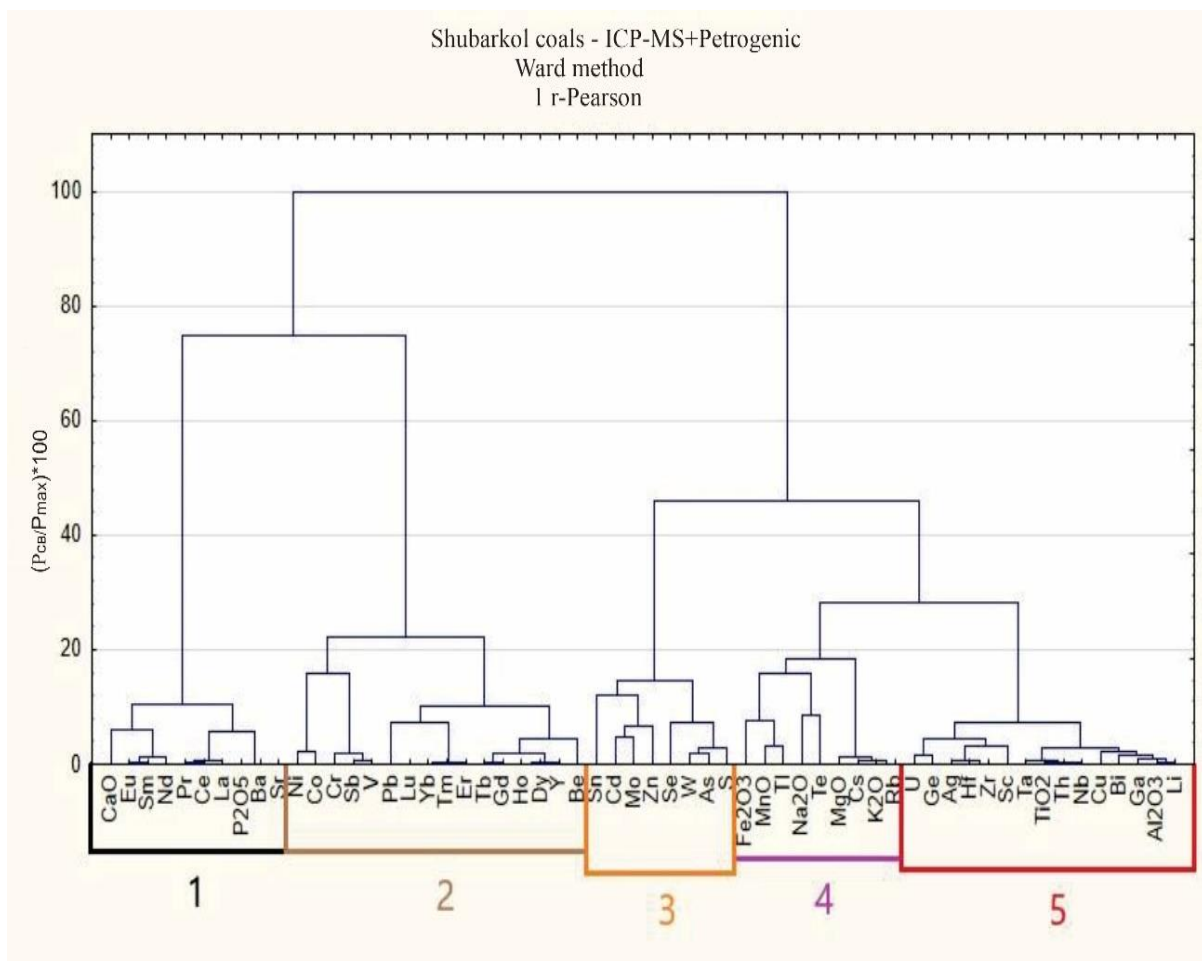


Рисунок 4.12 – Кластеры: 1 – «фосфатный»; 2 – «редкоземельный»; 3 – «гидротермальный»; 4 – «сланцевый»; 5 – «глинистый» («аргиллитовый»)

Интерпретация полученных кластеров проводилась с учетом совместной ассоциации химических компонентов и сопряженных с ними минералов, пород или геологических процессов. Минералогия кластеров описана в 5 гл.

«Фосфатный» кластер характеризуется устойчивой ассоциацией CaO, P₂O₅, Sr и Ba, а также лёгких редкоземельных элементов (Ce, La, Nd, Pr). Данная группа элементов типична для фосфатной геохимической специализации и отражает участие фосфорсодержащего вещества в формировании угольных толщ. Соотношения Sr и Ba с CaO и P₂O₅ (рис. 4.13), а также данные микрозондовых исследований (гл. 5, рис. 5.4) свидетельствуют о тесной геохимической связи этих элементов и позволяют рассматривать их как единый фосфатно-редкоземельный компонент, привнесённый в угленосную систему. Концентрация лёгких РЗЭ в составе данного кластера указывает на их преимущественное накопление в фосфатной среде и подчёркивает роль фосфатных фаз в перераспределении редкоземельных элементов.

Зависимость содержания а) Sr и P₂O₅ описывается уравнением (4.5):

$$y = 1694,8x - 1,8858 \quad (4.5),$$

при $R^2 = 0,9931$ ($r = 0,9965$) и $Sy \approx \pm 0,08$, $t_{\text{набл}} > t_{\text{табл}}$ при $\alpha = 0,01$;
 б) Sr и CaO описывается уравнением (4.6):

$$y = 2646,7x - 342,81 \quad (4.6),$$

при $R^2 = 0,2646$ ($r = 0,514$), $t_{\text{набл}} \approx 4,15 > t_{\text{табл}}$ для $\alpha = 0,01$.

в) Ba и P_2O_5 описывается уравнением (4.7):

$$y = 4468,5x - 10,855 \quad (4.7),$$

при $R^2 = 0,9888$ ($r = 0,99$), $Sy \approx \pm 0,106$, $t_{\text{набл}} > t_{\text{табл}}$ при $\alpha \leq 0,001$.

г) Ba и CaO описывается уравнением (4.8):

$$y = 7357,1x - 969,99 \quad (4.8),$$

при $R^2 = 0,293$ ($r = 0,541$), $Sy \approx +0,841$, $t_{\text{набл}} \approx 4,45 > t_{\text{табл}}$ при $\alpha = 0,001$.

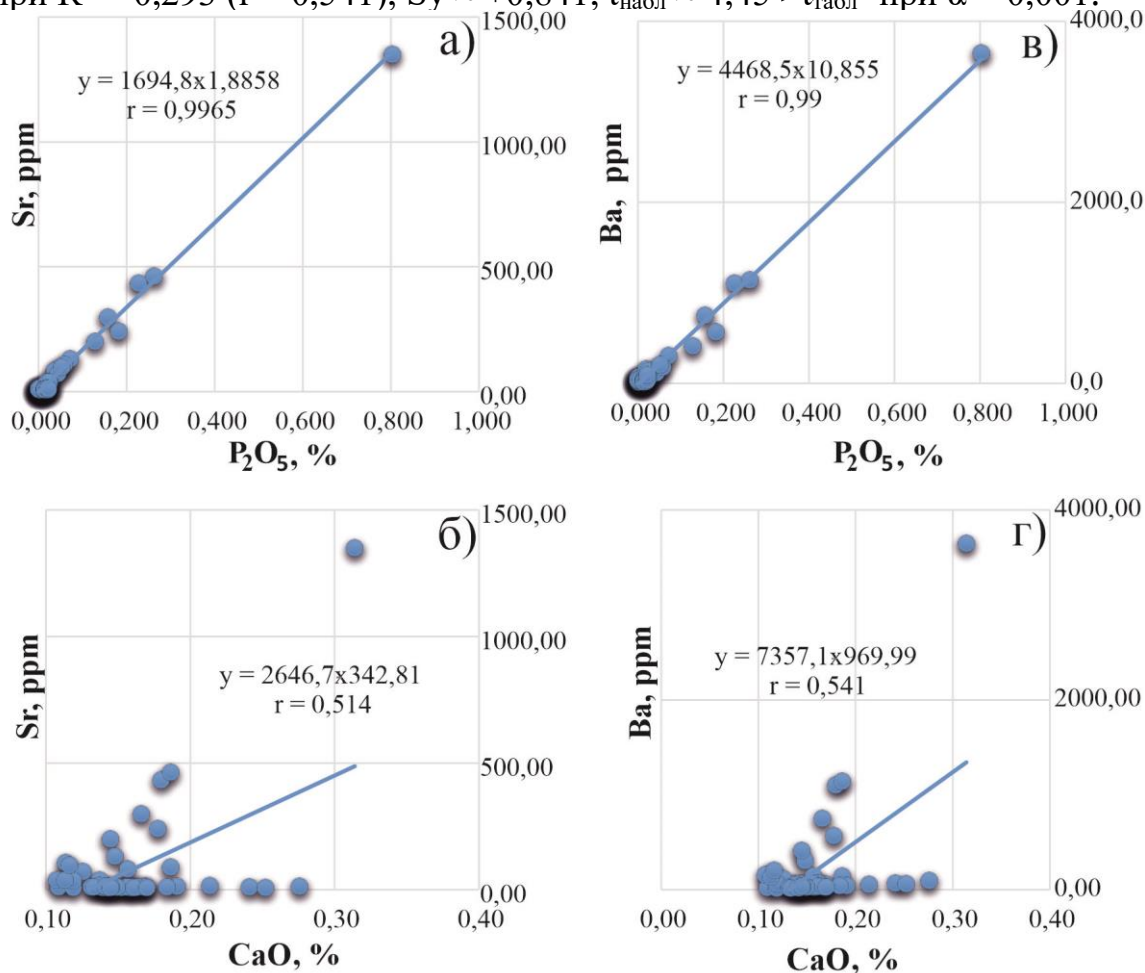


Рисунок 4.13 – Соотношения между Sr и Ba с P_2O_5 и CaO

«Редкоземельный» кластер объединяет тяжёлые редкоземельные элементы (Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) и иттрий. Обособление этой группы отражает геохимическую дифференциацию РЗЭ и указывает на раздельное поведение лёгкой и тяжёлой подгрупп в процессе формирования угленосных отложений. Несмотря на изоморфизм редкоземельных элементов, в определённых геодинамических и геохимических условиях возможна их селективная концентрация. Ассоциация тяжёлых РЗЭ и иттрия может быть связана с влиянием источников, обогащённых иттрий-иттриевой подгруппой РЗЭ, а также с перераспределением элементов в ходе постседиментационных процессов. Такое разделение подчёркивает многостадийность поступления редкоземельных элементов в угольный бассейн.

«Гидротермальный» кластер включает серу и элементы, традиционно ассоциируемые с гидротермальной активностью (Mo, Zn, As, W, Sn и др.; рис. см. гл.5, рис. 5.12-5.14). Совместное поведение данных элементов указывает на их эпигенетическое поступление и перераспределение в результате гидротермальных процессов, не связанных напрямую с углеобразованием. Повышенные содержания молибдена и мышьяка интерпретируются как результат наложенной сульфидной минерализации. Наличие селена и его вариабельность отражают нестабильные окислительно-восстановительные условия и сложную эволюцию гидротермальных флюидов. Высокие значения коэффициента концентрации серы в данной ассоциации подчёркивают ведущую роль гидротермального фактора в локальном обогащении углей серой и сопутствующими элементами.

«Слюдистый» фактор выделяется по ассоциации Fe, Mg, K и Se и отражает вклад калий- и железо-магниевого компонента, характерных для терригенного материала и постседиментационных преобразований. Геохимическое поведение железа указывает на его активную миграцию и участие в окислительно-восстановительных процессах, что подтверждается разнообразием форм его нахождения. Примеси марганца и селена в железистых фазах (см. гл.5, рис. 5.9) свидетельствуют о совместной миграции этих элементов и их вовлечении в процессы вторичного перераспределения.

«Глинистый» кластер определяется по повышенным содержаниям Al_2O_3 (см гл.5, 5.2) и элементов, ассоциирующих с алюмосиликатной матрицей и тонкозернистыми осадками, включая уран. Данная ассоциация отражает влияние пелитового материала и сорбционных процессов, играющих ключевую роль в накоплении ряда микроэлементов. Геохимическая специализация кластера подчёркивает значение глинистой компоненты как носителя и аккумулятора элементов, в том числе элементов с высоким коэффициентом сорбции. Наличие Ti, Zr, Sc и Y указывает на участие устойчивых к выветриванию компонентов и подчёркивает сложный состав тонкодисперсной фракции.

Результаты факторного анализа (табл. 4.6, рис. 4.14) в целом подтверждают выводы кластерного анализа (рис. 4.12). Первый, наиболее

Load factor, factor 1 and factor 2, factor 3
Rotation: without rotation
Selection: main components

A 3D scatter plot showing the distribution of chemical elements and compounds based on three principal components: Factor 1 (horizontal axis, ranging from -0.6 to 1.2), Factor 2 (depth axis, ranging from -0.6 to 1.2), and Factor 3 (vertical axis, ranging from -0.4 to 1.0). The elements are grouped into five distinct clusters, each labeled with a number (1 to 5) and enclosed by a colored outline. Cluster 1 (red) is located in the lower-left region. Cluster 2 (brown) is on the right side. Cluster 3 (black) is at the top. Cluster 4 (orange) is in the upper-middle region. Cluster 5 (purple) is in the center. Numerous elements and compounds are labeled, including Sr, Ba, Ce, Pr, Nd, CaO, Eu, Sm, MnO, Se, S, Sn, W, Fe2O3, Na2O, Zn, Pb, Sc, V, Sb, Lu, Yb, Tm, Ni, Co, Be, Er, Y, Dy, Tb, Gd, Ti, Cu, Bi, TiO2, Al2O3, U, Cd, Ga, Ag, K2O, Zr, Hf, Rb, MgO, Cs, Nb, Ge, and Mn. Vertical dashed lines connect many of the points to the Factor 1 and Factor 2 axes, indicating their coordinates in those dimensions.

По результатам кластерного и факторного анализов установлены три наиболее характерные геохимические ассоциации элементов. Коэффициенты концентрации микроэлементов в углях месторождения по этим группам приведены на рис. 4.15. В большинстве случаев содержания микроэлементов

находятся на уровне или ниже средних значений для мировых углей ($0,5 < CC < 5$ и $CC < 0,5$) [81]. Исключение составляет сера, для которой в гидротермальной ассоциации зафиксированы максимальные значения коэффициента концентрации (до 10 000).

«Глинистая» ассоциация (рис. 4.15 А) отражает геохимические особенности углей и вмещающих пород, «редкоземельная» (рис. 4.15 Б) связана с фосфатно-редкоземельными источниками вещества и их последующими преобразованиями, а «гидротермальная» (рис. 4.15 С) характеризует влияние наложенных гидротермальных процессов в обрамлении Шубаркольской мульды. За единицу приняты средние содержания элементов в каменных углях [81].

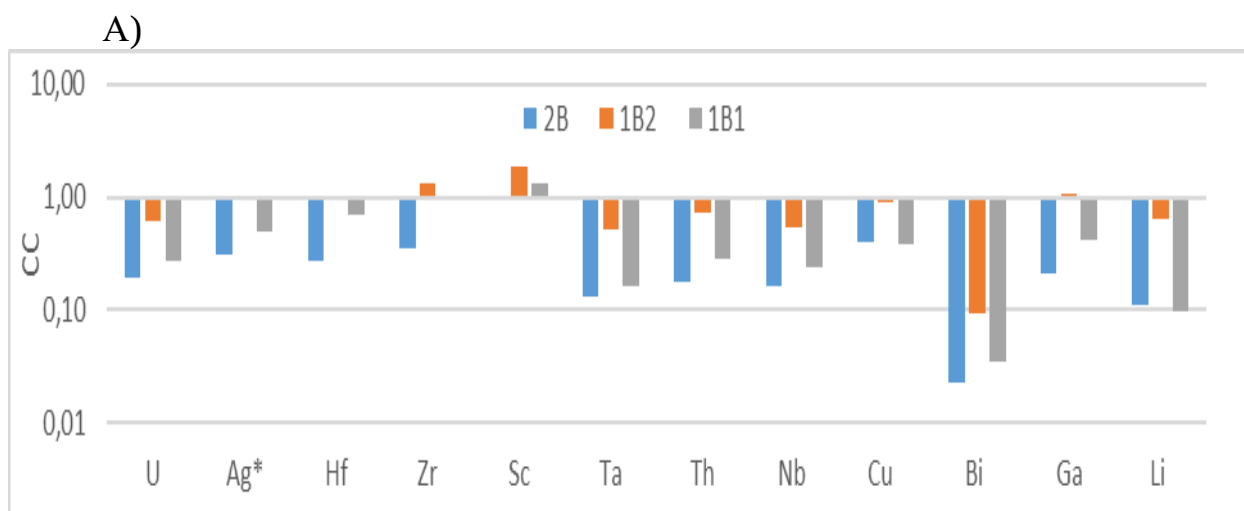
Таким образом, интерпретация кластерного анализа подтверждается результатами факторного анализа, в котором наибольший вклад в общую дисперсию вносит глинистый фактор (30,4 %), отражающий роль пелитового терригенного материала.

Таблица 4.6 – Факторные нагрузки пород месторождения Шубарколь (см. рис. 5.14)

Элемент, компонент	Глинистый (фактор 1)	Редкоземельный (фактор 2)	Фосфатный (фактор 3)	Гидротермальный (фактор 4)	Слюдистый (фактор 5)
Li	0,92	-0,20	0,11	-0,11	0,00
Be	-0,12	0,78	-0,33	0,24	0,20
S	0,11	-0,20	0,06	0,76	-0,28
Sc	0,71	0,33	0,01	0,02	0,54
V	0,36	0,42	-0,39	0,25	0,54
Cr	0,59	0,31	-0,41	0,27	0,28
Co	-0,50	0,60	-0,36	0,18	-0,04
Ni	-0,39	0,56	-0,12	-0,11	0,18
Cu	0,80	-0,15	0,19	-0,09	0,19
Zn	-0,03	0,09	-0,21	0,02	-0,15
Ga	0,93	-0,08	-0,08	0,02	0,17
Ge	0,74	-0,04	-0,12	0,35	0,40
As	0,31	-0,31	0,07	0,66	-0,34
Se	-0,11	-0,05	0,19	0,56	-0,42
Rb	0,65	0,03	-0,13	-0,31	-0,48
Sr	0,12	-0,01	0,90	0,05	0,21
Y	0,07	0,94	-0,12	0,02	-0,21
Zr	0,92	0,12	-0,17	-0,02	0,22
Nb	0,97	-0,02	0,01	-0,11	0,04
Mo	0,11	-0,45	-0,01	0,64	-0,16
Ag	0,95	0,03	-0,06	0,00	0,19
Cd	0,68	-0,20	-0,14	0,27	-0,20
Sn	0,01	-0,22	-0,08	0,05	-0,07
Sb	0,17	0,51	-0,42	0,30	0,52
Te	-0,03	-0,02	-0,02	-0,19	0,12
Cs	0,57	-0,03	-0,08	-0,32	-0,49
Ba	0,10	0,02	0,89	0,03	0,22
La	0,32	0,03	0,91	0,05	0,00
Ce	0,16	0,20	0,93	0,03	-0,05
Pr	0,12	0,30	0,93	0,02	-0,07
Nd	-0,02	0,46	0,87	0,00	-0,09

Sm	-0,11	0,78	0,58	0,02	-0,13
Eu	-0,03	0,75	0,64	0,04	-0,01
Gd	-0,14	0,92	0,32	0,05	-0,10
Tb	-0,07	0,98	0,06	0,07	-0,09
Dy	0,05	0,98	-0,08	0,07	-0,10
Ho	0,15	0,95	-0,15	0,05	-0,12
Er	0,31	0,90	-0,17	0,04	-0,14
Tm	0,43	0,82	-0,22	0,04	-0,18
Yb	0,49	0,77	-0,22	0,05	-0,19
Lu	0,54	0,74	-0,21	0,02	-0,18
Hf	0,93	0,13	-0,17	-0,04	0,20
Ta	0,92	-0,14	0,08	-0,16	-0,13
W	0,25	-0,21	-0,05	0,75	-0,33
Tl	0,72	-0,28	0,13	0,05	-0,33
Pb	0,56	0,32	0,08	0,13	-0,18
Bi	0,88	-0,18	0,15	-0,09	0,12
Th	0,97	-0,06	0,02	-0,10	0,01
U	0,87	-0,19	0,04	0,32	0,19
TiO ₂	0,95	-0,15	0,12	-0,13	0,01
Al ₂ O ₃	0,94	-0,18	0,09	-0,11	-0,10
Fe ₂ O ₃	0,30	-0,01	0,02	0,10	0,10
MnO	0,46	-0,31	0,37	0,08	0,06
MgO	0,66	0,11	-0,17	-0,36	-0,40
CaO	-0,31	0,29	0,58	-0,05	0,14
Na ₂ O	0,15	0,19	-0,07	-0,40	0,03
K ₂ O	0,69	0,05	-0,14	-0,32	-0,45
P ₂ O ₅	0,13	0,02	0,89	0,06	0,24
Вес фактора, %	30,4	20,3	14,5	6,5	5,9

*Примечание: жирным шрифтом выделены значимые факторные нагрузки



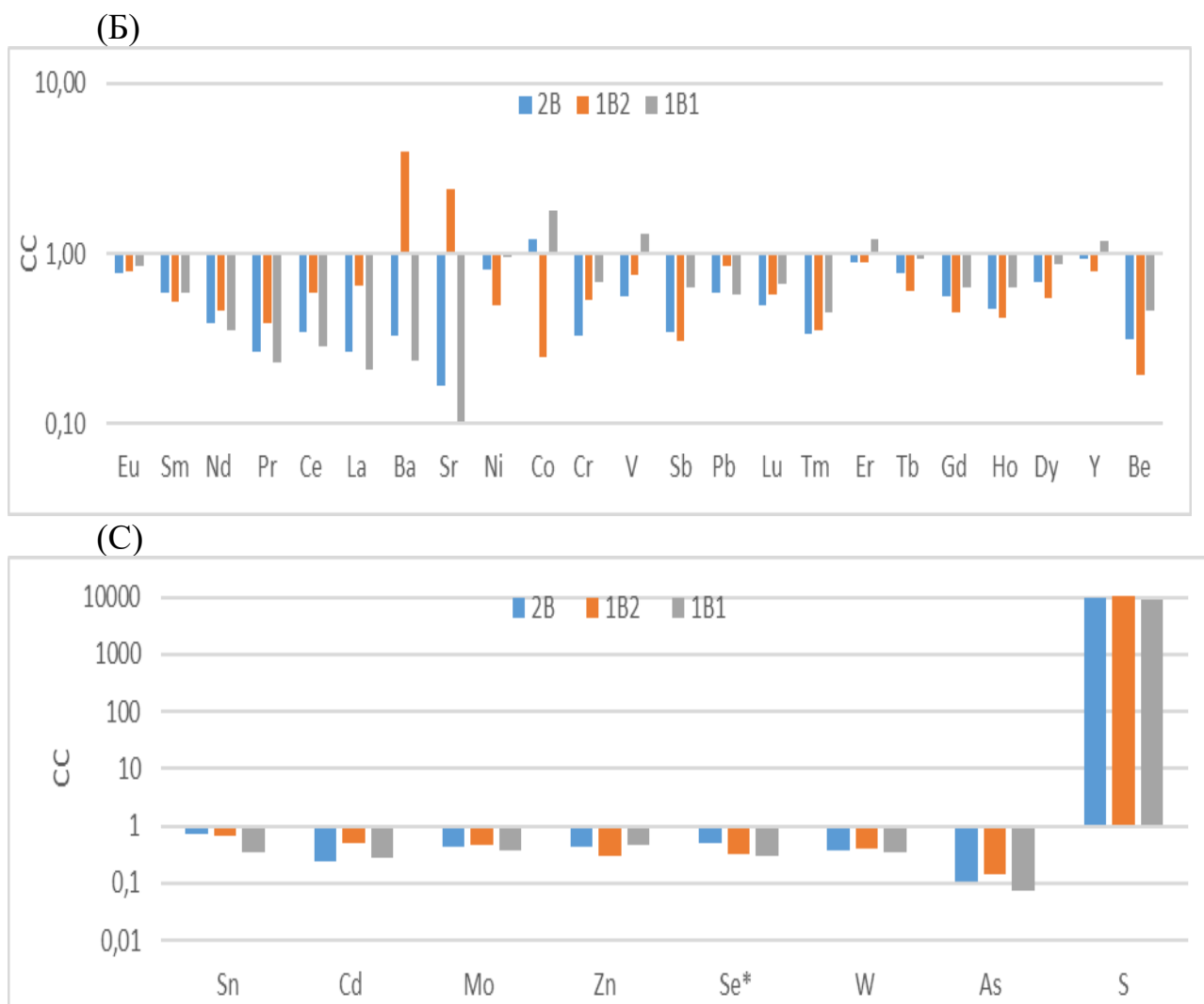


Рисунок 4.15 – Коэффициенты концентрации (КК) микроэлементов в углях пластов 2В, 1В2, 1В1 месторождения Шубарколь по выделенным кластерам

4.5 Источники и пути поступления элементов-примесей в угленосные отложения

В обрамлении месторождения Шубарколь участвуют ранне- и среднекаледонские магматические комплексы, преимущественно граниты, лейкограниты, гранодиориты, диориты, монцодиориты. Так, на западе присутствуют такие крупные выходы докембрийских массивов – Улытау, Сарысу-Тенизский (Кирейский выступ), состоящие из гранодиоритовых, альбитовых щелочно-полевошпатовых комплексов. К востоку от месторождения Шубарколь расположена западная часть Центрально-Казахстанского вулканоплутонического пояса, состоящего преимущественно из гранитоидов, андезитов, трахитов, а также пород щелочного ряда – сиеногабброидов, монцонитов, граносиенитов, сиеногранитов. Вторичные геологические процессы разрушения и преобразования древних магматических комплексов, по-видимому,

участвовали в формировании геохимических ассоциаций осадочных пород угольной впадины Шубарколь.

Определенное влияние на металлогенический и геохимический облик региона оказали процессы тектоно-магматической активизации. В пределах района месторождения Шубарколь находится Жайылма-Караобинская зона тектоно-магматической активизации герцинского тектогенеза (рис. 4.16). Процессы сопряженной активизации на территории Центрального Казахстана проявлены достаточно мощно и широко, сопровождаясь при этом рудоносными формациями, с которыми связано большинство редкометальных месторождений и рудопоявлений [99, 100]. Они могут быть источниками поступления редкоземельных элементов в близлежащие угленосные отложения.

В результате изучения геологической истории развития района Майкубенского бассейна (рис. 4.17) можно предположить, что основная область сноса осадков была расположена к западу, югу и востоку от площади, занимаемой в настоящее время Майкубенским бассейном.

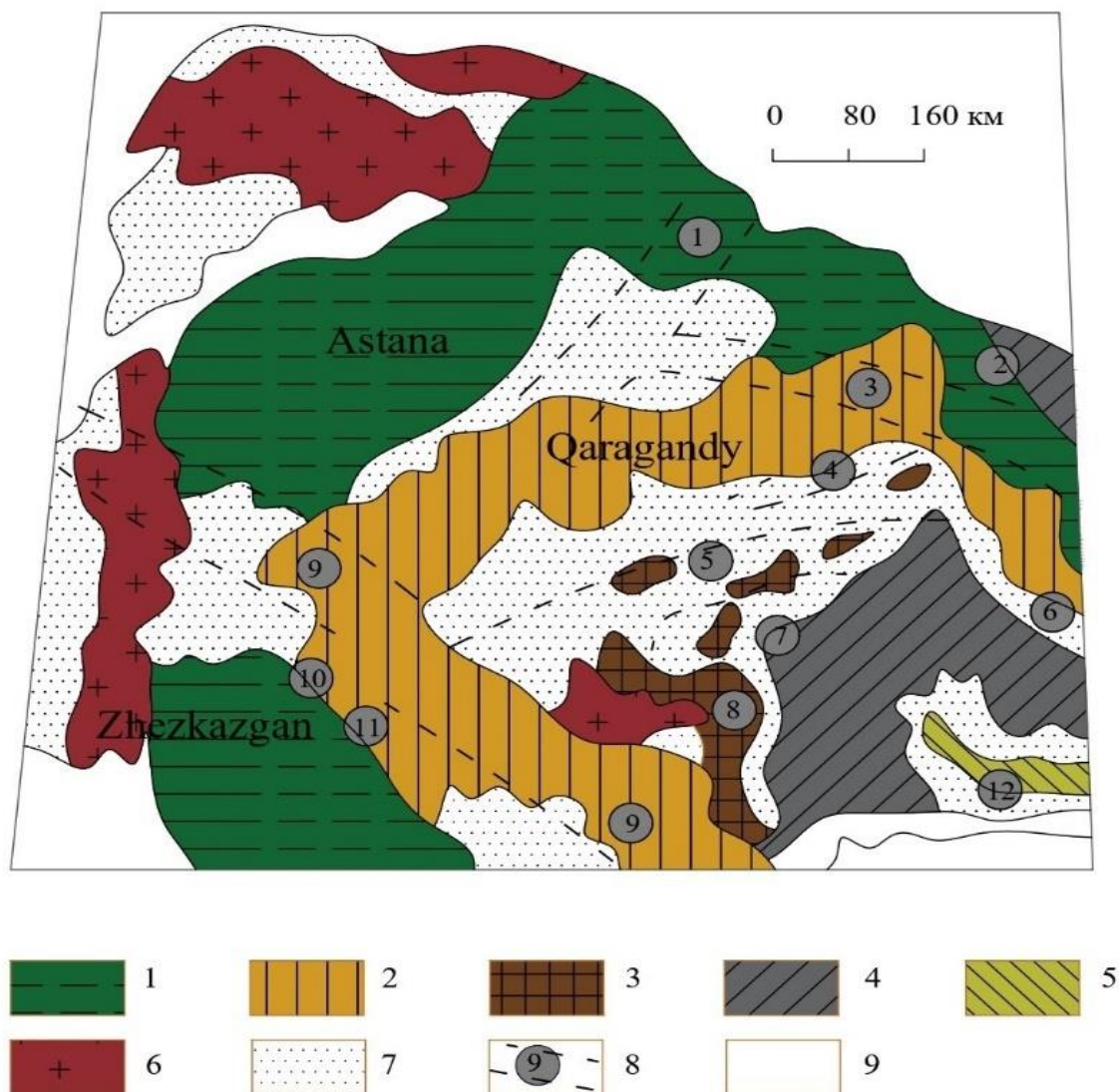
Геохимический облик структур обрамления весьма разнообразен. В южной и юго-восточной части интрузивные породы различного состава: плагиогранодиориты, К-Na-сиенограниты, Na-граносиениты, лейкогранитовый и щелочной аляскиты. Геохимической особенностью щелочно-гранитоидных пород является их контрастная обогащенность литофильными и рядом других элементов, которые в дальнейшем могли мигрировать в угольный пласт с грунтовыми и поверхностными водами.

Вулканические комплексы (Александровский антиклинорий) (см. рис. 4.17), расположенные по юго-западной и западной границам угленосного бассейна, представлены большим количеством субщелочных пород – трахибазальтов, трахиандезитов и трахидацитов с высоким содержанием калия, являющимися положительной структурой изучаемого района. В полях развития вулканогенных пород широко проявлены мелкие, а иногда и средние месторождения, разрушение которых могло привести к накоплению многих химических элементов в бассейне угленакопления. В качестве источников редкоземельных элементов могли выступать Баянаульская и Тлеумбетская зоны тектоно-магматической активизации, также повлиявшие на металлогенический и геохимический облик региона.

Для реконструкции особенностей состава пород в областях питания были использованы отношения ряда петрогенных и химических элементов (Na_2O , K_2O , Si_2O ; Zr/TiO_2 , Nb/Y , $\text{Th}/\text{Sc} - \delta\text{Eu}$, $\text{La}/\text{Th} - \text{Hf}$) и построены соответствующие диаграммы (рис. 4.18-4.21), которые показывают, что источником редкоземельных элементов для изучаемых пород являлись как достаточно зрелые породы (присутствие в исходных осадках глинистых минералов), так и менее измененный петрогенный материал кислого состава (обогащение протолита КППШ). Косвенным свидетельством присутствия КППШ являются и повышенные содержания в породах Ba и Rb.

В ходе исследования (рис 4.18, 4.19) установлено, что на формирование геохимического фона объектов исследования, повлияло наличие

интрузивных пород (гранодиориты, диориты, габбро, дунит, перидотит, граносиениты, сиенит-порфиры, гранит-порфиры) и вулканических (дацитовые, риодацитовые, андезит, андези-базальт, алкали базальт, кварцевые альбитофиры, трахитовые порфиры) пород девонского возраста составляющих Центрально-Казахстанский вулcano-плутонический комплекс (ВПП), на что также указывают высокие содержания Sc.



1-5 – орогенные вулcano-плутонические пояса: 1 – раннекаледонский, в т.ч. в перекрытом залегании под Тенизской и Жезказганскими впадинами ($O_{2-3} - D_2$), 2 – среднекаледонский («Девонский», «Центрально-Казахстанский», D_1-D_3), 3 – позднекаледонский (D_2-D_3 или $C_1?$), 4 – раннегерцинские (C_1-P_1), 5 – позднегерцинский (C_2-P_2), 6 – выступы протерозойского фундамента, 7 – фанерозойские седиментационные бассейны, 8 – герцинские зоны тектоно-магматической активизации (номера зон в кружках: 1 – Койтасская, 2 – Тлеумбетская, 3 – Баянаульская, 4 – Спасская, 5 – Успенская, 6 – Южночингизская, 7 – Восточно-Жамансарыуская, 8 – Акбастау-Акжальская, 9 – Жаильма-Караобинская, 10 – Уйтас-Жезказганская, 11 – Кенжебай-Жаманайбатская, 12 – Сусызкаринская), 9 – мезокайнозойский платформенный чехол

Рисунок 4.16 – Главные вулcano-плутонические пояса Казахстана

[illegible]

Кроме того, диаграмма, используемая для определения состава пород в областях питания (рис. 4.20), показывает, что источниками элементов-примесей для большинства изученных образцов являлись обогащённые кварцем осадочные образования, а также магматические породы средне-кислого и основного состава.

Подтверждается это тем, что на юге (Карамендинский комплекс) и юго-западе (Алгабасская свита) обрамления Шубаркольского угольного месторождения (юрские) распространены [1] плутонические породы различного состава: гранодиориты, кварцевые диориты, диориты, аляскиты и габбро. А для Майкубенского бассейна аналогичную роль источников терригенного и геохимического материала играли вулcano-плутонические комплексы юго-западного и западного обрамления, приуроченные к Александровскому антиклинорию, а также интрузивные массивы южного и юго-восточного флангов, представленные субщелочными вулканитами (трахибазальты, трахиандезиты, трахидациты) и щелочно-гранитоидными породами (сиенограниты, граносиениты, аляскиты).

Их разрушение в условиях мезозойской реактивации способствовало поступлению в бассейн угленакопления литофильных, редких и редкоземельных элементов, формируя специфический геохимический облик угленосных толщ Майкубенского бассейна.

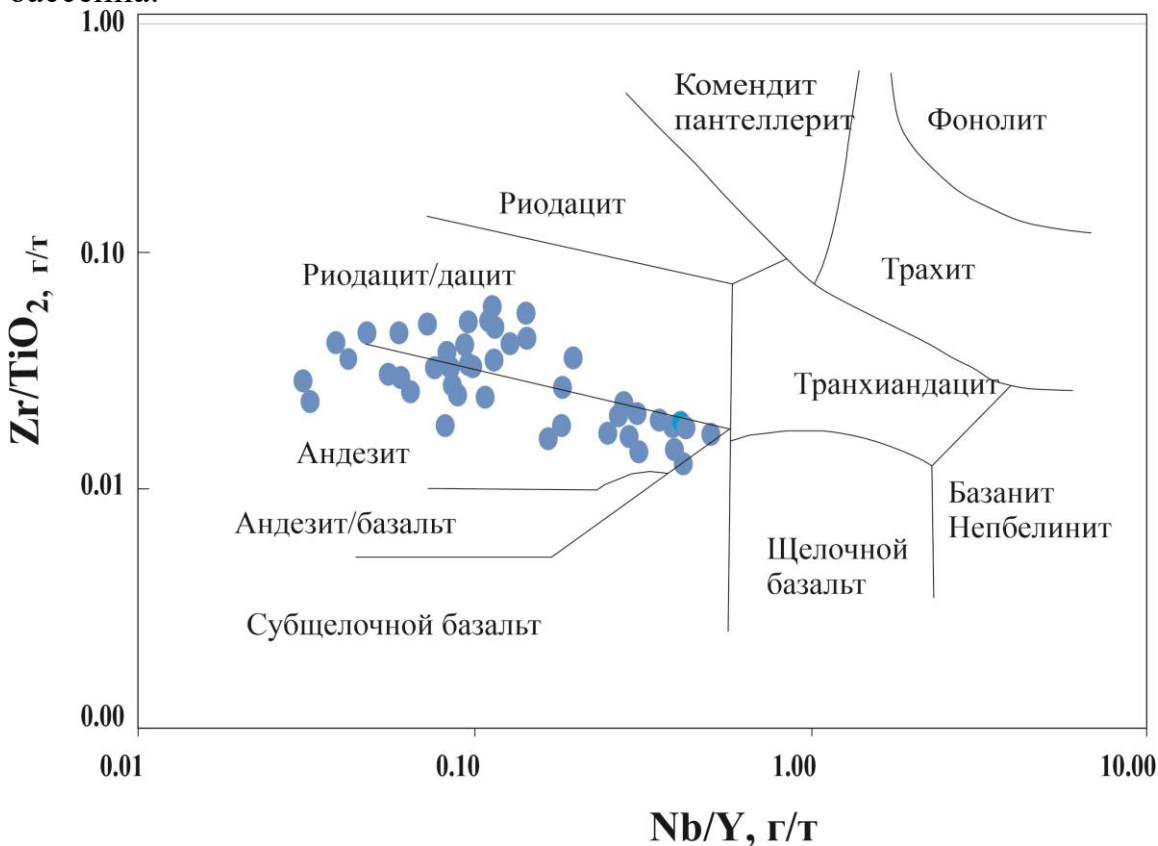


Рисунок 4.18 – Положение фигуративных точек составов на дискриминационной диаграмме (о данным месторождения Шубарколь)

Установлено, что элементы-примеси поступали в угли по образованным разломам из пород фундамента за счет выноса и переотложения с участием син- и эпигенетических процессов миграции грунтовых и подземных вод [101].

Совмещение данных по месторождениям Шубарколь и Майкубень на диаграмме (рис. 4.21) тектонической дискриминации La/Th-Hf демонстрирует их устойчивое пространственное разделение. Угли Майкубенского бассейна характеризуются повышенными значениями Hf при относительно низких La/Th, что указывает на значительную роль цирконсодержащего терригенного материала и прямое влияние источников кластики. Напротив, угли месторождения Шубарколь смещены в область повышенных La/Th при умеренных значениях Hf, что свидетельствует о переработанности терригенного материала и возрастании роли аутигенно-диагенетических процессов с участием органического вещества. Полученные данные согласуются с различием геодинамических условий формирования угленосных формаций и могут быть использованы в качестве прогностического критерия РЗЭ-обогащения.

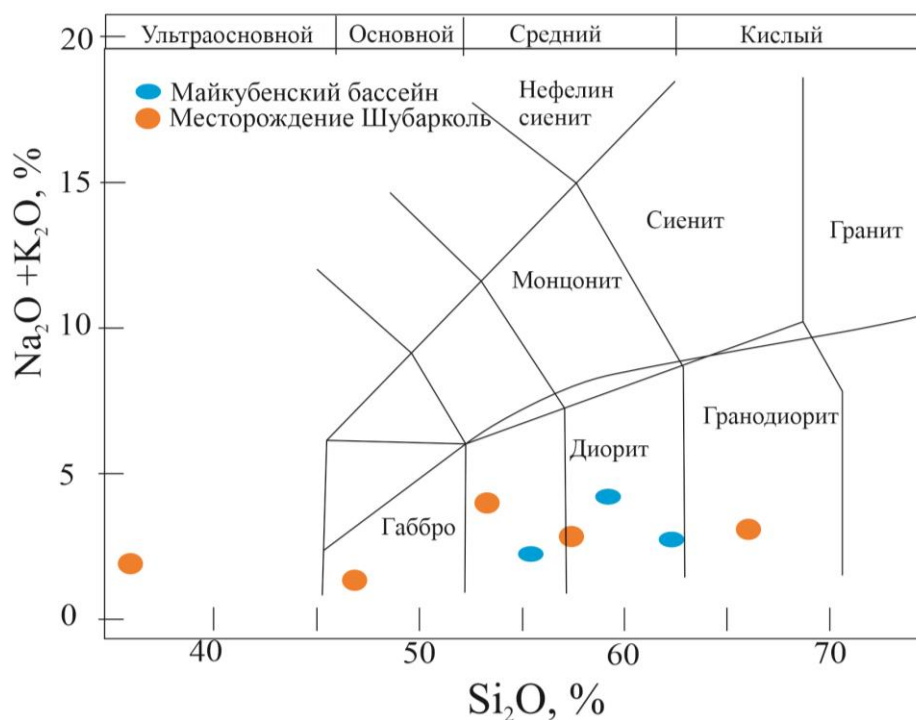


Рисунок 4.19 – Источники поступления элементов-примесей в угли Центрального Казахстана

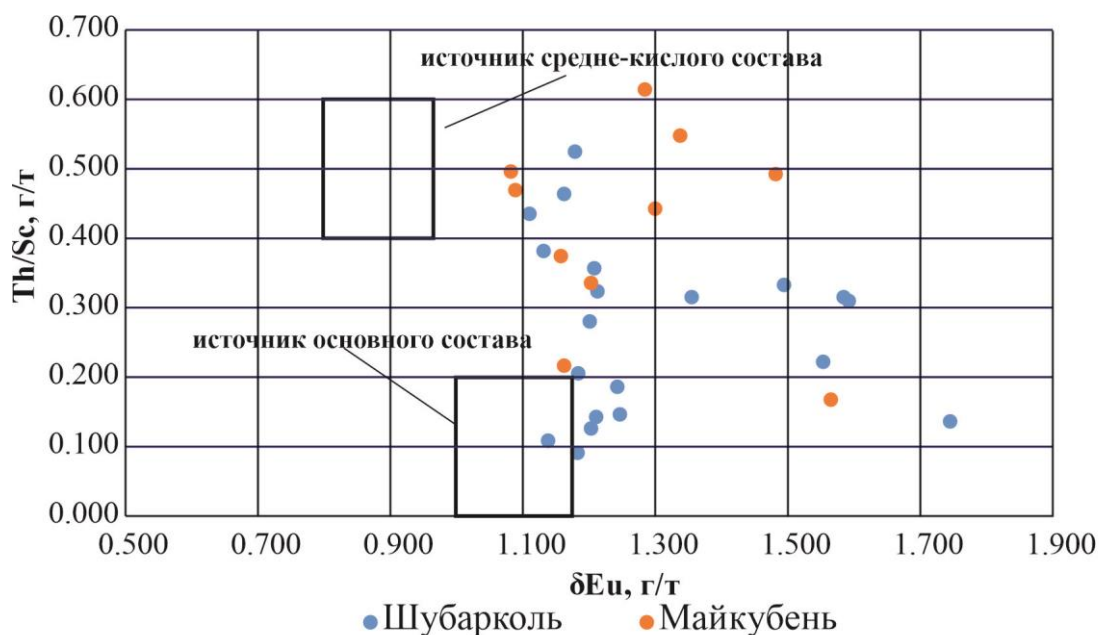


Рисунок 4.20 – Положение фигуративных точек составов на дискриминационной диаграмме [101]

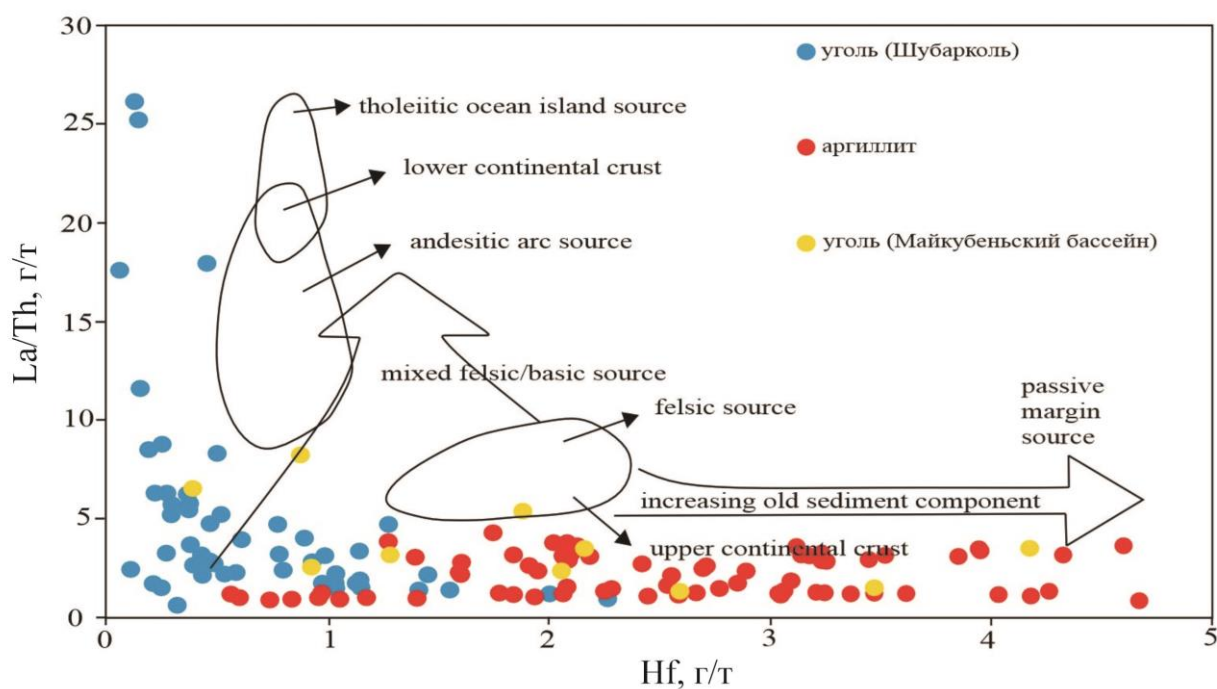


Рисунок 4.21 – Диаграмма тектонической дискриминации углей месторождений Шубарколь и Майкубень ($La/Th - Hf$) [102]

Данные особенности характерны для внутриплатформенных угленосных бассейнов, формировавшихся в условиях тектонической стабильности, и согласуются с преимущественно минерально-органической формой нахождения РЗЭ.

Анализ петрохимических модулей угленосных толщ Шубаркольского бассейна (в табл.4.7 и на рис. 4.22) показал преобладание умеренного гидролизата и алюмокремниевого состава (ГМ = 0,16-2,04; АМ = 0,07-1,74) при низких значениях фемического и титанового модулей (FM <0,2, ТМ <0,13).

Для большинства образцов (рис. 4.22) низкий FM и умеренный NM+KM, что соответствует стабильной постколлизийной обстановке.

Таблица 4.7 – Петрохимический модуль по данным месторождения Шубарколь

№Образец	ГМ	АМ	FM	ТМ	KM	NM+KM
2447	0,78	0,50	0,28	0,03	0,02	0,08
2449	0,68	0,46	0,22	0,03	0,02	0,04
2458	0,42	0,36	0,05	0,03	0,04	0,05
2467	0,36	0,28	0,08	0,03	0,11	0,12
2470	0,54	0,41	0,16	0,03	0,04	0,13
2471	0,40	0,35	0,08	0,03	0,08	0,15
2483	0,34	0,29	0,04	0,04	0,12	0,13
2486	0,63	0,30	0,40	0,05	0,02	0,48
2499	0,59	0,42	0,20	0,07	0,07	0,21
2504	0,16	0,08	0,08	0,09	0,04	0,30
2506	0,48	0,32	0,17	0,05	0,13	0,14
2508	0,54	0,43	0,15	0,07	0,05	0,27
2511	0,39	0,32	0,08	0,05	0,13	0,14
2513	1,79	1,61	0,12	0,06	0,02	0,04
2522	0,43	0,30	0,11	0,10	0,01	0,04
2531	0,49	0,41	0,07	0,05	0,00	0,04
2536	2,04	1,74	0,21	0,09	0,07	0,08
2547	0,31	0,28	0,03	0,05	0,07	0,08
2550	0,51	0,43	0,05	0,09	0,01	0,04
2555	0,16	0,13	0,03	0,11	0,06	0,19
2563	0,10	0,07	0,03	0,13	0,00	0,21

Эти показатели подтверждают о формировании угольных толщ в условиях стабилизированной постколлизийной рифтовой впадины, с преобладанием терригенного материала и ограниченным влиянием магматических или глубинно-тектонических источников. Локальные увеличения NM+KM (до 0,48) отражают контактное карбонатное обогащение и гидрокарбонатное влияние подземных вод.

Отношение Sr/Ba является одним из наиболее широко используемых индикаторов для осадочных пород и углей, что указывает на палеосолонцеватость и палеоклимат соответственно.

Как правило, значения Sr/Ba > 1 и < 1 указывают на засушливые и влажные климатические условия соответственно. Значения данного соотношения на исследуемой территории колеблются от 0.3 до 2.4.

Образование юрской терригенной формации происходило в существенно постоянных климатических и тектонических условиях, точнее, меняющихся в весьма узких рамках. Климат, будучи в целом гумидным, испытал некоторый сдвиг в сторону аридизации в самом конце накопления формации. Об этом свидетельствуют значения Sr/Ba, а также появление красноцветных пород и некоторое увеличение карбонатности [101].

Для оценки степени зрелости поступающей в область седиментации тонкой алюмосиликокластики в публикации (Cox et al., 1995) [103] использовали индекс химической вариации ICV (Index of Compositional Variability).

$$ICV = [Fe_2O_3] + [K_2O] + [Na_2O] + [CaO] + [MgO] + [TiO_2] / [Al_2O_3],$$

где $ICV < 1$ – зрелые глинистые осадки (спокойная тектоника)

$ICV > 1$ — незрелые терригенно-цементирующие материалы (активная тектоника).

Значения индекса композиционной вариабельности (ICV) для углевмещающих пород Шубаркольского бассейна варьируют в широких пределах, однако для подавляющего большинства образцов характерны значения $ICV < 1$, с максимумом распределения в интервале 0,3–0,5. Это указывает на высокую степень химической зрелости осадочного материала и его формирование в условиях стабильной постколлизийной геодинамической обстановки. Повышенные значения $ICV (>1)$ носят единичный характер и, вероятно, отражают локальные эпизоды активизации терригенного сноса, не определяющие общий режим развития бассейна.

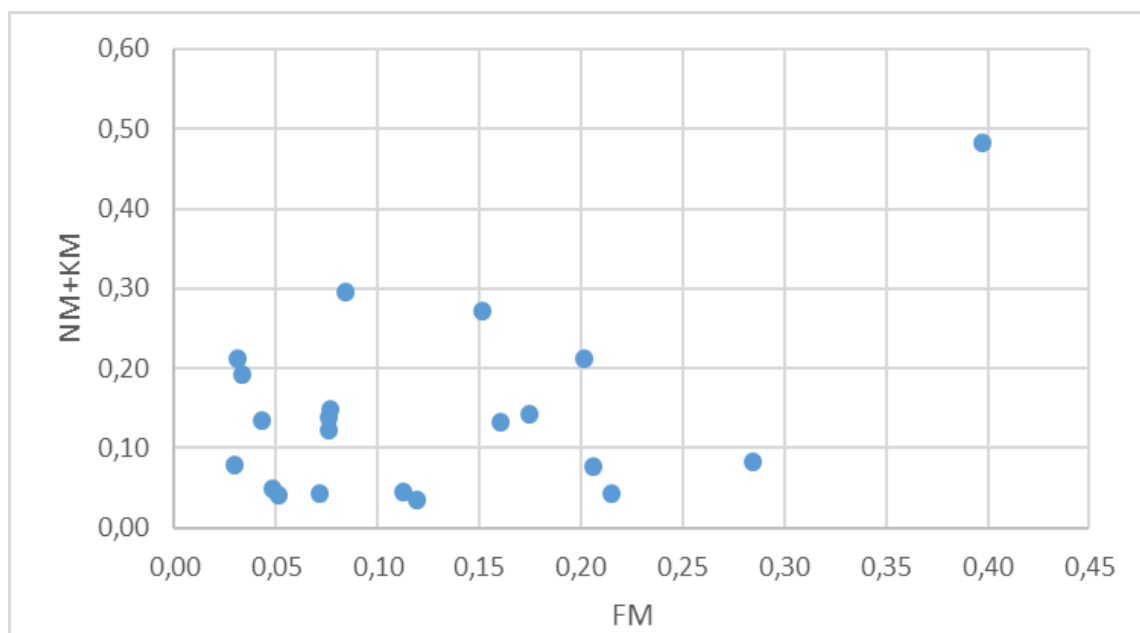


Рисунок 4.22 – Сравнение фермического и карбонатно-щелочного модулей (FM и NM+KM)

Выводы

Юрский этап геодинамической эволюции Центрального Казахстана характеризовался развитием внутриконтинентальных прогибов растяжения, связанных с постколлизией перестройкой структуры региона и активизацией глубинных разломов. В этот период формировались угленосные отложения Шубаркольского и Майкубеньского типов, приуроченные к разломно-блоковым структурам, контролировавшим как осадконакопление, так и поступление вещества в осадочный бассейн.

Результаты анализа диаграммы $Zr/TiO_2 - Nb/Y$, $La/Th - Hf$ (по Winchester & Floyd, 1977) [104] для углей месторождения Шубарколь свидетельствуют о преобладании источников, соответствующих кислым–средним магматическим породам и переработанному коровому материалу. Такое распределение точек отражает влияние юрских геодинамических процессов, сопровождавшихся:

- активизацией глубинных и краевых разломов;
- поступлением тонкодисперсного вулканогенного и вулканокластического материала;
- переработкой коровых комплексов в условиях внутриконтинентального растяжения.

Таким образом, геодинамический режим юры определял не только архитектуру осадочного бассейна, но и геохимическую специализацию поступающего терригенного материала, обогащенного высокозарядными элементами (Zr, Nb, Y).

В обеих месторождениях наблюдаются переходные фации между болотными и флювиальными системами. Высокая вариабельность индексов Ce/Ce^* , $LREE/HREE$ отражает чередование окислительных и восстановительных условий. Эти зоны являются наиболее перспективными для локального накопления РЗЭ за счёт сочетания органогенного и минерального механизма фиксации элементов.

Развитие блоковой тектоники и дифференцированных прогибов способствовало формированию локальных болотных и озёрно-болотных обстановок, характеризующихся пониженными значениями окислительно-восстановительного потенциала и слабокислой реакцией среды. В таких условиях создавались благоприятные предпосылки для:

- осаждения и фиксации урана в восстановительной среде;
- сорбции и концентрации редкоземельных элементов органическим веществом и глинистыми минералами.

Следовательно, юрская геодинамика Центрального Казахстана опосредованно контролировала химические параметры среды углеобразования, определяя способность системы к накоплению элементов-примесей.

Минерально-петрографический состав углей Шубаркольского месторождения также отражает влияние тектонически активной обстановки. Наличие каолинита, анатаза и циркона указывает на:

- поступление продуктов выветривания и вулканогенного материала;

- участие флюидных потоков, приуроченных к разломным зонам;
- формирование аутигенных и диагенетических минералов — носителей REE, Zr, Nb, Y и U.

Формы нахождения элементов-примесей в углях являются результатом взаимодействия органического вещества с минералообразующими процессами, контролируемые юрской тектонической активизацией региона.

На основании полученных данных можно предложить следующую концептуальную модель – рисунок 4.23.

Результаты кластерного и факторного анализа петрогенных компонентов и микроэлементов в углях месторождения Шубарколь позволили выделить устойчивые ассоциации химических элементов, отражающие различные источники вещества и геохимические процессы, участвовавшие в формировании угленосной толщи.

Полученные данные служат фактической основой для разработки прогнозных критериев выявления угольных месторождений с повышенными содержаниями редкоземельных и сопутствующих элементов-примесей.

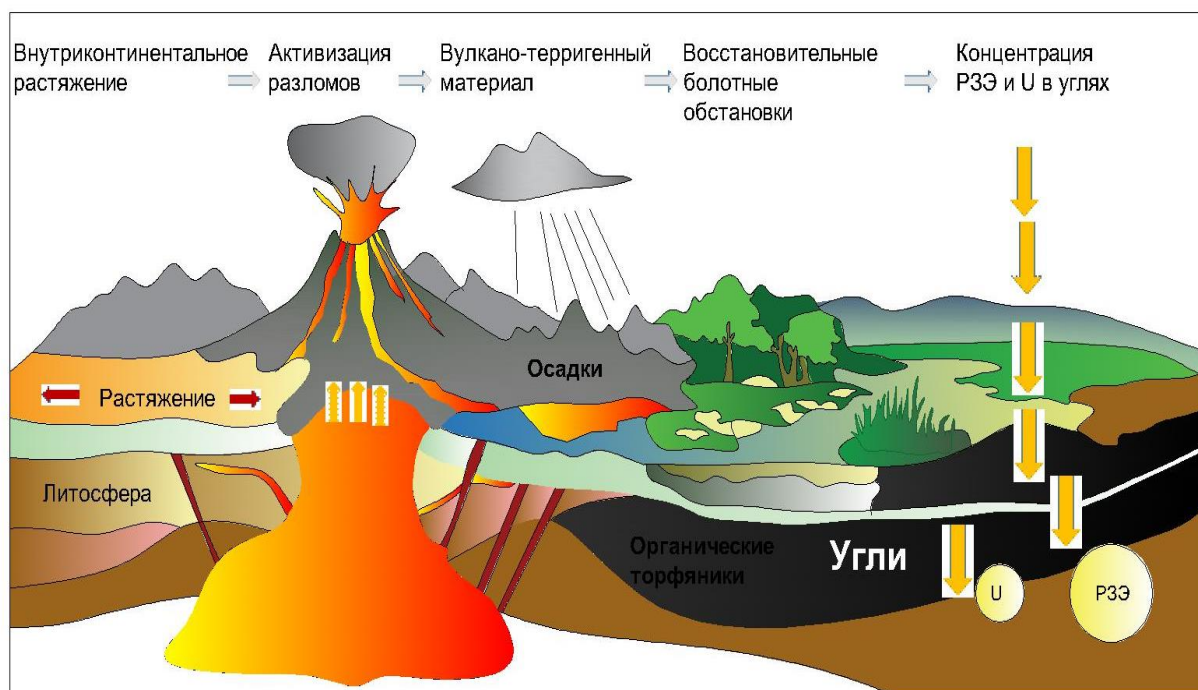


Рисунок 4.23 – Обобщающая геодинамическая модель накопления элементов примесей составлено автором на основе анализа полученных результатов и выводов, а также анализа литературы [53].

ГЛАВА 5 МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ СОСТАВ И ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ-ПРИМЕСЕЙ В УГЛЯХ

Минералогический состав углей и углевмещающих пород является ключевым фактором, определяющим формы нахождения, распределение и механизмы аккумуляции элементов-примесей, включая редкоземельные элементы. Анализ минеральных фаз, их морфологии и генетических особенностей позволяет реконструировать условия осадконакопления и постседиментационных преобразований угленосных формаций, а также выявить минералогические индикаторы геодинамически обусловленного обогащения углей. В настоящей главе рассмотрены основные породообразующие, акцессорные, сульфидные и вторичные минералы углей Шубаркольского месторождения и Майкубеньского угольного бассейна, а также их роль в формировании геохимической специализации углей.

5.1 Породообразующие и глинистые минералы углей

Минеральная матрица углей Шубаркольского месторождения и Майкубеньского угольного бассейна представлена преимущественно алюмосиликатными фазами, среди которых ведущую роль играют глинистые минералы и кварц. Их минеральный состав, морфологические особенности и пространственное распределение отражают условия осадконакопления, характер терригенного привноса, а также интенсивность диагенетических и ранних эпигенетических преобразований.

Результаты минералогического анализа показывают, что для всех исследованных образцов характерно преобладание кварца и каолинита, что свидетельствует о значительном участии терригенного материала и интенсивных процессах химического выветривания исходных пород в областях питания бассейнов. Доминирование кварца в большинстве проб указывает на высокую степень зрелости терригенного материала и его многократную переработку в условиях устойчивого осадочного режима. В углях Шубаркольского месторождения кварц встречается как в виде хорошо огранённых кластогенных зёрен, так и в виде натечных образований, что указывает на его частичное переотложение и участие в постседиментационных процессах (рис 5.1). В углях Майкубеньского бассейна кварц имеет крайне ограниченное распространение и представлен редкими угловатыми зёрнами размером менее 0,1 мм, что отражает минимальный терригенный привнос в период торфонакопления.

Каолинит является доминирующим глинистым минералом углей Шубаркольского месторождения и широко распространён в углях Майкубеньского бассейна. Он встречается в виде землистых агрегатов, прожилков, пластинчатых и сферолитоподобных образований, а также хорошо раскристаллизованных вермикул, распадающихся на отдельные пластинки (рис. 5.2).

Морфология каолинита и его пространственная связь с органическим веществом свидетельствуют о преимущественно аутигенном и раннедиагенетическом характере его формирования.

Повышенное содержание каолинита в образцах участка 1 отражает развитие кислых восстановительных условий и активизацию процессов каолинизации, вероятно, связанных с флюидным воздействием и тектонической активизацией.

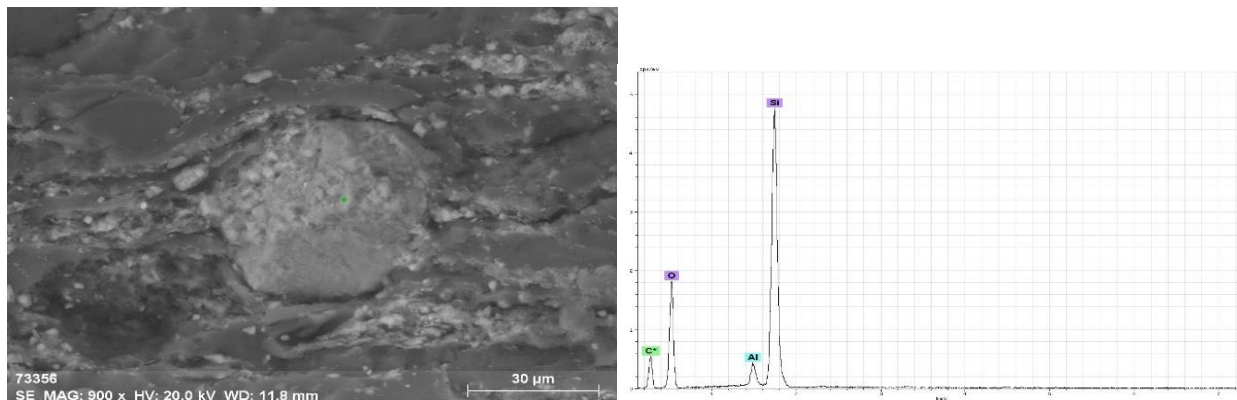


Рисунок 5.1 – Кварц

Иллит-мусковит – фоновые минералы глинистых прослоев. Иллит и гидрослюдистые разности представлены в меньших количествах и, как правило, ассоциируют с каолинитом. Они встречаются в виде чешуйчатых и пластинчатых агрегатов, ориентированных по слоистости угля, что указывает на их преимущественно сингенетическое или раннедиагенетическое происхождение. Присутствие иллита свидетельствует о более стабильных физико-химических условиях среды осадконакопления и ограниченной переработке исходного терригенного материала.

Глинистые минералы являются основными носителями скрытых форм редкоземельных элементов, лития, ванадия и германия. РЗЭ фиксируются в их структуре в виде изоморфных замещений и сорбционных комплексов, что подтверждается результатами корреляционного и факторного анализа. Также глинистые минералы являются главными, которые контролируют сорбционные процессы и накопление литофильных элементов.

Глинистое вещество углей Майкубенского бассейна отличается неоднородностью состава и морфологии. В микроскопе оно наблюдается в виде прозрачных или беловатых включений размером 1-5 мкм, ориентированных преимущественно по слоистости угля. Такое положение частиц указывает на их сингенетический характер и терригенное происхождение. Терригенное происхождение глинистого вещества указывает на активный приток аллохтонного материала в торфяную систему.

В ряде случаев глинистое вещество образует более крупные агрегаты, конкреции и прослои мощностью до нескольких миллиметров, существенно влияя на физико-механические свойства углей и их обогатимость. Именно

эта фракция играет ключевую роль в аккумуляции редкоземельных и ряда рассеянных элементов.

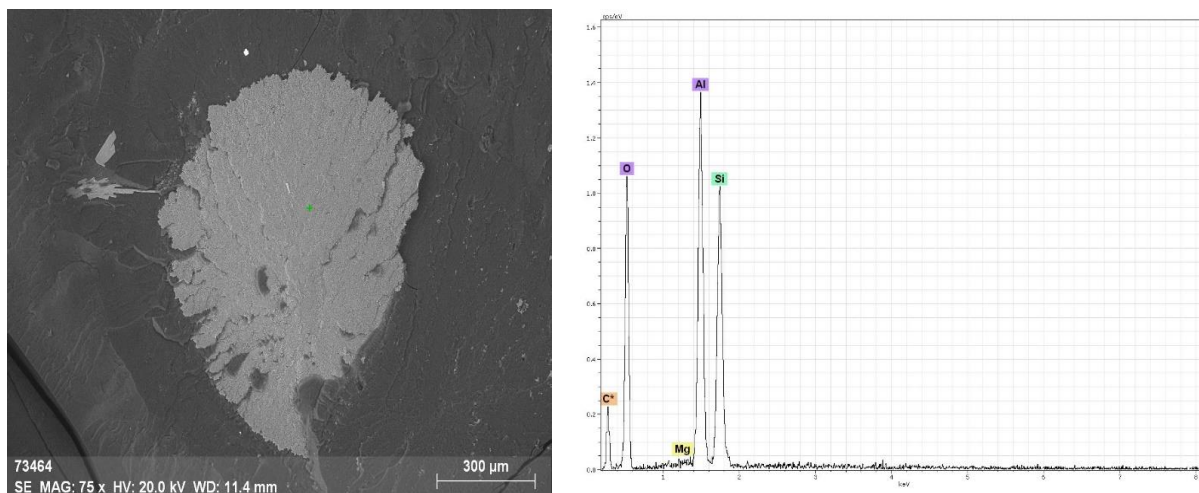


Рисунок 5.2 – Каолинит

В составе минеральной матрицы углей, наряду с кварцем и глинистыми минералами, в подчинённом количестве отмечаются полевые шпаты (плагиоклазы и/или калиевые полевые шпаты). Низкое содержание минералов группы полевых шпатов в углевмещающих и контактовых породах в целом указывает на их нестойкость в условиях интенсивного химического выветривания и диагенеза. Практически полное отсутствие полевых шпатов в пробах с участков 4 и 5 может свидетельствовать о более высокой степени переработки осадочного материала либо о его поступлении из источников, уже обеднённых полевыми шпатами.

5.2 Акцессорные и вторичные силикатные и оксидные фазы.

5.2.1 Мусковит, анатаз и палыгорскит: условия формирования и генетическая интерпретация

Вторичные минералы представлены продуктами окисления сульфидных фаз, преимущественно сульфатами железа, формирующимися по пириту и марказиту и отражающими поздние постседиментационные, преимущественно окислительные процессы.

Мусковит, анатаз и палыгорскит являются важными индикаторными минералами в углях и углевмещающих породах Шубаркольского месторождения, отражающими как условия поступления терригенного материала, так и особенности постседиментационных преобразований угленосной толщи. Их распространение, количественные соотношения и ассоциации с другими минеральными фазами позволяют реконструировать геохимическую обстановку осадконакопления и диагенеза.

Широкое распространение мусковита и анатаза в большинстве исследованных проб отражает специфику исходного терригенного материала и условия осадконакопления. Повышенные содержания мусковита в образцах

с участков 2 и 3 (см.рис. 2.2 глава 2) могут указывать на близость источников с метаморфическими и магматическими породами либо на относительно слабую гидродинамическую переработку осадков.

Сохранность мусковита в составе углевмещающих пород свидетельствует о быстром захоронении осадочного материала и ограниченной степени химического выветривания в отдельных зонах палеобассейна. В генетическом отношении мусковит рассматривается преимущественно как кластогенный минерал, однако его частичная трансформация и перераспределение в ходе диагенеза могли способствовать высвобождению и миграции калия и алюминия, что, в свою очередь, влияло на формирование аутигенных алюмосиликатных фаз.

Анатаз является характерной акцессорной фазой углей и углевмещающих пород Шубаркольского месторождения и присутствует практически во всех исследованных образцах. Его распространение и устойчивость в условиях диагенеза указывают на вторичную природу формирования, связанную с переработкой первичных титаносодержащих минералов (ильменита, титаномagnetита) в ходе химического выветривания и последующего диагенетического преобразования осадков. Формирование анатаза происходило в условиях кислой среды и высокой активности флюидов, что согласуется с развитием процессов каолинизации и общим обеднением пород полевыми шпатами. Анатаз играет важную роль в сорбции и фиксации редкоземельных элементов, урана и тория, что делает его значимым минералом-концентратором в углях Шубаркольского месторождения и объясняет его связь с зонами повышенной геохимической специализации.

Присутствие анатаза, в свою очередь, может быть связано с процессами переотложения и преобразования титаносодержащих минералов в ходе диагенеза. В глинистых минералах как углей, так и пород, часто наблюдается примесь титана. Оксиды титана могут образовывать как землистые агрегаты в пустотах органического вещества угля, так и крупные агрегаты, сложенные лучистыми, игольчатыми кристаллами в породе.

Палыгорскит выявлен преимущественно в образцах участка 1, который характеризуется наиболее сложной и многостадийной минералогической ассоциацией. Присутствие палыгорскита указывает на специфические условия формирования, связанные с воздействием щелочных и солевых растворов, а также с активной флюидной переработкой осадков на стадии диагенеза и раннего катагенеза. Генетически палыгорскит рассматривается как аутигенный минерал, формировавшийся в условиях повышенной минерализации поровых вод и периодической смены окислительно-восстановительной обстановки. Его локализация в пределах участка 1 позволяет интерпретировать данный участок как зону интенсивных постседиментационных преобразований, контролируемых разломной тектоникой и циркуляцией флюидов.

Совместное присутствие мусковита, анатаза и палыгорскита отражает сочетание кластогенного терригенного привноса и активных

диагенетических процессов, протекавших в пределах Шубаркольского угленосного бассейна. Эти минералы фиксируют переход от условий преимущественно осадочного накопления к этапу интенсивной постседиментационной переработки, сопровождавшейся перераспределением микроэлементов и редкоземельных элементов. Их генетическая интерпретация подтверждает ключевую роль флюидно-диагенетических процессов в формировании минералогического и геохимического облика углей Центрального Казахстана и создаёт основу для разработки прогностических критериев аномального накопления элементов-примесей.

5.2.2 Циркон и бадделеит как концентраторы Zr, Hf, Nb и Ta

Различия в минеральном составе между участками наиболее отчётливо проявляются в присутствии и наборе акцессорных минералов. Формирование акцессорных минералов, по-видимому, связано с локальными геохимическими условиями, изменениями окислительно-восстановительной обстановки и активным воздействием флюидов на стадии диагенеза и раннего катагенеза.

В образцах месторождения Шубарколь были установлены хорошо ограненные кристаллы циркона, самородного кремния, бадделеита (рис 5.3).

Циркон и бадделеит относятся к числу наиболее устойчивых акцессорных минералов углей и углевмещающих пород и играют ключевую роль в концентрации высокозарядных элементов (Zr, Hf, Nb и Ta). Их присутствие в углях Шубаркольского и Майкубеньского бассейнов фиксирует как состав питающих провинций, так и особенности переработки осадочного материала в условиях постседиментационного преобразования угленосных формаций.

Циркон является наиболее распространённым носителем Zr и Hf в исследованных углях и золе углей. В составе циркона фиксируются примеси Sc, Y и тяжёлых редкоземельных элементов, что подчёркивает его роль в концентрировании высокозарядных элементов.

Его устойчивость к химическому выветриванию и диагенетическим процессам обуславливает преимущественно кластогенное происхождение, связанное с размывом магматических и метаморфических комплексов фундамента Казахской складчатой системы. Наличие циркона в составе углей указывает на существенный вклад зрелого терригенного материала и относительную стабильность источников сноса в период осадконакопления. В отношении циркон характеризуется высокой изоморфной ёмкостью по отношению к Hf, а также способностью к включению Nb и Ta в кристаллическую решётку, что обуславливает его роль в формировании повышенных концентраций HFSE в углях [105].

Отдельные зёрна циркона содержат примесь скандия, титана, иттрия или других тяжёлых РЗЭ. В породе (участок 1) выявлены обломки кристаллов циркона, а также призматические кристаллы. Отдельные зёрна циркона (участок 2) имеют неправильную форму, они выглядят либо как

окатанные сросшиеся кристаллы, либо как новообразования. Цирконы также обнаружены в углях на контакте с аргиллитом. Форма некоторых зёрен напоминает таблитчатую. Отдельные зёрна циркона содержат примесь скандия, титана, иттрия или других тяжелых редких земель (Dy).

Такой характер минеральных выделений указывает на щадящий режим транспортировки вещества и исключает перенос его водными потоками. Это указывает на разные пути миграции РЗЭ в угли и углевмещающие породы месторождения [89].

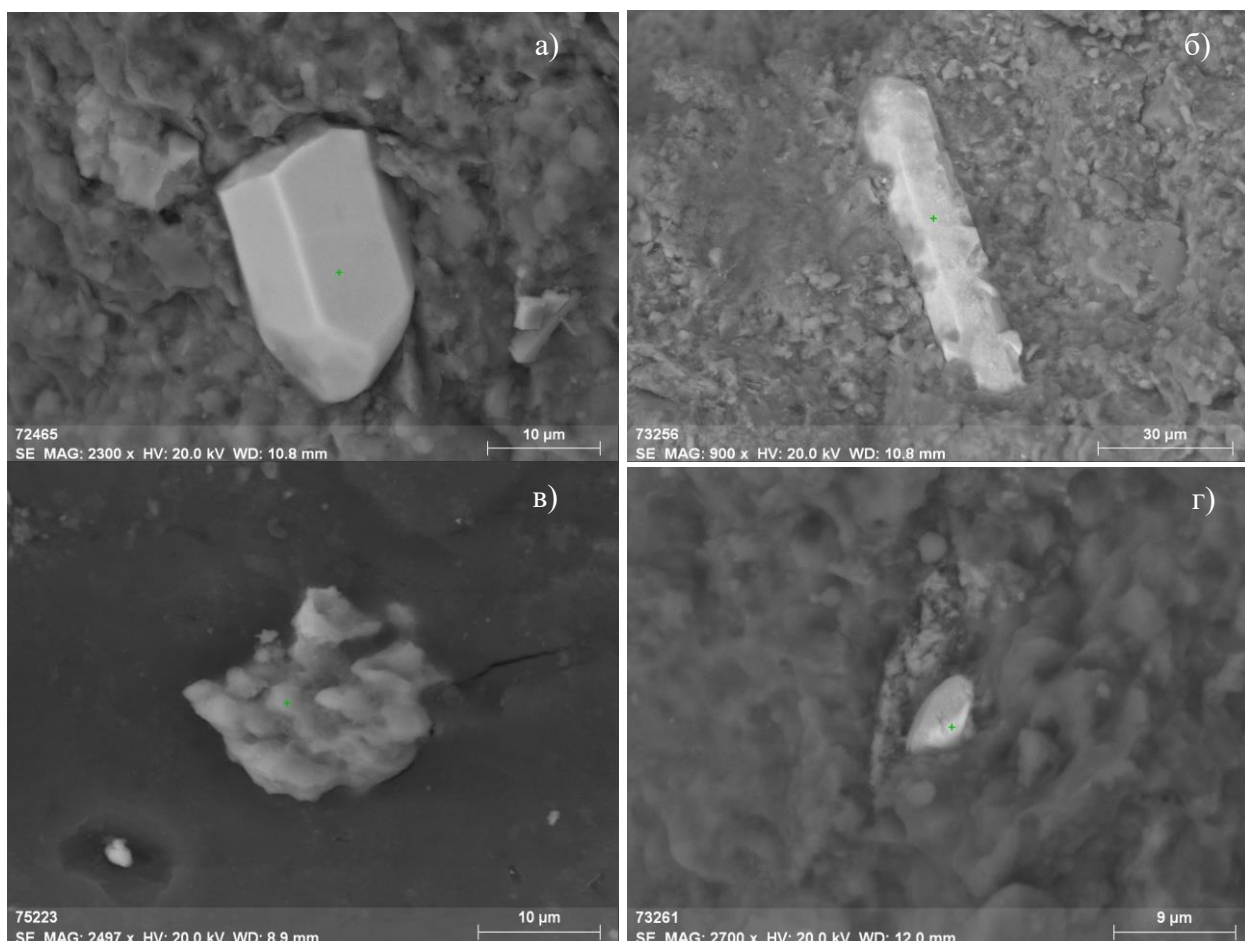


Рисунок 5.3 – Кристаллы циркона (а, б), самородного кремния (в) бадделеита (г)

Бадделеит (ZrO_2) выявляется значительно реже, однако его присутствие имеет важное генетическое значение. Бадделеит встречается значительно реже и представлен мелкими зернами, ассоциирующими с цирконом и глинистыми минералами. Минерал был выявлен в породах и углях на контакте с ними. Форма зёрен аналогичная циркону (призматическая), либо зёрна неправильной формы. Обнаружено зёрно диоксида титана, покрытое дендритом бадделеита.

В отличие от циркона, бадделеит формируется преимущественно в условиях мафического и щелочного магматизма, а также при переработке титан-циркониевых фаз в ходе высокоактивных флюидных процессов. Его обнаружение в углях и золе углей свидетельствует о более сложных

источниках циркония и, вероятно, отражает влияние вулканогенного материала или глубинных флюидов, поступавших в угленосный бассейн. Генетически бадделеит может рассматриваться как продукт вторичной кристаллизации при распаде циркона либо как аутигенная фаза, сформировавшаяся в ходе диагенеза и раннего катагенеза в условиях повышенной активности флюидов.

Совместное присутствие циркона и бадделеита отражает многоисточниковый характер поступления HFSE (Zr, Hf, Nb) в угленосные формации. Циркон фиксирует вклад устойчивого терригенного материала и отражает геохимическую специализацию питающих провинций, тогда как бадделеит указывает на эпизоды усиленной флюидно-вулканогенной активности, связанной с тектонической активизацией региона в мезозойское время. Такая ассоциация согласуется с представлениями о формировании угленосных впадин Центрального Казахстана в условиях постколлизийной активизации и внутриконтинентального растяжения.

Роль циркона и бадделеита как концентраторов Zr, Hf, Nb и Ta обуславливает их значение при разработке прогностических критериев выявления зон аномального накопления высокозарядных элементов в углях. Повышенные содержания HFSE (Zr, Hf, Nb) приурочены к участкам с увеличенной долей акцессорных фаз, устойчивых к диагенетической переработке, а также к зонам тектонического контроля, обеспечивавшим поступление и перераспределение глубинного вещества. Это позволяет рассматривать циркон-бадделеитовую ассоциацию как надёжный минералогический индикатор геодинамически обусловленного обогащения угленосных формаций элементами: Zr, Hf, Nb, Ta, Ti, Th.

5.3 Минеральные формы нахождения РЗЭ в углях

Минеральные формы нахождения редкоземельных элементов (РЗЭ) в углях и углевмещающих породах угленосных бассейнов Центрального Казахстана определяются сочетанием кластогенных, аутигенных и органо-минеральных процессов, реализующихся на различных стадиях осадконакопления, диагенеза и углефикации. Несмотря на подчинённое количественное содержание, именно минеральные фазы выступают основными носителями и долговременными аккумуляторами РЗЭ, определяя их распределение, фракционирование и устойчивость в угольной толще.

Формы нахождения РЗЭ в углях характеризуются значительным разнообразием, при этом наиболее распространёнными являются фосфаты, алюмофосфаты и карбонаты редкоземельных элементов. Данные минеральные фазы фиксируют процессы вторичного минералообразования, протекавшие в пределах угленосной толщи.

По результатам минералого-геохимических исследований для углей месторождения Шубарколь и Майкубенского угольного бассейна выделяются несколько генетически различных групп минеральных форм

нахождения редкоземельных элементов, различающихся по составу, морфологии и условиям формирования.

5.3.1 Фосфатные формы редкоземельных элементов

Фосфатные минералы являются ведущей минеральной формой фиксации редкоземельных элементов в углях Центрального Казахстана. К ним относятся монацит цериевого ряда (Ce, La, Nd), ксенотим и ксенотимоподобные Y-фосфаты, а также тонкодисперсные алюмофосфатные и смешанные фосфатные фазы сложного состава.

Монацит и ксенотим выявляются как в виде реликтовых кластогенных зёрен, унаследованных из областей питания, так и в форме аутигенных новообразований, представленных таблитчатыми, пластинчатыми и корковидными агрегатами. Реликтовые зёрна монацита, как правило, сохраняют признаки механического переноса и фиксируют первичную геохимическую сигнатуру источников терригенного материала. Напротив, аутигенные фосфаты РЗЭ характеризуются тесной пространственной связью с органическим веществом угля, поровым пространством и трещиноватостью, что указывает на их формирование в процессе диагенетического и раннего эпигенетического минералообразования.

Фосфатные минералы выполняют ключевую роль в аккумуляции как лёгких, так и тяжёлых редкоземельных элементов. Монацит преимущественно концентрирует LREE, тогда как ксенотим и иттрийсодержащие фосфаты обогащены HREE и иттрием. Их образование связано с повышенной активностью фосфора в поровых растворах и разрушением органо-минеральных комплексов на стадиях преобразования органического вещества. В результате происходит высвобождение ранее сорбированных РЗЭ и их перекристаллизация в устойчивые минеральные формы. В геохимическом отношении монацит является основным концентратором лёгких редкоземельных элементов (LREE), тогда как ксенотим и иттрийсодержащие фосфаты обогащены тяжёлыми редкоземельными элементами (HREE) и иттрием. Их образование связано с повышенной активностью фосфора в поровых растворах и разрушением органо-минеральных комплексов в процессе преобразования органического вещества, сопровождающимся высвобождением ранее сорбированных РЗЭ и их перекристаллизацией в устойчивые минеральные формы.

В углях месторождения Шубарколь фосфаты РЗЭ представлены агрегатами пластинчатых, листоватых и шестоватых кристаллов, а также осколками призматических зёрен, что позволяет интерпретировать их преимущественно как аутигенные образования [32, 89, 106, 80] (рис. 5.4).

В отдельных образцах выявлены натечные и пластинчатые алюмофосфатные образования состава, соответствующего горсейкиту $(\text{BaAl}_3(\text{PO}_4)(\text{PO}_3\text{OH})(\text{OH})_6)$. Данные минералы рассматриваются как продукты позднедиагенетического и эпигенетического минералообразования, сформированные в результате циркуляции фосфатсодержащих флюидов в

угольной толще и отражающие процессы вторичной фиксации редкоземельных элементов.

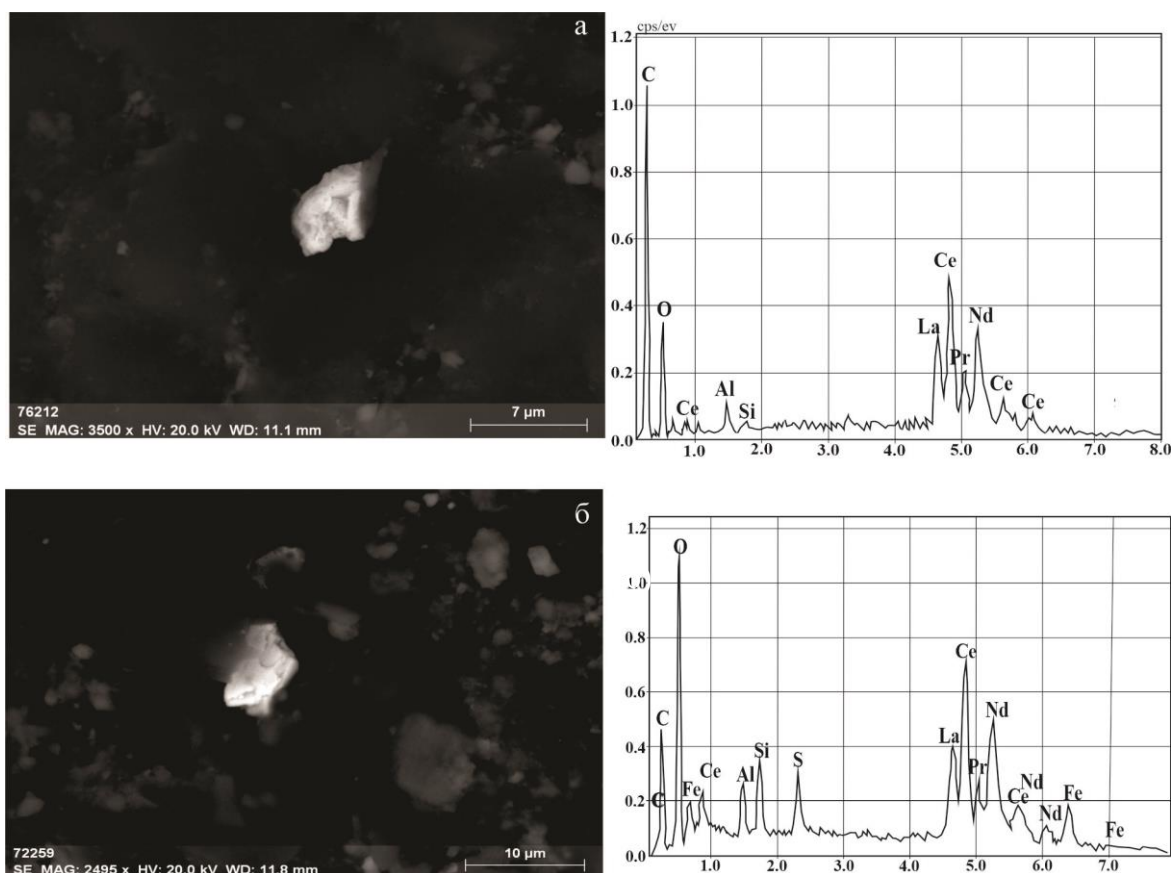


Рисунок 5.4. а – Фосфаты РЗЭ в виде призматических кристаллов, б – РЗЭ в виде агрегатов листоватых кристаллов

В аргиллите (участок 2) обнаружены реликтовые зёрна монацита пластинчатые, таблитчатые (рис. 5.5) и новообразованные фосфаты. Обнаружены также крупные корковидные и пленковидные фосфаты редких земель.

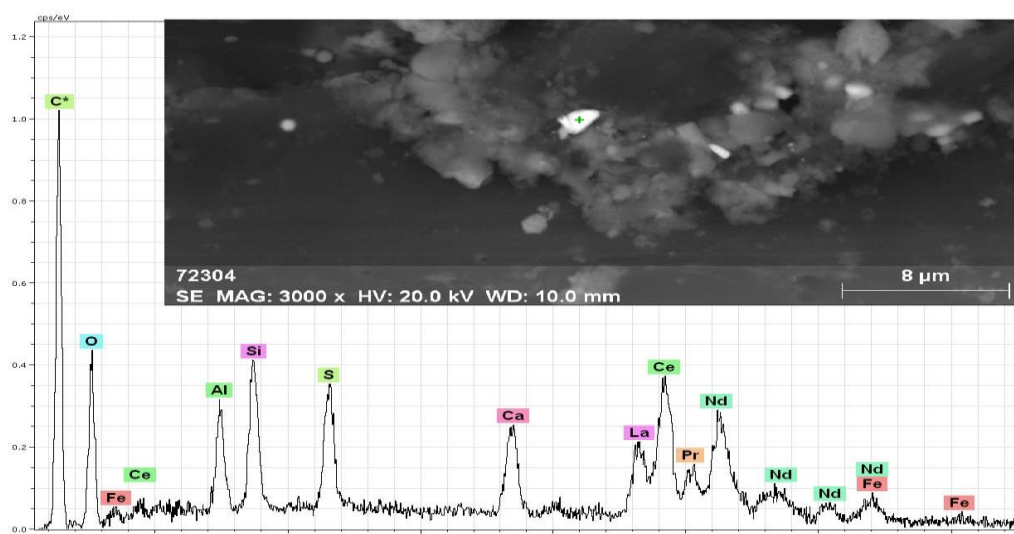


Рисунок 5.5 – Монацит

5.3.2 Карбонатные формы редкоземельных элементов

Карбонатные минералы редкоземельных элементов (бастнезит, синхизит, паризит и их изоморфные аналоги) имеют ограниченное и локальное распространение. Они приурочены преимущественно к зонам интенсивного диагенеза и эпигенетических преобразований, связанным с циркуляцией флюидов по трещинам и поровым каналам угольной толщ.

Карбонатные формы РЗЭ представлены пластинчатыми, листоватыми и корковидными агрегатами и часто ассоциируют с фосфатными минералами и органическим веществом. Их формирование отражает изменение химического состава поровых растворов в сторону повышенной активности карбонатных комплексов РЗЭ, характерной для поздних стадий диагенеза и эпигенеза. В геохимическом отношении карбонаты преимущественно концентрируют лёгкие редкоземельные элементы и рассматриваются как вторичная форма перераспределения РЗЭ внутри угленосной толщ.

Оксид карбонаты редких земель в образцах месторождения Шубарколь встречаются в виде агрегатов пластинчатых, листоватых, шестоватых кристаллов, осколков призматических кристаллов (рис. 5.6, 5.7).

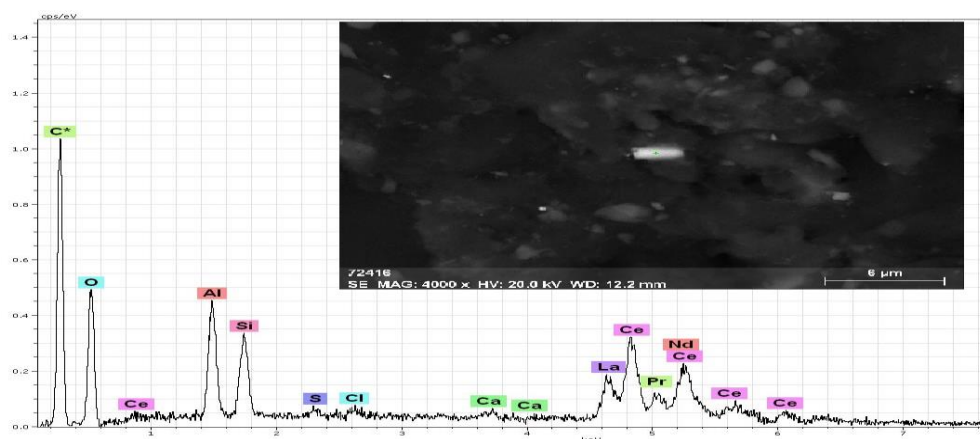


Рисунок 5.6 – Бастензит?

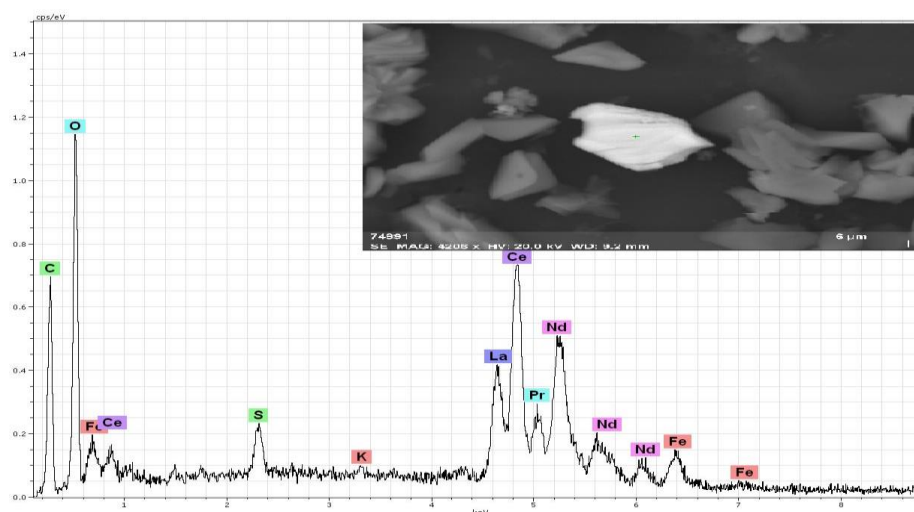


Рисунок 5.7 – Оксид (карбонат) редкоземельных элементов

5.3.3 Оксидные и гидроксидные формы РЗЭ

Оксидные и гидроксидные фазы играют подчинённую, но важную роль в аккумуляции редкоземельных элементов. К ним относятся анатаз, а также гидрооксиды железа и титана, обладающие высокой сорбционной ёмкостью по отношению к РЗЭ, урану и торию.

Анатаз формируется преимущественно в результате диагенетического преобразования титансодержащих фаз и процессов химического выветривания в областях питания. Благодаря развитой поверхности частиц он способен аккумулировать преимущественно LREE и уран. Гидрооксиды железа и титана чаще обогащены HREE и иттрием, что связано с селективной сорбцией элементов с меньшими ионными радиусами.

Формирование анатаза связано с процессами химического выветривания и диагенеза, протекавшими в кислых восстановительных условиях, характерных для болотных и озёрно-болотных обстановок осадконакопления. Его пространственная связь с зонами каолинизации и повышенными значениями LREE/HREE указывает на вторичное перераспределение редкоземельных элементов в ходе флюидной переработки угленосной толщи. Редкоземельные минералы в породе часто обнаруживаются в органическом веществе или рядом с ним. В одном из образцов (1-3-3) месторождения Шубарколь оксиды редких земель являются наиболее встречаемым минералом. В других образцах аргиллитов эти минералы встречаются реже. Оксиды образуют игольчатые кристаллы, их агрегаты, пластинки, зёрна неправильной формы.

Пластинчатые алюмооксидные фазы (Al_2O_3), обогащённые Ti, Sr и редкоземельными элементами, рассматриваются как продукты диагенетического и эпигенетического минералообразования, обладающие повышенной сорбционной ёмкостью по отношению к РЗЭ.

Следует подчеркнуть, что оксидные и гидроксидные фазы не формируют самостоятельных аномалий РЗЭ, а выступают вторичными концентраторами и перераспределителями элементов в пределах угольной толщи.

5.3.4 Акцессорные кластогенные минералы как носители РЗЭ

Акцессорные минералы играют ключевую роль в аккумуляции и перераспределении редкоземельных элементов (РЗЭ) в углях и углевмещающих породах угленосных бассейнов Центрального Казахстана. Несмотря на незначительное содержание по массе, именно акцессорные фазы определяют геохимическую специализацию углей и формируют локальные зоны аномального обогащения РЗЭ. Их минералогический состав, генезис и пространственное распределение отражают как источники поступления редкоземельных элементов, так и условия их фиксации в процессе осадконакопления и постседиментационной переработки.

Циркон аккумулирует преимущественно тяжёлые редкоземельные элементы (HREE), что обусловлено изоморфным замещением Zr^{4+} и Hf^{4+} и устойчивостью минерала к диагенетическим преобразованиям. Его присутствие фиксирует вклад зрелого терригенного материала и обеспечивает сохранность первичной геохимической сигнатуры источников сноса.

Особое значение в аккумуляции РЗЭ имеют глинистые минералы и органо-минеральные комплексы, в которых редкоземельные элементы фиксируются за счёт сорбционных и комплексообразующих механизмов. Взаимодействие органического вещества углей с акцессорными фазами способствует перераспределению РЗЭ между минеральной и органической составляющими, что особенно характерно для восстановительных условий и зон тектонического контроля, обеспечивающих приток флюидов.

Совместное участие акцессорных фаз различного генезиса формирует полигенную модель аккумуляции редкоземельных элементов в углях Центрального Казахстана. Кластогенные минералы фиксируют первичную геохимическую сигнатуру питающих провинций, тогда как аутигенные и диагенетические фазы отражают вторичную концентрацию и перераспределение РЗЭ в пределах угленосных формаций. Такая модель согласуется с представлениями о формировании угольных бассейнов региона в условиях мезозойской постколлизийной активизации и внутриконтинентального растяжения.

Роль акцессорных фаз в аккумуляции редкоземельных элементов позволяет использовать их как надёжные минералогические индикаторы при прогнозе зон аномального РЗЭ-обогащения. Наиболее перспективными являются участки, характеризующиеся сочетанием развитых акцессорных фаз, восстановительной геохимической обстановки и тектонической активизации, обеспечивавшей поступление и циркуляцию флюидов. Эти признаки могут быть использованы в качестве прогнозных критериев при оценке редкоземельного потенциала угленосных формаций юрского возраста Центрального Казахстана.

5.3.5 Органо-минеральные формы и переходные механизмы фиксации РЗЭ

Важную роль в распределении редкоземельных элементов играют органо-минеральные формы, связанные с гуминовыми веществами и глинистыми минералами. На ранних стадиях углеобразования РЗЭ активно сорбируются органическим веществом и образуют нестойкие комплексные соединения. По мере углефикации и изменения физико-химических условий происходит разрушение этих комплексов, сопровождающееся высвобождением редкоземельных элементов и их последующей фиксацией в аутигенных минеральных фазах, прежде всего в фосфатах и карбонатах.

Аутигенные минеральные формы РЗЭ, резко преобладающие в каменных углях, в том числе фосфаты, формируются в результате разрушения органических комплексов в процессе преобразования

органического вещества в ходе углеобразования, что согласуется с выводами Я.Э. Юдовича и М.П. Кетрис (2006) [85]. Таким образом, морфология и минералогический состав РЗЭ в углях Шубаркольского месторождения отражают ведущую роль органического вещества и диагенетических процессов в их аккумуляции.

Таким образом, органическое вещество выполняет функцию первичного концентратора РЗЭ, тогда как минеральные фазы обеспечивают их долговременное сохранение в геологической системе.

5.3.6 Формы нахождения РЗЭ в углях Майкубеньского бурого угольного бассейна

Формы нахождения редкоземельных элементов в бурых углях бассейна Майкубень анализированы и оценены автором на основе опубликованных данных С.И. Арбузова, полученных методом селективной экстракции органического вещества, предусматривающей поэтапное выделение битумов, гуминовых веществ и нерастворимого остатка. Полученное распределение РЗЭ между указанными фракциями позволяет количественно охарактеризовать вклад органической и минеральной составляющих угля в аккумуляцию редкоземельных элементов и установить особенности их фиксации на различных стадиях диагенеза и углефикации (табл. 5.2).

Исследование форм нахождения РЗЭ в углях Сарыкольского и Талдыкольского месторождений Майкубеньского бассейна показывает, что оба объекта демонстрируют единый тип распределения редкоземельных элементов, несмотря на существенные различия в зольности и общем уровне накопления элементов-примесей.

Таблица 5.2 – Выход лантаноидов во фракции группового состава бурого угля, % (модифицирована из [79]).

Групповой состав угля	Выход фракций	La	Ce	Sm	Eu	Yb	Lu
С-8-1 Сарыкольское (Ad = 8.6%)							
Исходный уголь	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Битумы	0.7	1.6	4.1	4.1	2.8	2.2	0.5
Гуминовые вещества	8.8	46.9	37.2	28.8	27.7	22.7	23.2
Нерастворимый остаток	90.5	51.5	58.6	67.1	69.5	75.2	76.3
Т-6-1 Талдыкольское (Ad = 22.6%)							
Исходный уголь	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Битумы	0.7	1.4	0.5	0.3	6.2	0.3	0.6
Гуминовые вещества	6.3	19.5	25.9	18.0	26.7	24.4	18.5
Нерастворимый остаток	93.0	79.0	73.6	81.7	67.0	75.4	80.9

Диаграмма (рис. 5.8) отражает усреднённое распределение редкоземельных элементов между основными фракциями группового состава углей – битумами, гуминовыми веществами и нерастворимым остатком.



Рисунок 5.8 – Диаграмма распределения РЗЭ по фракциям группового состава углей (Сарыколь и Талдыколь)

Для углей Сарыкольского и Талдыкольского участков Майкубенского угольного бассейна характерно чётко выраженное доминирование минеральной формы закрепления редкоземельных элементов, представленной нерастворимым остатком. В данной фракции концентрируется более 65–75% суммарных РЗЭ, что указывает на ведущую роль минеральных фаз в их аккумуляции. Основными носителями редкоземельных элементов выступают фосфаты, алюмосиликаты и, в меньшей степени, карбонатные минералы.

Доля гуминовых веществ в суммарном балансе РЗЭ варьирует в пределах 20–35%. При этом органическая матрица преимущественно аккумулирует средние и тяжёлые редкоземельные элементы (Y, Yb, Lu), что отражает особенности органо-минерального взаимодействия в углях низкой степени углефикации. Фракция битумов содержит менее 1-4% РЗЭ, что свидетельствует о крайне низкой миграционной способности редкоземельных элементов в условиях формирования угольной толщи и слабом участии углеводородной части органического вещества в процессах их фиксации.

Основным минеральным концентратом РЗЭ являются фосфатные минералы цериевого и иттриевого рядов: монацит (фосфаты Ce, La, Nd), ксенотимоподобные Y-фосфаты, обогащённые тяжёлыми РЗЭ (Yb, Lu), а также мелкодисперсные фосфаты сложного состава с изоморфным замещением. Анализ форм нахождения редкоземельных элементов в минеральных остатках показывает, что именно фосфатные фазы определяют

доминирование РЗЭ в нерастворимом остатке. Их присутствие характерно как для бурых, так и для каменных углей, включая аналогичные объекты Северной Азии.

Дополнительными источниками РЗЭ могут быть карбонаты редкоземельных элементов (бастнезит, синхизит, паризит), встречающиеся в условиях интенсивного диагенеза и характерные для высокозольных углей.

Акцессорные минералы (циркон, титанит) содержат следовые количества РЗЭ и выполняют второстепенную роль, однако их присутствие подтверждает кластогенную природу части минерализованного материала.

Несмотря на общий минеральный контроль распределения РЗЭ, между Сарыкольским и Талдыкольским участками выявлены принципиальные различия в степени участия органического вещества в их аккумуляции. Для углей Сарыкольского участка (проба С-8-1, $Ad = 8,6\%$) характерна повышенная концентрация редкоземельных элементов в гуминовых веществах. Доля La в гуминовой фракции достигает 46,9%, Ce – 37,2%, Sm – 28,8%, Eu – 27,7%, Yb – 22,7%, Lu – 23,2%, что указывает на значительную роль органической матрицы в фиксации, прежде всего, лёгких редкоземельных элементов. Последовательное снижение доли гуминовой ассоциации от La к Lu отражает селективную сорбцию LREE гуминовыми кислотами, характерную для восстановительных и слабощелочных условий угленакопления при длительном взаимодействии органического вещества с поровыми и инфильтрационными растворами.

Угли Талдыкольского участка (проба Т-6-1, $Ad = 22,6\%$), напротив, характеризуются резким доминированием нерастворимого остатка как основного носителя РЗЭ. В данной фракции сосредоточено 79,0% La, 73,6% Ce, 81,7% Sm, 67,0% Eu, 75,4% Yb и 80,9% Lu, тогда как доля гуминовых веществ, как правило, не превышает 18–26%. Такое распределение указывает на преимущественно литогенный контроль накопления редкоземельных элементов, связанный с глинистыми минералами и акцессорными фазами терригенного происхождения (циркон, монацит, ксенотим).

Сравнительный анализ форм нахождения Eu показывает, что в обоих участках данный элемент преимущественно локализован в нерастворимом остатке, особенно в углях Талдыкольского участка. Это отражает значительный вклад плагиоклаз-содержащих источников терригенного материала и указывает на ограниченную роль восстановительных условий, обеспечивающих стабилизацию Eu^{2+} в водных растворах в процессе осадконакопления и раннего диагенеза.

Совокупность полученных данных подтверждает общий механизм аккумуляции редкоземельных элементов в углях, при котором их основное накопление происходит на стадии раннего диагенеза — в период максимальной реакционной способности органического вещества. На последующих этапах углефикации происходит частичное перераспределение РЗЭ из органической матрицы в аутигенные минеральные фазы, преимущественно в тонкодисперсные алюмосиликатные и фосфатные образования.

Таким образом, для углей Сарыкольского и Талдыкольского участков Майкубенского угольного бассейна может быть выделен единый геохимико-минералогический тип угленосных формаций, характеризующийся комбинированным органо-минеральным контролем распределения редкоземельных элементов. В рамках данного типа гуминовые вещества выступают главным концентратором РЗЭ на ранних стадиях преобразования органического вещества, тогда как минеральные алюмосиликатно-фосфатные фазы выполняют функцию долговременного аккумулятора остаточной части редкоземельных элементов.

Сочетание реликтовых кластогенных зёрен (в частности монацита) с новообразованными фосфатами, оксидами и карбонатами редкоземельных элементов указывает на полигенный характер источников РЗЭ при доминирующем влиянии диагенетических процессов. Установленные особенности минералогических форм и механизмов фиксации редкоземельных элементов в углях Шубаркольского месторождения создают основу для сопоставления с углями Майкубенского бассейна, где иные литолого-фациальные условия и степень преобразования органического вещества могли обусловить специфику распределения и форм нахождения РЗЭ.

5.4 Сульфидная и сульфатная минерализация в углях

5.4.1 Железистые минералы

Железо в углях Центрального Казахстана представлено преимущественно в виде сульфидных и оксидных фаз, среди которых доминируют пирит (FeS_2), марказит, сидерит (FeCO_3), гематит и гётит.

Несмотря на ограниченное содержание по объёму, эти минералы оказывают значительное влияние на геохимию углей, включая распределение элементов-примесей, концентрацию редкоземельных элементов (РЗЭ) и трансоциирующих металлов (U, V, Mo).

Присутствие железистых минералов напрямую связано с геодинамическими особенностями бассейнов: зоны тектонической активизации, разломы и трещиноватые горизонты способствуют поступлению сульфидо- и железосодержащих флюидов, усиливая локальную минерализацию углей. В совокупности с органическим веществом углей железистые минералы формируют полигенную модель химического дифференцирования, способствующую локальному накоплению РЗЭ и других элементов-примесей.

Анализ железистых фаз в углях Центрального Казахстана позволяет не только оценить редкоземельный и металлургический потенциал, но и использовать их как геохимические индикаторы восстановительных условий, зон тектонического контроля и постседиментационной переработки угленосных толщ. Эти данные являются основой для прогнозирования

локальных аномалий РЗЭ и сопутствующих элементов в юрских угленосных формациях региона.

Пирит представлен фрамбоидальными агрегатами, отдельными зёрнами тетраэдров, октаэдров и их комбинациями, заполняющими трещины и поры угля. В отдельных случаях образуются пластинчатые агрегаты и звёздчатые структуры. Присутствие пирита свидетельствует о восстановительных условиях осадконакопления и раннего диагенеза, а также служит источником серы для формирования вторичных сульфатных минералов. В составе отдельных зёрен пирита фиксируются примеси селена и марганца, а фрамбоидальные агрегаты нередко замещаются сульфатами железа.

Пирит в образцах бассейна Майкубень представлен зёрнами размером до 2,5 мм, относительно равномерно распределёнными в угольной массе, однако в отдельных случаях он образует полосчатые скопления, согласные со слоистостью угля. Его присутствие свидетельствует о восстановительных условиях осадконакопления и раннего диагенеза. В дальнейшем пирит нередко служит источником серы для формирования вторичных сульфатных минералов в зонах гипергенеза. Является наиболее распространённым железистым минералом, встречающимся как в виде микро- и нанокристаллов, так и в тонких линзах и прожилках, пронизывающих угольные пласты. Он формируется преимущественно в восстановительных болотных и озёрно-болотных условиях за счёт взаимодействия органического вещества с сульфидами железа и сульфатами. Часто связан с повышенными концентрациями тяжелых редкоземельных элементов (HREE) и урана, что обусловлено способностью сульфидных фаз связывать металлосодержащие флюиды и фиксировать элементы в виде тонкодисперсных включений [75].

В углях месторождения Шубарколь пирит, в основном, находится в виде фрамбоэдров и отдельных зёрен (тетраэдров, октаэдров, гексаэдров и их комбинаций). Часто зёрна пирита заполняют трещины, либо по трещинам образуются пластинчатые агрегаты; был выявлен звёздчатый агрегат, сложенный пластинчатыми зёрнами пирита (марказита). В составе единичных зёрен пирита находятся примеси селена и марганца. Фрамбоэдры пирита замещаются сульфатами железа (см.рис.5.9). На поверхности образцов кристаллизуются пластинчатые, таблитчатые кристаллы и зёрна неправильной формы сульфатов железа. Сульфаты образуют землистые агрегаты с вкраплениями листоватых, пластинчатых зёрен. В углях участков 3-6 пирит встречается только в виде единичных окисленных зёрен. В аргиллите встречается как в виде крупных кристаллов миллиметровых размеров, так и в виде октаэдрических кристаллов микронной размерности.

Марказит, полиморфная форма пирита, локализуется преимущественно в диагенетически изменённых зонах угля и служит индикатором изменения окислительно-восстановительных условий после осадконакопления. Его присутствие отражает периоды коротких окислительных всплесков или изменения химического состава порового

раствора, что может сопровождаться перераспределением РЗЭ и трансиционирующих металлов (рис. 5.10).

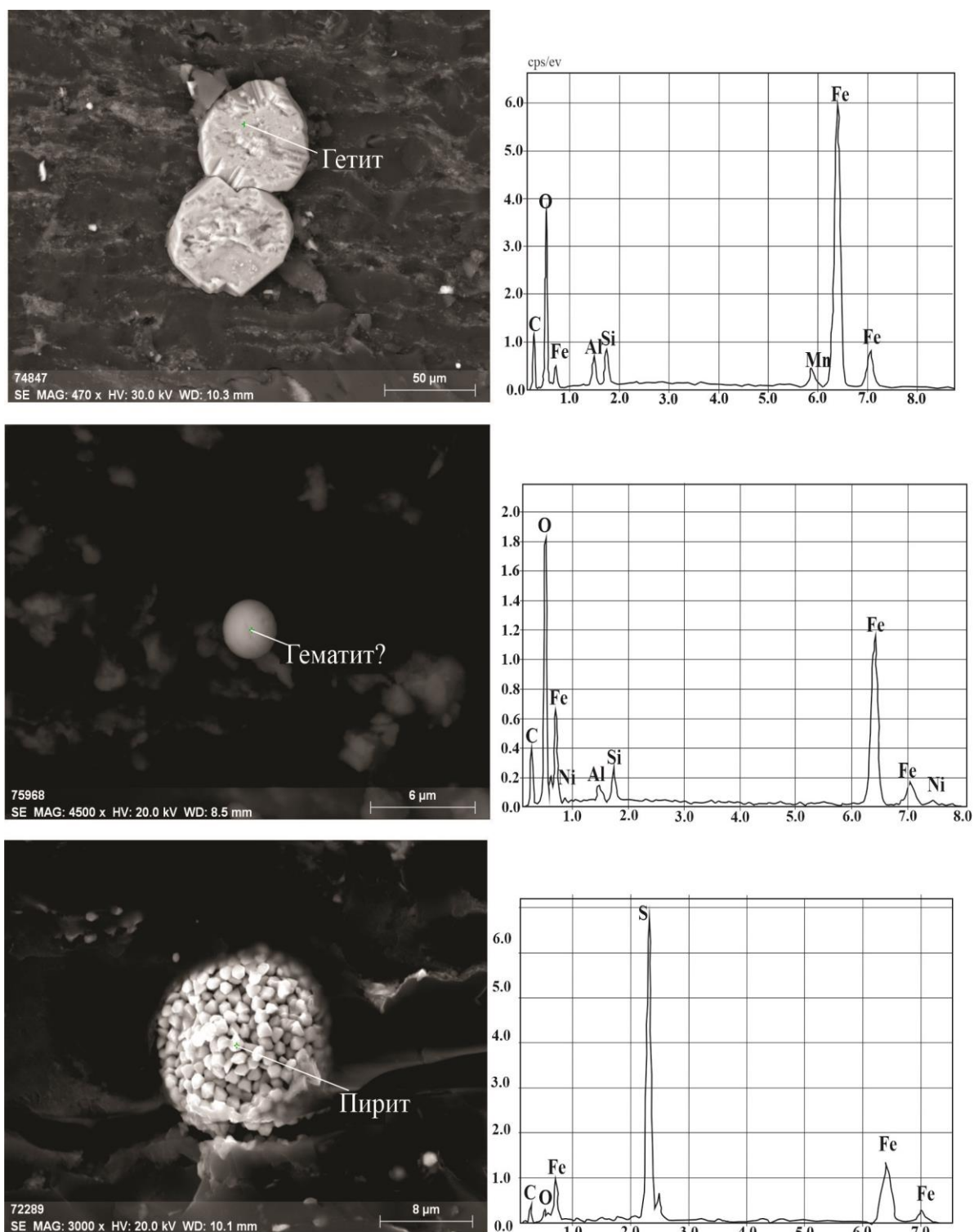


Рисунок 5.9 – Оксиды железа (вверху и в середине) и фрамбоидальный пирит (внизу) На нижнем рисунке это пирит, на верхнем – это гетит, гематит, на среднем – возможно, это космическая микросфера гетита, гематита или магнетита?

Сидерит встречается в виде аутогенных включений и линз, формирующихся при диагенезе в условиях восстановительных флюидов с повышенным содержанием растворимых Fe^{2+} и CO_3^{2-} . Сидерит может концентрировать LREE и легкие металлы, выступая вторичным минералогическим индикатором зон локального обогащения РЗЭ. Часто он связан с акцессорными фосфатными и оксидными фазами, создавая микрообъекты комплексной аккумуляции элементов.

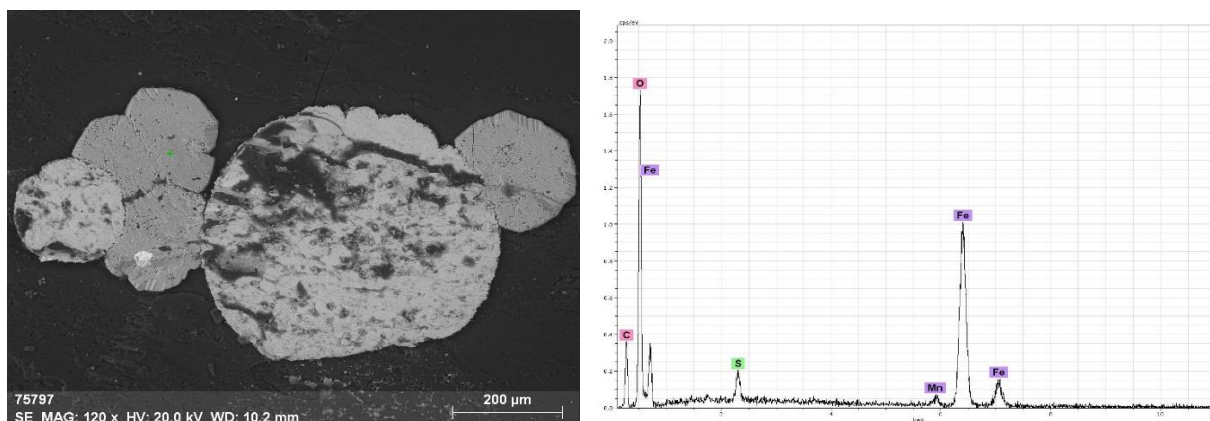


Рисунок 5.10 – Марказит

Локальное обогащение сидеритом, установленное в пробах с участков 2 и 3 месторождения Шубарколь, может отражать восстановительные условия осадконакопления и диагенеза, характерные для угленосных толщ, а также повышенную концентрацию растворённого железа в поровых водах.

Сидерит также является одним из наиболее характерных эпигенетических минералов углей Майкубенского бассейна. Он наблюдается в виде радиально-лучистых и столбчатых агрегатов, прожилков и корок, заполняющих пустоты и трещины угольной массы. Поверхность кристаллов неровная, местами отмечается слабая зональность. В центральных частях отдельных агрегатов фиксируются включения кварца, что указывает на многостадийность минералообразования и смену условий кристаллизации [75].

Гематит и *гётит* представлены плоскими, пластинчатыми и землистыми агрегатами, локализованными в трещинах и порах угля, иногда с участием марганца до 2 %. Гидрогетит встречается в виде натечных, землистых образований.

Минералы группы лёллингита в образцах месторождения Шубарколь встречаются достаточно часто, при этом отдельные зёрна хорошо раскристаллизованы. В составе минералов находятся Co, Ni, Fe и S. Пропорции Co, Ni и Fe в зёрнах отличаются, поскольку элементы могут изоморфно замещать друг друга. Содержание кобальта в отдельных зернах достигает 23 %. Встречаются минералы аналогичного состава, но вместо мышьяка присутствует сера. Сульфиды Fe-Co-Ni не диагностированы,

однако, как и в случае с минералами группы лёллингита, железо могло заместиться кобальтом и никелем.

В органическом веществе угля выявлены Fe–Si-обогащённые участки с эмпирическим составом, близким к Fe_2Si_3 , интерпретация которых как природного силицидного минерала остаётся дискуссионной. В составе природного сплава выявлена примесь Ti, V и Ni. По составу минерал похож на фердисилицит (линжиит) (рис. 5.11).

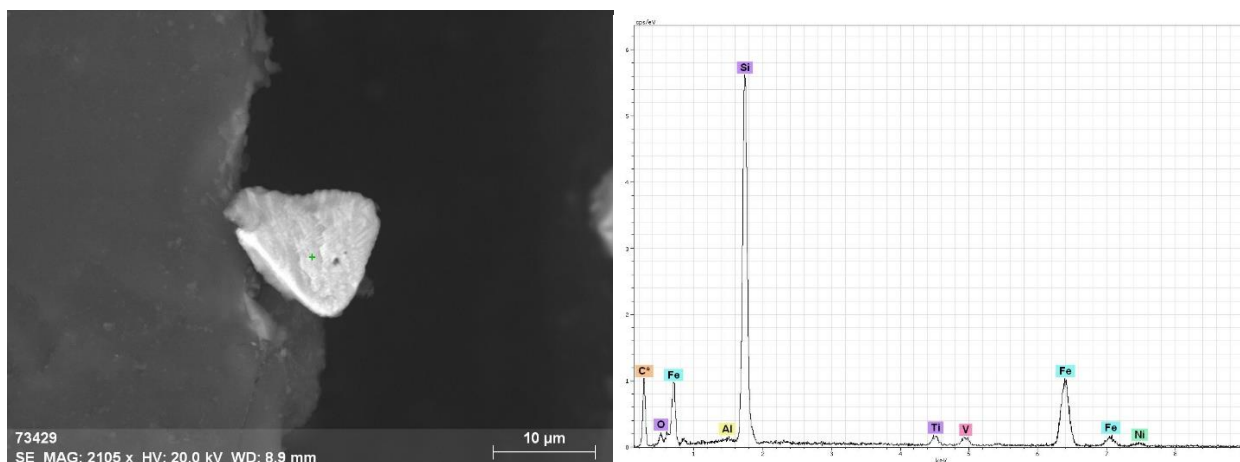


Рисунок 5.11 – Силицид железа с примесью Ti, V, и Ni (фердисилицит /линжиит)

Среди медных сульфидов также выявлен борнит, представленный чешуйчато-пластинчатым зерном, локализованным в органическом веществе угля.

Силикатные фазы представлены Ca–Fe силикатом, по химическому составу отдалённо напоминающим геденбергит. Морфологические особенности и характер залегания не позволяют однозначно диагностировать данный минерал как клинопироксен, в связи с чем он рассматривается как вторичная силикатная фаза. Кроме того, установлен землистый агрегат силиката железа, по составу близкий к фаялиту.

5.4.2. Полиметаллические сульфиды

Помимо железистых минералов, в юрских угленосных толщах Центрального Казахстана выявлены полиметаллические сульфиды, включающие соединения Cu, Pb, Zn, Mo, Ni, Co, а также редкоземельных и редкометалльных элементов (Nb, Ta, U, Th). Эти минералы, хотя и встречаются в ограниченных количествах, играют важную роль в аккумуляции и локализации элементов-примесей в углях, выступая концентрирующими фазами для редких и критических металлов.

Основной тип полиметаллической минерализации представлен в виде прожилков и микровкраплений в пиритовой матрице, а также локальных включений в угольном органическом веществе. Наиболее распространены

сфалерит (ZnS), галенит (PbS), халькопирит (CuFeS_2), ковеллин (CuS), борнит, молибденит (MoS_2) и интерметаллические соединения, включая латуни и сульфиды кадмия. Формирование этих минералов связано с позднеседиментационными и диагенетическими процессами, когда активизация разломных зон и приток гидротермальных флюидов создают условия для локальной кристаллизации сульфидов, обогащённых металлами.

В образцах углей и углевмещающих пород Шубаркольского месторождения обнаружены многочисленные включения сфалерита (рис. 5.12 а), реже – сульфиды кадмия, цинкит (рис. 5.12 б), а также латуни (рис. 5.12 в). Цинкит представлен преимущественно в виде землистых масс на поверхности углей (рис. 5.12 б).

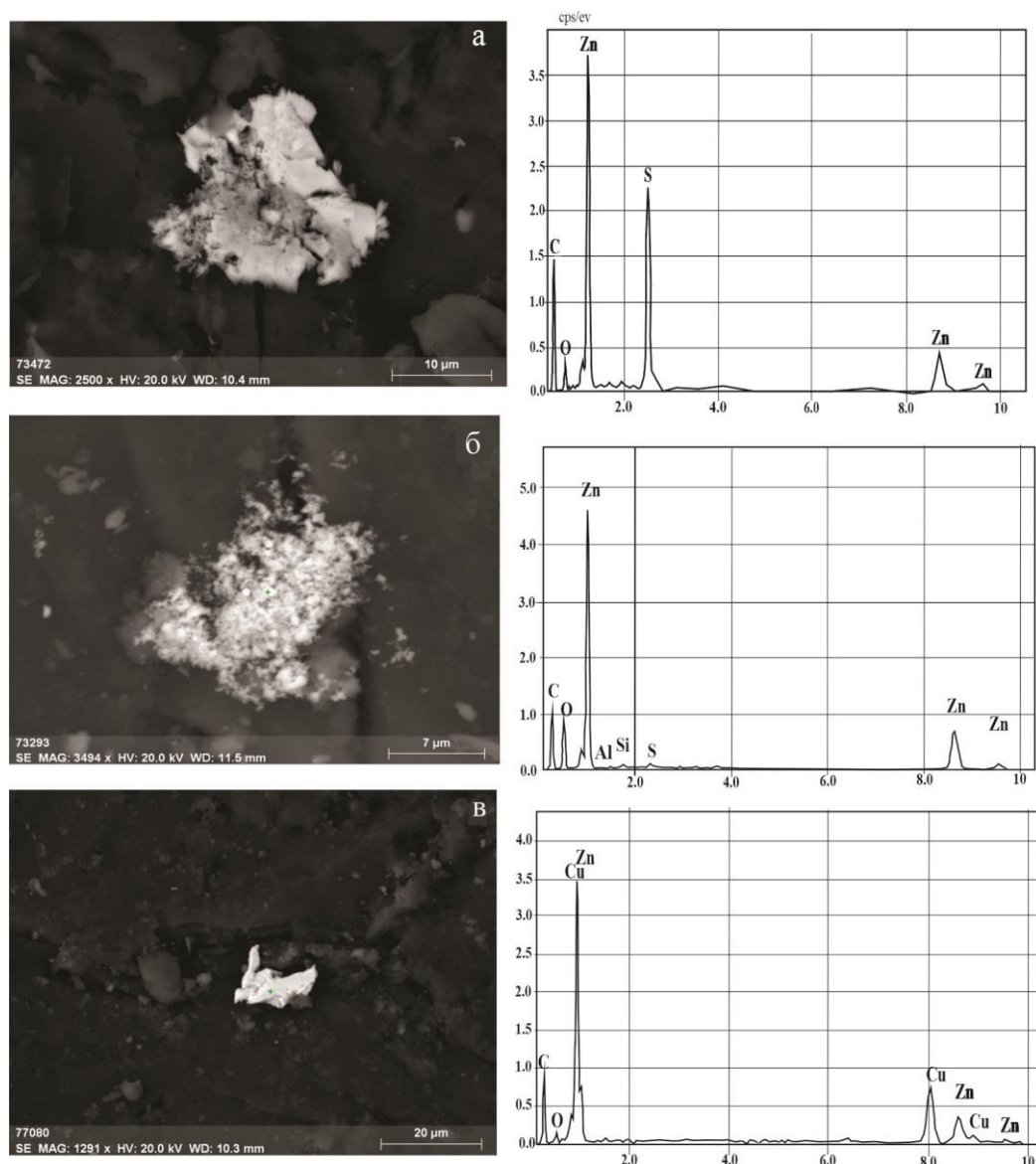


Рисунок 5.12 – а - сфалерит, б - сульфид кадмия, цинкит, в - латунь

Во многих образцах сфалерит является самым распространенным минералом после породообразующих минералов. Он представлен

корродированными зёрнами и пластинчатыми агрегатами, локализованными преимущественно в органическом веществе угля. (рис. 5.13).

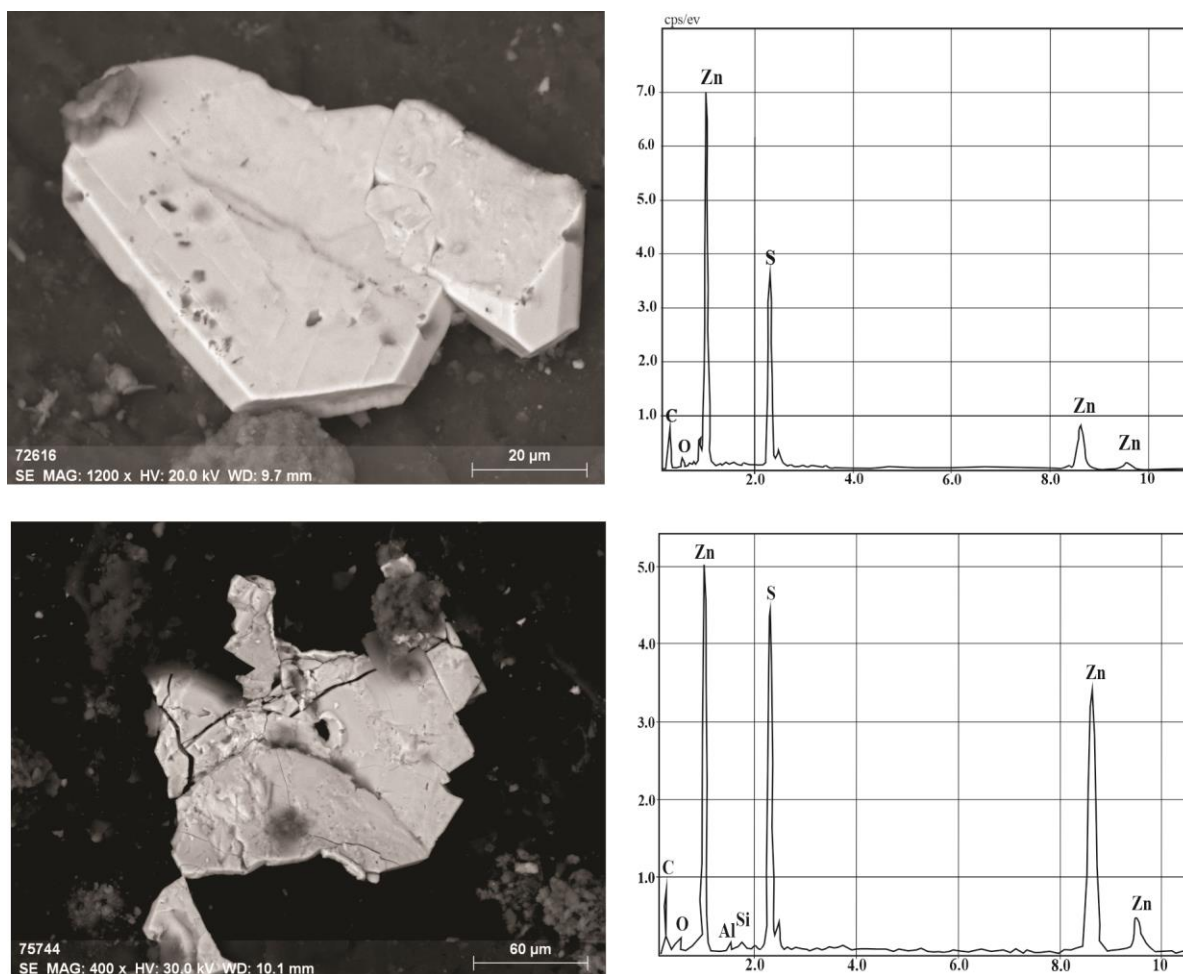


Рисунок 5.13 – Сфалерит

В составе отдельных зёрен установлена примесь кадмия, что указывает на участие гидротермальных флюидов в процессе минералообразования. В составе минерала присутствует цинк (3,5 %). Вероятно, минерал называется гринокит, поскольку одно из обнаруженных зёрен имело форму гексагональной пластинки.

Зерна сульфидов меди (халькопирит, борнит, ковеллин) представлены пластинчатыми и чешуйчато-пластинчатыми структурами.

Галенит и клаусталит образуют мелкие зёрна неправильной формы и часто ассоциируют со сфалеритом, что свидетельствует о совместном осаждении в сходных физико-химических условиях.

В образцах углей и углевмещающих пород Шубаркольского месторождения зёрна халькопирита, как правило, имеют неправильную форму и приурочены к порам и трещинам, где они ассоциируют с глинистыми минералами. В отдельных случаях отмечаются признаки окисления зёрен халькопирита.

Накопление Mo и As, вероятно, обусловлено эпигенетической гидротермальной сульфидной минерализацией. Форма минеральных включений довольно разнообразна.

Селен присутствует в сульфидной (или селенидной) форме, в самородной – в виде микроминеральных включений в пирите. Встречаются твердые растворы переменного состава с преобладанием серы (ближе к галениту) или селена (ближе к клаусталиту) (рис. 5.14 а). Форма выделений галенита и клаусталита схожа – гексагональные, уплощенные кристаллы и зёрна неправильной формы. Встречаются как одиночные зёрна, так и скопления, занимающие небольшие участки. Попадают агрегаты галенита, заполняющие трещины и поры. Выветрелые селениды образуют землистые массы, в их составе иногда встречается примесь ртути (4 %). По составу продукт окисления клаусталита соответствует молибдениту (рис. 5.14 б); продукты окисления твердых растворов не диагностированы, в них иногда содержится стронций до 4 %. Реже в образцах встречаются минеральные включения самородного селена (рис. 5.14 в), который образует уплощённые, чешуйчатые кристаллы, в которых присутствует кислород за счет окисной пленки. Пластинчатый кристалл арсената свинца, обнаруженный в угле, может быть интерпретирован как полмуритом или шультенитом.

Полиметаллические сульфиды выполняют функцию геохимических ловушек для редкоземельных элементов, особенно для легких (LREE) и средне-зарядных элементов, а также для транзиционирующих металлов. Это обусловлено их способностью адсорбировать элементы с высокими зарядом-радиусными параметрами и формировать стабильные комплексные соединения в условиях слабокислых и восстановительных сред. Включения таких минералов часто сопровождаются микрообъёмными аномалиями РЗЭ и U, что подтверждается корреляционными зависимостями между концентрациями Zn, Cu, Pb и LREE в углях Шубарколя и Майкубенья.

С точки зрения геодинамики, зоны концентрации полиметаллических сульфидов приурочены к грабеноподобным впадинам, трещиноватым контактными зонам и границам тектонических блоков, что отражает влияние постколлизии и поздней мезозойской тектонической активизации на гидродинамику бассейна. Этот фактор усиливает локальный приток металлосодержащих флюидов и способствует формированию микроанализируемых зон с повышенным содержанием как сульфидных, так и редкоземельных элементов.

Комплексное изучение полиметаллических сульфидов в углях Центрального Казахстана позволяет не только оценить их металлургический и редкометалльный потенциал, но и использовать эти минералы как прогнозные индикаторы зон РЗЭ-аккумуляции, локальных восстановительных условий и тектонической протеканности флюидов в угленосных толщах юрского возраста.

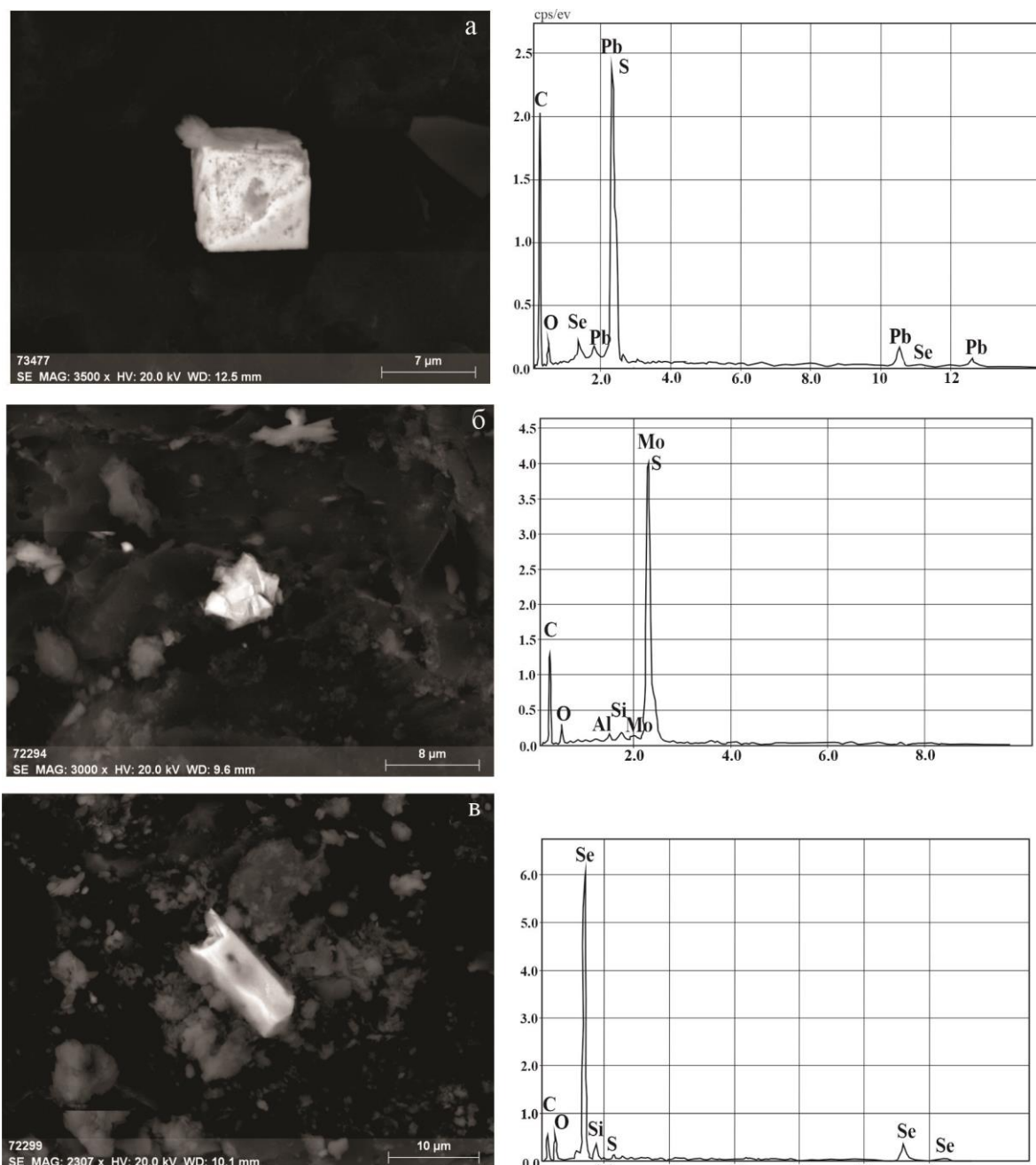


Рисунок 5.14 – а - Твердый раствор галенита-клаусталита, б-молибденит, в-самородный селен

5.4.3 Сульфаты

В юрских угленосных толщах Центрального Казахстана сульфатная минерализация представлена преимущественно гипсом ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), баритом (BaSO_4), целестином (SrSO_4) и розенином ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Эти минералы встречаются в виде отдельных кристаллов, агрегатов и тонкодисперсной фазы в матрице угля и вмещающих пород.

Минералы формируются главным образом в постседиментационный период, в условиях окислительно-восстановительных колебаний и взаимодействия угольной толщи с гидротермальными или

метасоматическими флюидами. В отличие от сульфидов, сульфаты фиксируют поздние миграции элементов, отражая стадии диагенеза и ранней эпигенетической метасоматической активности.

Сульфаты играют важную роль в геохимической трансформации углей, оказывая влияние на распределение тяжёлых металлов и редкоземельных элементов (REE). С точки зрения тектонического контекста, сульфаты приурочены к зонам локального растяжения и трещиноватости, где происходит проникновение сульфатсодержащих растворов.

Целестин и барит представлены идиоморфными и субидиоморфными кристаллами, локализованными в трещинах и порах угля. Их формирование связано с поздними эпигенетическими процессами и миграцией серосодержащих растворов. Барит и целестин способны аккумулировать элементы-примеси за счёт адсорбции и изоморфного замещения, формируя локальные микрзоны обогащения. Установлена связь барита с накоплением LREE, а также в ряде случаев U и Th, что позволяет рассматривать эти минералы как индикаторы гидродинамических и окислительно-восстановительных условий формирования угольных бассейнов.

Барит в пробах месторождения Шубарколь представлен разнообразными морфологическими типами: столбчатыми, призматическими и таблитчатыми кристаллами, а также призматическими кристаллами, расщепляющимися на пластинчатые и листоватые агрегаты. Содержание стронция в отдельных зернах достигает 22 %, что свидетельствует о развитии изоморфных замещений и широком распространении минералов барит–целестинового ряда. Для высокостронциевых кристаллов характерно развитие нановолокнистых структур на терминальных частях, а также образование самостоятельных нановолокнистых агрегатов. Кроме того, барит встречается в виде натечных образований и прожилков; единичные зерна монетчатой формы, вероятно, имеют биогенное происхождение.

По данным микроскопических исследований выявлены многочисленные включения барита (BaSO_4), представленные угловатыми зёрнами неправильной формы и пластинчатыми агрегатами (рис. 5.15). Наличие значительного количества включений барита и сфалерита коррелирует с повышенными содержаниями Ba и Zn в углях месторождения и указывает на преимущественно минеральные формы нахождения данных элементов. Обогащение этими элементами, связывается с миграцией подвижных (сорбированных) и металлорганических форм элементов в процессе отжима вод в период диагенеза [107, 108, 109, 110, 111, 33].

Кристаллы Pb-Sr-S-O состава обнаружены на выветрелом пластинчатом зерне галенит-клаусталита. Вероятно, это зёрна целестина со свинцом из подложки. Форма зёрен - короткопризматическая. Также целестин встречается в виде игольчатых кристаллов, расщепляющихся на более мелкие иголки. Скопления иголок образуют радиально-лучистые конкреции. Иголки целестина содержат 7-8 % бария.

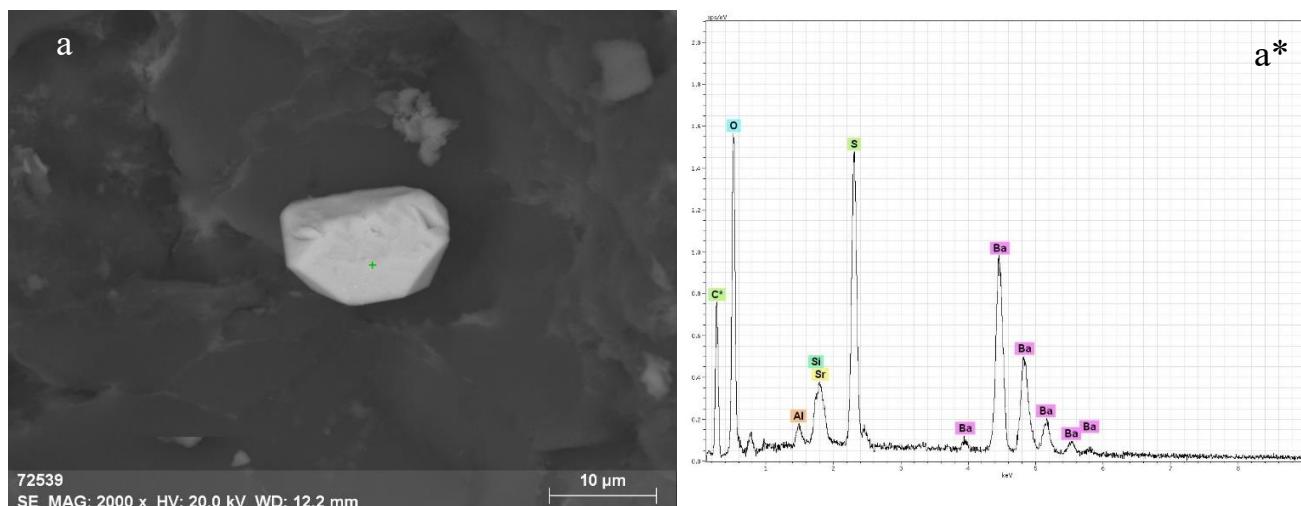


Рисунок 5.15 – Минералы элементов-примесей в пробе угля и их энергодисперсионные спектры*: а – барит

Результаты показывают, что Ba и Sr в основном связаны с карбонатными и фосфатными минералами. Главным образом он обнаружен в составе сульфатов стронция (предположительно целестин) (рис. 5.16) и оксидов железа. Также, возможно, что повышенные содержания Sr и Ba на месторождении Шубарколь связаны с апатитовой минерализацией, которая происходит из кор выветривания пород фундамента в районе источника отложений.

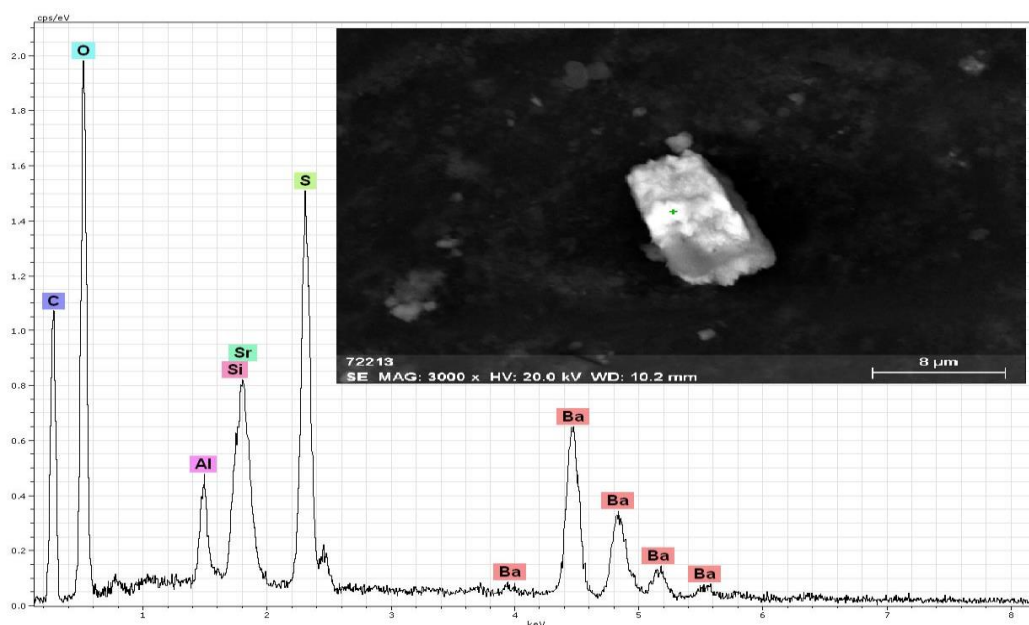


Рисунок 5.16 – Частицы целестина SrSO_4 с включениями Ba

Гипс широко распространён в углях Майкубенского бассейна, где он приурочен к зонам окисления. Минерал образует столбчатые, шестоватые,

игольчатые и волокнистые агрегаты длиной до 0,5 см, заполняющие трещины и пустоты угольной массы. Волокна ориентированы поперёк трещин, что указывает на кристаллизацию из растворов, циркулировавших по системе вторичной трещиноватости.

Образование гипса связано с окислением пирита и последующим взаимодействием сернокислых растворов с кальцийсодержащими компонентами угля и вмещающих пород. В ряде случаев гипс покрывает органическое вещество угля тонкими пластинчатыми кристаллами.

В целом выявленная ассоциация сульфидных, силикатных и сульфатных минералов отражает сложный многостадийный характер вторичного минералообразования в угленосной толще Шубаркольского месторождения и бассейна Майкубень, обусловленный взаимодействием органического вещества, флюидов и изменяющихся окислительно-восстановительных условий.

Минеральный состав углей и углевмещающих пород региона характеризуется развитием алюмосиликатных, сульфидных, сульфатных и акцессорных минеральных фаз. Установленные особенности минералообразования отражают сложные условия осадконакопления и последующих постседиментационных преобразований, а также определяют формы нахождения и механизмы аккумуляции элементов-примесей и редкоземельных элементов.

5.5 Самородные элементы

В углях Центрального Казахстана зафиксированы самородные элементы, включая золото, медь, селен и никель, а также соединения свинца и ряд интерметаллических и сульфидо-металлических фаз (Cu–Sn, Fe–Co–Ni). Указанные образования встречаются преимущественно в органическом веществе углей и в зонах его контакта с минеральной матрицей, что указывает на их формирование в восстановительных условиях на ранних стадиях диагенеза либо в ходе последующих постседиментационных преобразований.

Самородные элементы фиксируются в виде уплощённых или чешуйчатых кристаллов (например, самородный селен и медь), а также включений в минеральной матрице угля. Их распределение в угольных пластах носит локальный характер и приурочено к зонам повышенной концентрации органического вещества, трещиноватым участкам и контактам с углевмещающими породами. Присутствие самородных металлов указывает на миграцию элементов в восстановительных условиях и их аккумуляцию в составе органо-минеральных комплексов на ранних стадиях диагенеза.

Формирование самородных элементов (Селен) отражает восстановительную геохимическую обстановку и специфический состав минералообразующих флюидов. Фиксируемое присутствие кислорода в составе кристаллов интерпретируется как результат развития поверхностной

окисной плёнки и/или наложения сигнала матрицы при микроаналитических исследованиях.

5.6 Генетическая интерпретация минералообразования

Совокупность выявленных минеральных фаз, а также их текстурно-структурные и морфологические особенности свидетельствуют о многостадийном характере минералообразования в углях Центрального Казахстана. Формирование минерального состава происходило в результате наложения диагенетических, эпигенетических и, локально, гидротермальных процессов при активном участии флюидных потоков, приуроченных преимущественно к тектонически нарушенным зонам.

Юрские угли Шубаркольского месторождения и Майкубеньского угольного бассейна (включая участки Сарыколь и Талдыколь) формировались в пределах крупного внутриконтинентального палеобассейна, в котором чередовались аллювиально-дельтовые и болотные обстановки осадконакопления. Геодинамическая изолированность бассейна, неоднородность источников терригенного материала, а также различная интенсивность диагенетических и эпигенетических преобразований обусловили специфику минерального состава углей и пространственную дифференциацию микроэлементного распределения, включая редкоземельные элементы (РЗЭ).

Минеральный состав углей представлен сочетанием терригенных компонентов, унаследованных из вмещающих пород и вулканогенного материала, и аутигенных минералов, сформировавшихся в процессе диагенеза и последующих постседиментационных преобразований. К основным минеральным фазам, контролирующим аккумуляцию элементов-примесей в углях, относятся:

- глинистые минералы, играющие ведущую роль в сорбции REE, Li, Ge и V;
- пирит, являющийся основным концентратором элементов сидерофильной и халькофильной групп;
- циркон и монацит, выступающие устойчивыми носителями Zr, Hf и лёгких редкоземельных элементов;
- гидроксиды железа и титана, служащие эффективными центрами сорбции HREE, U и Th.

Таким образом, минеральный состав углей оказывает определяющее влияние на их геохимический облик и формирование пространственных различий между угленосными районами Шубаркольского месторождения и Майкубеньского бассейна, отражая специфику условий осадконакопления и последующих постседиментационных процессов.

Шубаркольское месторождение.

Минеральный состав:

- Преобладание кварца и каолинита отражает высокую степень зрелости терригенного материала и интенсивные процессы химического выветривания в областях питания осадочного бассейна.

- Присутствие мусковита и анатаза указывает на участие источников метаморфических и магматических пород в формировании терригенного материала.

- Низкие содержания полевых шпатов обусловлены их разрушением в процессе интенсивного выветривания и последующей переработки осадочного материала.

- Второстепенные и акцессорные минералы (палыгорскит, ярозит, барит, гипс, розенит, пирит, сфалерит, флогопит, гематит, сидерит) формировались в условиях локальной геохимической неоднородности, связанной с изменениями окислительно-восстановительной обстановки и флюидной активизацией.

Минеральные формы нахождения элементов-примесей и РЗЭ:

- Барит (BaSO_4) и сфалерит (ZnS) представлены преимущественно в минеральной форме, что соответствует высоким содержаниям Ba и Zn в углях месторождения.

- Циркон и бадделеит, а также единичные кремнистые аутигенные фазы, содержат включения Sc, Ti, Y и тяжёлых редкоземельных элементов, отражая их устойчивую минералогическую фиксацию.

- Редкоземельные элементы представлены фосфатными, алюмофосфатными и карбонатными фазами, формирование которых связано с процессами диагенетического и эпигенетического минералообразования.

- Морфология РЗЭ-содержащих минералов (пластинчатые, листоватые и шестоватые кристаллы) указывает на их преимущественно аутигенное происхождение и тесную связь с органическим веществом углей и диагенетическими процессами.

Особенности по участкам (см. рис. 2.2 во главе 2):

- Участок 1 характеризуется наибольшим разнообразием минеральных фаз, что свидетельствует о сложной и многостадийной постседиментационной истории.

- Участки 2–3 отличаются локальным обогащением сидеритом и мусковитом, отражающим восстановительные условия минералообразования и относительную близость источников метаморфического материала.

- Участки 4–6 характеризуются преобладанием кварца, глинистых минералов и эпигенетических сульфидных фаз.

Майкубенский угольный бассейн.

Минеральный состав:

- Минеральный состав углей определяется преобладанием глинистых и кремнистых минералов, а также карбонатных и сульфидных фаз (пирит, сидерит); кварц встречается редко и представлен микроскопическими зёрнами.

- Монацит, циркон и бадделеит имеют преимущественно кластогенное происхождение с возможным участием гидротермального привноса.

- Сидерит образует радиально-лучистые агрегаты и столбчатые зерна, часто формирующиеся вокруг кварцевых ядер, что отражает условия восстановительного диагенеза.

- Кальцит приурочен главным образом к аргиллитовым прослоям и играет подчинённую роль в минеральном составе углей.

- Пирит представлен зернами размером до 2,5 мм, местами образующими полосчатые скопления, что указывает на пульсирующий характер восстановительных условий.

- Глинистое вещество встречается в виде прозрачных или беловатых включений размером 1–5 мкм и является важным аккумулятором редкоземельных элементов.

- Гипс образует игольчатые и волокнистые агрегаты и рассматривается как индикатор поздних постседиментационных окислительных преобразований.

Формы нахождения РЗЭ:

- Редкоземельные элементы фиксируются как в минеральной, так и в органической матрице углей.

- РЗЭ распределяются между битумами, гуминовыми веществами и нерастворимым остатком, что отражает их участие в процессах диагенеза и углефикации на различных стадиях.

- Тип распределения РЗЭ в углях Сарыкольского и Талдыкольского участков является сходным, несмотря на различия в зольности и суммарных содержаниях элементов.

Выводы

Проведённые минералогические исследования позволили установить основные формы нахождения элементов-примесей и редкоземельных элементов в углях и углевмещающих породах Центрального Казахстана. Выявленные минеральные фазы, их морфологические и текстурно-структурные особенности свидетельствуют о многостадийном характере минералообразования с участием диагенетических, эпигенетических и, локально, гидротермальных процессов.

Минералогический состав углей и углевмещающих пород Центрального Казахстана характеризуется развитием алюмосиликатных, сульфидных, сульфатных и акцессорных минеральных фаз. Выявленные особенности минералообразования отражают сложные условия осадконакопления и последующих преобразований, а также определяют формы нахождения и механизмы аккумуляции элементов-примесей и редкоземельных элементов.

Минеральный состав углей Шубаркольского месторождения отличается выраженной многостадийностью формирования и включает сингенетические, диагенетические и эпигенетические минералы. Основная концентрация элементов-примесей и редкоземельных элементов приурочена к диагенетическим и эпигенетическим фазам, локализованным в

органическом веществе углей и зонах его контакта с минеральной матрицей, что подчёркивает ведущую роль постседиментационных процессов в перераспределении микроэлементов.

Для углей Майкубенского бассейна характерна пространственная и генетическая дифференциация минеральных фаз, отражающая неоднородность условий диагенеза. Совокупность выявленных минералов и их текстурно-структурные особенности формируют основу для прогноза геохимической специализации углей бассейна, включая накопление железа, серы и ассоциированных с ними микро- и редкоземельных элементов.

Полученные минералогические данные послужили основой для выявления закономерностей распределения элементов-примесей, оценки роли различных источников вещества и механизмов их аккумуляции. В следующей главе данные вопросы рассматриваются на основе результатов геохимического анализа с применением корреляционных, кластерных и пространственных методов.

Для выявления закономерностей распределения элементов-примесей, оценки роли различных источников вещества и механизмов их аккумуляции в углях в следующей главе рассматриваются геохимические данные, основанные на корреляционном, кластерном и пространственном анализе.

ГЛАВА 6 ПОИСКОВЫЕ КРИТЕРИИ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ-ПРИМЕСЕЙ В УГЛЕНОСНЫХ ФОРМАЦИЯХ МЕЗОЗОЯ ЦЕНТРАЛЬНОГО КАЗАХСТАНА

6.1 Методологические основы формирования поисковых критериев

Разработанные поисковые критерии по накоплению элементов-примесей в угленосных формациях мезозоя Центрального Казахстана основана на принципах системного и многофакторного анализа, предполагающего комплексный учёт геодинамических, литолого-фациальных, геохимических и минералогических условий формирования угленосных бассейнов. Методологический подход исследования базируется на последовательном переходе от анализа региональных геодинамических предпосылок к выявлению конкретных геохимических и минералогическо-геохимических признаков накопления элементов-примесей в углях.

В качестве исходной методической позиции принято положение о том, что концентрация элементов-примесей, а также редкоземельных элементов в углях является результатом взаимодействия нескольких процессов: поступления вещества в осадочный бассейн, его перераспределения в ходе осадконакопления и диагенеза, а также последующих эпигенетических преобразований, контролируемых тектоническими и гидрогеологическими условиями. В этой связи поисковые критерии рассматриваются не как изолированные показатели, а как система взаимосвязанных индикаторов, отражающих генетические условия формирования угленосных формаций.

Методика формирования поисковых критериев включала:

1. реконструкцию геодинамической обстановки мезозоя Центрального Казахстана и выявление структурных факторов, контролирующих размещение угленосных бассейнов;
2. анализ литолого-фациальных условий угленакопления и их роли в концентрации элементов-примесей;
3. статистическую обработку геохимических данных (расчёт коэффициентов корреляции, анализ элементных ассоциаций, сопоставление спектров распределения редкоземельных элементов);
4. минералогическое изучение углей и углевмещающих пород с целью установления форм нахождения элементов-примесей;
5. интеграцию полученных данных и их интерпретацию в рамках единой генетической модели.

При формировании геохимических поисковых критериев использовались как абсолютные показатели (концентрации элементов-примесей), так и относительные параметры и индикаторные соотношения, позволяющие снизить влияние литологической неоднородности и зольности углей. Особое внимание уделялось выявлению устойчивых корреляционных связей и ассоциативных групп элементов, отражающих вклад вулканогенного и терригенного материала.

Разработанные поисковые критерии прошли апробацию на материалах месторождения Шубарколь и Майкубенского угольного бассейна, что позволило выявить как универсальные признаки, характерные для угленосных формаций мезозоя Центрального Казахстана в целом, так и локальные особенности, обусловленные различиями геодинамических и литолого-фациальных условий. Такой подход обеспечивает обоснованность и воспроизводимость предложенной системы критериев и определяет возможности её применения для поисковой оценки аналогичных объектов.

Разработанные прогнозные критерии прошли апробацию путём их применения к фактическим геохимическим и минералогическим данным углей месторождения Шубарколь и Майкубенского угольного бассейна, включая независимые выборки проб и различные стратиграфические уровни угленосных толщ. Полученные результаты свидетельствуют о том, что выявленные геодинамические, геохимические и минералого-геохимические критерии повторяются при анализе различных разрезов и пластов угленосных толщ и позволяют надёжно выявлять условия, благоприятные для повышенного накопления элементов-примесей.

6.2 Геодинамические поисковые критерии

Геодинамические критерии являются важным инструментом прогнозирования угленосных бассейнов и зон концентрации элементов-примесей. Они отражают общие закономерности формирования осадочных толщ и условия, при которых возможен приток глубинного вещества и его вовлечение в углеобразующие процессы.

К основным геодинамическим поисковым критериям относятся:

1. Формирование угленосных формаций в пределах внутриконтинентальных прогибов и зон растяжения, активизированных в юрский период.

Такие структуры создают условия для аккумуляции органического вещества, обеспечивая достаточную толщ осадков и относительно стабильные бассейновые условия. Как правило их отличительными признаками являются: наличие синеклиналей и субширотных прогибов, различимая тектоническая куполообразность, уменьшение мощности осадков на периферии бассейна. Зоны растяжения способствуют притоку терригенного и вулканогенного материала, увеличивая минеральное разнообразие углей и потенциал накопления редкоземельных элементов.

2. Приуроченность угленосных бассейнов к зонам разломов и тектонических нарушений, которые повышают проницаемость земной коры.

Разломные системы создают каналы для миграции флюидов и магматических растворов, насыщающих уголь элементами-примесями. Их отличительными признаками являются линейные и зональные структурные элементы, смещения осадочных толщ, наличие гидротермальных жил и прожилков. Усиленная тектоника увеличивает динамику седиментации и

способствует формированию зон с аномальными концентрациями минералов.

3. Пространственная связь угленосных толщ с областями развития магматических и вулканоплутонических комплексов.

Магматическая активность способствует поступлению в бассейн экзогенных элементов, включая РЗЭ. К признакам таких зон относятся близость к щелочным гранитам, диоритам, риолитовым лавовым потокам и пирокластическим образованиям. Магматический материал является источником редкоземельных и вспомогательных элементов, которые фиксируются в органических и минеральных компонентах угля.

4. Признаки поступления вулканогенного и терригенного материала в осадочные бассейны.

Осадочный материал вулканического и терригенного происхождения создаёт каталитические и структурные условия для накопления элементов-примесей. Признаками таких зон является присутствие вулканического пепла, туфов, минералов пироксеновой, амфиболовой и биотитовой ассоциации; повышенные содержания мелкозёрненных фракций, обогащённых редкоземельными элементами. Поступление экзогенного материала усиливает химическое разнообразие углей и может указывать на локальные аномалии концентрации элементов.

5. Наличие зон взаимодействия осадочных бассейнов с дегазационными и гидротермальными системами (дополнение).

В этих зонах возможна вторичная концентрация редкоземельных элементов и урана, формирующая локальные аномалии в угольных толщинах. Их признаки: метасоматические изменения пород, прожилково-жильная структура минералов, локальные изменения окраски угля. Активные дегазационные пути могут служить дополнительным источником примесей и формировать целевые участки для поисковых работ.

6. Комбинированная оценка геодинамических факторов.

Сочетание прогибов, зон разломов, магматических комплексов и поступления вулканогенного материала определяет наиболее перспективные территории для геохимического исследования углей.

Методологический аспект: интеграция геологических, геофизических и геохимических данных позволяет создавать картографические модели прогноза, выявляя зоны повышенной концентрации элементов-примесей.

Геодинамические поисковые критерии позволяют выявить территории, где процессы углеобразования сопровождаются активным вовлечением глубинного вещества, поступлением магматического и вулканогенного материала, а также формированием локальных аномалий элементов-примесей. Их использование является необходимым этапом при планировании геохимических и поисковых работ.

6.3 Геохимические поисковые критерии

Геохимические поисковые критерии основаны на закономерностях

распределения элементов-примесей, выявленных в углях месторождения Шубарколь и Майкубенского угольного бассейна. Они отражают процессы поступления, миграции и концентрации элементов в осадочных толщах и позволяют выделять участки повышенной геохимической перспективности.

1. Повышенные содержания редкоземельных элементов. В углях месторождений отмечаются концентрации РЗЭ и урана выше фоновых значений. Такие участки указывают на локальное накопление элементов-примесей и могут служить индикатором зон с повышенной минерализацией.

2. Дифференцированные спектры распределения редкоземельных элементов с преобладанием лёгких РЗЭ. Наблюдаются закономерности, при которых лёгкие редкоземельные элементы (La, Ce, Nd) доминируют над тяжёлыми. Это отражает особенности источников материала, условий седиментации и процессов диагенеза, способствующих селективному концентрированию элементов в угле.

3. Наличие аномалий Ce и Eu. Аномалии Ce и Eu позволяют выявлять геохимические процессы, происходившие в бассейне во время осадконакопления и диагенетических преобразований. Например, положительные или отрицательные аномалии Ce указывают на восстановительные или окислительные условия формирования угля, а Eu-аномалии отражают влияние магматического материала и гидротермальных потоков.

4. Устойчивые корреляционные связи РЗЭ с Ti, Zr, P, Sr и Ba. Выявленные корреляции свидетельствуют о значительной роли минеральной составляющей в накоплении редкоземельных элементов. Эти элементы ассоциированы с терригенным и вулканогенным материалом, что позволяет использовать их совместное распределение для выделения перспективных геохимических зон.

5. Значения геохимических индикаторов (Zr/TiO_2 , Nb/Y). Геохимические индексы указывают на поступление вулканогенного материала в угленосные толщи. Высокие значения Zr/TiO_2 и Nb/Y отражают примеси магматического происхождения и помогают различать угли, обогащённые элементами-примесями, от фоновых чистых.

Совокупность этих признаков позволяет использовать геохимические параметры углей как информативные индикаторы поискового значения. Применение этих критериев обеспечивает выделение локальных аномалий и зон повышенной концентрации элементов-примесей, что является основой для эффективного планирования геохимических и поисковых работ.

6.4 Минералого-геохимические и литолого-фациальные поисковые критерии

Минералого-геохимические и литолого-фациальные признаки позволяют выделять участки с повышенным потенциалом концентрации элементов-примесей и определять факторы их формирования.

Минералого-геохимические критерии включают:

- присутствие в углях и зольных остатках минералов-концентраторов редкоземельных элементов (фосфаты РЗЭ, циркон, ксенотим, анатаз);
- ассоциацию элементов-примесей с глинистыми минералами и тонкодисперсной минеральной фазой;
- сочетание органических и минеральных форм нахождения элементов-примесей;
- признаки эпигенетического перераспределения урана в зонах тектонических нарушений.

Литолого-фациальные критерии характеризуются:

- чередованием угольных пластов с глинистыми и тонштейновыми прослоями;
- развитием аргиллитов и алевролитов, выполняющих роль геохимических барьеров;
- условиями болотного и озёрно-болотного осадконакопления, благоприятными для сорбции и фиксации элементов.

Совокупность минералого-геохимических и литолого-фациальных признаков позволяет выделять перспективные участки для геохимических и поисковых работ и использовать угли как информативные индикаторы локальных аномалий элементов-примесей.

6.5 Поисковые критерии накопления элементов-примесей

На основе обобщения результатов геодинамических, геохимических, минералогических и литолого-фациальных исследований разработана система поисковых критериев накопления элементов-примесей в угленосных формациях мезозоя Центрального Казахстана, представленная в табл. 6.1.

Таблица 6.1 – Геологические признаки и условия накопления элементов-примесей в угленосных формациях мезозоя Центрального Казахстана

Критерий	Наблюдаемый признак	Геологическая интерпретация	Объект	Примечание
Геодинамический	Приуроченность угленосных толщ к зонам мезозойской тектонической активизации	Формирование бассейнов в условиях повышенной проницаемости литосферы и активизации глубинных флюидных потоков	Шубарколь, Майкубень	Признак выражен неравномерно по площади бассейнов
Геодинамический	Пространственная связь угленосных отложений с гранитоидными и вулканоплутоническими	Возможный источник поступления редких и редкоземельных элементов	Преимущественно Шубарколь	Для Майкубенья связь выражена слабо

	комплексами			
Геодинамический	Пирокластические прослои в разрезах угленосных толщ	Прямое участие вулканогенного материала в формировании минеральной части углей	Шубарколь	Отмечены не во всех разрезах
Геохимический	Повышенные содержания элементов-примесей относительно фоновых значений углей	Накопление элементов за счёт внешнего поступления вещества (вулканогенного и гидротермального)	Шубарколь, локально Майкубень	Контролируется зольностью и литологическим составом
Геохимический	Дифференцированные спектры распределения РЗЭ	Отражение специфики условий осадконакопления и раннего диагенеза	Шубарколь, Майкубень	На периферии бассейнов выражены слабее
Геохимический	Преобладание тяжелых РЗЭ с аномалиями Ce и Eu	Формирование геохимических особенностей в восстановительной среде при участии вулканогенного материала	Шубарколь, Майкубень	Аномалии варьируют по мощности пластов
Минералогический	Наличие циркона, монацита и ксенотима в золе углей	Минеральная фиксация редких и редкоземельных элементов	Шубарколь	Минералы установлены эпизодически
Минералогический	Ассоциация элементов-примесей с глинистыми минералами и тонкодисперсной фракцией	Сорбционное накопление элементов в процессе диагенеза	Майкубень	Связь усиливается при повышенной зольности
Минералогический	Эпигенетическое перераспределение урана в зонах тектонических нарушений	Поздняя миграция и локальная концентрация урана	Майкубень	Не сопровождается устойчивым обогащением РЗЭ
Обобщающий	Совпадение геодинамических, геохимических и минералогических признаков	Повышенная вероятность концентрации элементов-примесей в угленосных формациях	Аналоги Шубаркольского типа	Признаки проявляются комплексно не во всех бассейнах

Особенности проявления поисковых критериев в пределах месторождения Шубарколь и Майкубеньского угольного бассейна. Месторождение Шубарколь характеризуется более выраженным влиянием геодинамических факторов, повышенной минералогической неоднородностью и наличием признаков вулканогенного источника

вещества, что обуславливает его повышенную перспективность на редкоземельную специализацию. Майкубенский угольный бассейн формировался в более стабильных геодинамических условиях, что определило преимущественно фоновый характер распределения элементов-примесей и их связь с литолого-фациальными условиями и минеральной матрицей углей. Установленные различия подчёркивают ведущую роль геодинамического фактора в формировании редкометалльной специализации угленосных формаций.

6.6 Применимость разработанных критериев

Разработанная система поисковых признаков может применяться для комплексной оценки перспектив аналогичных угленосных структур мезозоя Центрального Казахстана. Геодинамические, геохимические, минералогическо-геохимические и литолого-фациальные критерии позволяют выделять территории с наибольшим потенциалом накопления элементов-примесей и формируют основу для прогнозирования локальных аномалий.

Использование этих критериев обеспечивает:

- Оценку перспективности угленосных бассейнов на ранних стадиях исследований, что позволяет оптимизировать планирование геохимических и минералогических работ;
- Выявление зон повышенной концентрации элементов-примесей, включая редкоземельные элементы и уран, на основе комплексного анализа минералогических и геохимических показателей;
- Интеграцию различных типов данных, в частности геодинамических, литолого-фациальных и геохимических для построения карт прогнозных зон и разработки стратегий поисково-оценочных исследований;
- Обоснование направлений дальнейших исследований, включая детальное изучение магматического и вулканогенного материала, а также анализа эпигенетических и гидротермальных процессов, влияющих на перераспределение элементов.

Применение разработанных критериев позволяет формировать научно обоснованные рекомендации для поисково-оценочных работ, минимизировать затраты и повысить эффективность изучения угленосных бассейнов. Кроме того, эти признаки могут использоваться для прогнозирования геохимического состава углей в перспективных бассейнах и для выявления новых локальных аномалий, что открывает возможности для дальнейших фундаментальных и прикладных исследований в области угольной геохимии и минералогии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненное исследование позволило установить закономерности формирования и распределения элементов-примесей, а также редкоземельных элементов в юрских углях Центрального Казахстана на основе комплексного анализа геодинамических, литолого-фациальных, минералогических и геохимических факторов.

Установлено, что решающую роль в концентрации элементов-примесей играет юрский этап геодинамической эволюции региона, в ходе которого формировались внутриконтинентальные прогибы растяжения, контролировавшие условия углеобразования, состав поступающего вещества и последующие постседиментационные преобразования.

Установлено, что накопление элементов-примесей в углях определяется не локальными литологическими особенностями, а сочетанием геодинамической активизации, фациальных условий осадконакопления и роли органического вещества и глинистой матрицы как геохимических барьеров.

Геохимические параметры распределения РЗЭ, включая тип распределения REE, соотношения LREE/HREE, аномалии Ce и Eu, а также индикаторные отношения Zr/TiO_2 и Nb/Y , доказали свою информативность для реконструкции источников вещества и условий формирования угленосных толщ.

На примере Шубаркольского месторождения показано, что повышенные содержания редкоземельных элементов и урана связаны с развитием фосфатно-редкоземельной ассоциации, представленной апатитом, монацитом и фосфоритовыми образованиями, при активном участии органического вещества и глинистых пород.

Минералогическая сложность углей и широкое развитие аутигенных фаз отражают влияние глубинных источников вещества, обусловленных мезозойской тектонической активизацией региона. При этом гидротермальная сульфидно-селенидная минерализация имеет эпигенетический характер и не является определяющим фактором первичного накопления РЗЭ в углях.

Сопоставление с Майкубенским угольным бассейном показало, что в условиях более стабильной геодинамической обстановки и слабого развития аутигенных фаз редкоземельные элементы преимущественно связаны с минеральной матрицей углей и формируют фоновые либо локальные аномалии.

Контрастность геохимических характеристик углей Шубаркольского месторождения и Майкубенского бассейна подтверждает ключевую роль геодинамического фактора в формировании РЗЭ- и U-специализации угленосных формаций.

В результате исследования разработана система геодинамических, минералогических, геохимических и литолого-фациальных критериев,

образующих надёжную научно обоснованную основу для прогноза угольных месторождений с повышенными содержаниями редкоземельных элементов.

Предложенный алгоритм их применения обеспечивает переход от региональной геодинамической оценки к локализации перспективных участков и подтверждает возможность целенаправленного прогнозирования угольных объектов, перспективных на редкоземельное и сопутствующее микроэлементное сырьё в пределах Центрального Казахстана и сопредельных территорий.

Основные выводы и результаты диссертации:

В процессе обобщения обширного фактического материала и его тщательного анализа получено множество выводов различного уровня и значимости. В автореферат вынесены наиболее важные выводы:

1. Анализ отечественных и зарубежных исследований показал, что угленосные бассейны Центрального Казахстана, включая Майкубенский бассейн и Шубаркольское месторождение, отличаются высокой степенью стратиграфической и структурно-геологической изученности, сформированной в результате многолетних региональных и детальных геолого-разведочных работ. В ранее выполненных исследованиях установлены литолого-фациальные особенности угленосных толщ и выявлены общие закономерности их формирования в мезозойских внутриконтинентальных впадинах, унаследовавших палеозойские тектонические структуры Центрально-Азиатского складчатого пояса.

2. Показано, что большинство существующих моделей угленакопления ориентировано преимущественно на стратиграфо-тектонический и литолого-фациальный анализ, что соответствует уровню задач и методических возможностей времени их создания. При этом геодинамические факторы и их взаимосвязь с геохимическими характеристиками углей, как правило, рассматривались фрагментарно и не получали комплексного обоснования. Ранние геохимические исследования базировались преимущественно на полуколичественных аналитических методах, что ограничивало возможности детальной интерпретации масштабов и генетической природы обогащения углей редкими, редкоземельными и критически важными элементами.

3. Современные количественные исследования, выполненные с применением методов ICP-MS, INAA и SEM-EDS, подтвердили наличие повышенных концентраций REE, Ge, Sc и сопутствующих элементов в углях Шубаркольского месторождения и Майкубенского бассейна. Вместе с тем полученные данные носят локальный характер и в большинстве случаев анализируются вне единого стратиграфо-геодинамического и палеогеографического контекста.

4. Актуальной научной задачей остается развитие комплексного подхода, предусматривающего сопоставление геохимических закономерностей углей с литолого-фациальной зональностью, источниками терригенного и вулканогенного материала, а также этапами тектонической

эволюции угленосных бассейнов. Требуется дальнейшего изучения роль органической и минеральной составляющих углей в концентрации редкоземельных и других критически важных элементов и их связь с условиями седиментации, редокс-обстановкой и постседиментационными преобразованиями. Установлено, что формирование мезозойских угленосных формаций Центрального Казахстана происходило в условиях посторогенной эволюции региона и контролировалось унаследованным разломно-блоковым каркасом Центрально-Азиатского складчатого пояса, реактивированным в мезозое. Тектонические процессы определяли геометрию осадочных впадин, режим субсиденции и пространственное размещение угленосных бассейнов.

5. Установлено, что Шубаркольский и Майкубенский угленосные бассейны формировались преимущественно в грабеноподобных внутриконтинентальных впадинах в условиях длительного тектоно-седиментологического развития посторогенной мезозойской плиты, что способствовало накоплению мощных юрских угленосных толщ.

6. Определено, что пространственная дифференциация угленосных бассейнов и вариации мощности угленосных разрезов определялись разломно-блоковой тектоникой, глубинные разломы контролировали закладку локальных центров субсиденции и аллювиально-озёрно-болотных обстановок осадконакопления.

7. Геотектоническое положение Центрального Казахстана между крупными кратонами обусловило мозаичное строение региона, неравномерные вертикальные движения и формирование локальных депрессий, в пределах которых концентрировалось юрское угленакопление. Существенную роль в структурной организации угленосных бассейнов сыграло Сарысу-Тенизское поднятие, определившее их сегментацию, асимметрию и различия в мощности разрезов.

8. Установлено, что углеобразование в юрский период происходило при чередовании фаз субсиденции и тектонической активизации. Климатические условия были относительно благоприятными и устойчивыми, однако играли подчинённую, модифицирующую роль по отношению к тектоническому контролю.

9. Установлено, что при сопоставлении Шубаркольского месторождения и Майкубенского бассейна показало, что различия в строении, мощности и продуктивности угленосных толщ при сходных палеоклиматических условиях обусловлены прежде всего геодинамическими факторами.

10. Установлено, что геодинамическая эволюция региона определяла не только формирование угленосных бассейнов, но и условия накопления элементов-примесей в углях, что имеет принципиальное значение для прогноза их геохимической специализации.

11. Установлено, что ключевые закономерности формирования угленосных отложений мезозоя Центрального Казахстана связаны с юрским этапом геодинамической эволюции. Он характеризовался развитием внутриконтинентальных прогибов растяжения, постколлизийной

перестройкой структуры и активизацией глубинных разломов, что определяло осадконакопление и поступление вещества в бассейны. В этот период формировались угленосные отложения Шубаркольского и Майкубенского типов, приуроченные к разломно-блоковым структурам.

12. Установлено, что источники вещества углей Шубарколя соответствуют кислым-средним магматическим породам и переработанным коровым материалам (по результатам геохимического анализа: диаграммы $Zr/TiO_2 - Nb/Y$, $La/Th - Hf$, Winchester & Floyd, 1977 [102]). Распределение точек отражает влияние юрских геодинамических процессов: активизацию разломов, поступление тонкодисперсного вулканогенного материала и переработку коровых комплексов в условиях внутриконтинентального растяжения. Геодинамический режим юры определял не только архитектуру осадочного бассейна, но и геохимическую специализацию терригенного материала, обогащенного высокозарядными элементами (Zr, Nb, Y).

13. Выявлены переходные фации между болотными и флювиальными системами в угленосных бассейнах, что выражается высокой вариабельностью Ce/Ce^* , $LREE/HREE$ и отражает чередование окислительных и восстановительных условий. Это создаёт перспективные зоны для локального накопления редкоземельных элементов за счёт сочетания органогенного и минерального механизмов фиксации. Блоковая тектоника и дифференцированные прогибы способствовали формированию локальных болотных и озёрно-болотных условий с пониженным окислительно-восстановительным потенциалом и слабокислой реакцией среды, благоприятной для осаждения урана и концентрации РЗЭ органическим веществом и глинистыми минералами.

14. Установлено, что исследуемые угли характеризуются положительными европиевыми аномалиями ($Eu = 1,1-2,3$), подтверждающими гидрогенный механизм накопления металлов из пластовых вод.

15. Установлено, что минерально-петрографический состав углей Шубаркольского месторождения, включая каолинит, анатаз и циркон, отражает поступление продуктов выветривания и вулканогенного материала, влияние флюидных потоков в разломных зонах и формирование аутигенных и диагенетических минералов – носителей REE, Zr, Nb, Y и U. Форма нахождения элементов-примесей определяется взаимодействием органического вещества с минералообразующими процессами, контролируемые юрской тектонической активизацией.

16. Выявлено, что в угленосной толще формируются устойчивые ассоциации петрогенных компонентов и микроэлементов, отражающие различные источники вещества и особенности геохимических процессов, выделенные на основе кластерного и факторного анализа. Полученные закономерности служат основой для разработки прогнозных критериев выявления угольных месторождений с повышенным содержанием редкоземельных и сопутствующих элементов-примесей.

17. Установлено, что минералогические исследования углей и углевмещающих пород Центрального Казахстана выявили многостадийный характер минералообразования с участием диагенетических, эпигенетических и локально гидротермальных процессов. Основная концентрация элементов-примесей и РЗЭ приурочена к диагенетическим и эпигенетическим фазам, локализованным в органическом веществе углей и зонах его контакта с минеральной матрицей. Для углей Майкубенского бассейна характерна пространственная и генетическая дифференцированность минеральных фаз, что формирует прогноз геохимической специализации бассейна, включая накопление Fe, S и ассоциированных микро- и редкоземельных элементов.

18. Установлено, что сочетание аутигенного каолинита, анатаза и ассоциации «циркон-бадделеит» в совокупности с признаками тектонической активизации (пальгорскит) может рассматриваться как надежный минералогический критерий для поиска зон обогащения углей редкими и редкоземельными элементами.

19. Установлено, что Ti прочно связан с алюмосиликатной фазой ($r=0,93$ с Al_2O_3), входя в структуру каолинита в виде субмикронных включений анатаза.

20. Установлено, что минеральная часть углей представлена преимущественно кварцем и каолинитом. Это свидетельствует о высокой степени зрелости исходного терригенного материала и интенсивном химическом выветривании в областях питания палеобассейнов. Генетическая неоднородность кварца и глинистых минералов: в Шубаркольских углях выявлен как кластогенный (пришлый – происхождение извне), так и аутигенный (новообразованный) кварц. Каолинит в виде хорошо раскристаллизованных вермикул и сферолитов указывает на активные процессы раннедиагенетической каолинизации в кислой среде под воздействием флюидов.

21. Выявлено, что основными носителями высокочarged элементов (Zr, Hf, Nb, Ta) являются циркон и редкий для углей бадделеит (ZrO_2). Наличие бадделеита и анатаза (TiO_2) служит индикатором вторичной минерализации и возможного влияния вулканогенного материала или глубинных флюидов.

22. Установлено, что ведущей минеральной формой фиксации редкоземельных элементов являются фосфаты: монацит (концентратор легких РЗЭ – La, Ce, Nd) и ксенотим (концентратор тяжелых РЗЭ – Yb, Lu и иттрия). Их присутствие в виде аутигенных пленок и корок подтверждает перераспределение РЗЭ из органики в минеральную фазу при углефикации.

23. Разработана система поисковых признаков и интегрированный анализ геодинамических, литолого-фациальных, геохимических и минералого-геохимических параметров, который позволяет:

– оценивать перспективность угленосных бассейнов на ранних стадиях исследований;

– выявлять зоны повышенной концентрации элементов-примесей, включая РЗЭ;

– прогнозировать геохимический состав углей в перспективных бассейнах и локальные аномалии;

– оптимизировать планирование поисково-оценочных работ и дальнейших исследований, включая изучение магматического и вулканогенного материала, а также эпигенетических и гидротермальных процессов.

Применение разработанных критериев позволяет формировать научно обоснованные рекомендации для поисково-оценочных работ, минимизировать затраты и повысить эффективность изучения угленосных бассейнов. Кроме того, эти признаки могут использоваться для прогнозирования геохимического состава углей в перспективных бассейнах и для выявления новых локальных аномалий, что открывает возможности для дальнейших фундаментальных и прикладных исследований в области угольной геохимии и минералогии.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Амангелдіқызы А. Исследование распространенности редкоземельных металлов в углях главных угольных бассейнов Центрального Казахстана: специальность 6D070600: диссертация на соискание ученой степени доктора философии (PhD) / Амангелдіқызы А. – Караганда, 2021. -202 с.
2. Геология СССР. Т. XX: Центральный Казахстан. М: НЕДРА, 1972, - 532 с.
3. Геология Казахстана и проблемы Урало-Монгольского складчатого пояса. К 50-летию Центрально-Казахстанской экспедиции геологического факультета МГУ и 70-летию профессора Ю.А. Зайцева. М: Московский университет, 2001, - 147с.
4. Геология месторождений угля и горючих сланцев СССР. Т. - 5. «Угольные бассейны и месторождения Казахстана». М.: Недра, 1973, - 720 с.
5. Тимофеев, П. П. Эволюция угленосных формаций в истории Земли / П. П. Тимофеев // Труды Геологического института. – 2006. – № 557. – С. 1-204.
6. В. А. Хямяляйнен, В. В. Иванов, Н. Ф. Сурунов, Р. В. Бузук. Геодинамическое районирование перспективных угольных месторождений как фактор повышения безопасности горных работ и эффективности функционирования предприятий//Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № 2. – С. 167-179.
7. Обстановки осадконакопления и фации: В 2 т. / Под ред. Х. Рединга; Пер. под ред. П.П. Тимофеева. М.: Мир, 1990. Т. 2. 304 с.
8. Тимофеев П.П. Генетические осадочные формации и эволюция Земли // Осадочные бассейны: Закономерности строения и эволюция минералогии. Екатеринбург: ИГиГ УРО РАН, 2000. С. 131-134.
9. Хайн В.Е. Основные проблемы современной геологии. 2-е изд., доп. М.: Научный мир, 2003. 347 с.
10. Солоненко, Н. С. Анализ процесса углеобразования / Н. С. Солоненко // Научно-исследовательский центр "Technical Innovations". – 2021. – № 5. – С. 47- 54.
11. Гergieev, А. С. Основные особенности углеобразования и гипергенные процессы / А. С. Гergieev // Концепция развития и эффективного использования научного потенциала общества: Сборник статей Международной научно- практической конференции. В 2-х частях, Калуга, 19 мая 2020 года. – Калуга: Общество с ограниченной ответственностью "ОМЕГА САЙНС", 2020. – С. 58- 63.
12. Cao, D., Wang, A., Ning, S., Li, H., Guo, A., Chen, L., Zheng, Z. (2020). Coalfield structure and structural controls on coal in china. International Journal of Coal Science and Technology, 7(2), 220-239. doi:10.1007/s40789-020-00326-z.

13. Cheng AG, Cao DY, Yuan TX (2010) Technical requirements for coal resources potential evaluation. Geological Publishing House, Beijing.
14. Cao, Y., Davis, A., Li, R., Liu, X., & Zhang, Y. (2003). The influence of tectonic deformation on some geochemical properties of coals-a possible indicator of outburst potential. *International Journal of Coal Geology*, 53(2), 69-79. doi:10.1016/S0166-5162(02)00077-0.
15. Li, Y. B., Jiang, B., & Qu, Z. H. (2014). Controls on migration and aggregation for tectonically sensitive elements in tectonically deformed coal: An example from the haizi mine, huabei coalfield, china. *Science China Earth Sciences*, 57(6), 1180-1191. doi:10.1007/s11430-014-4857-9.
16. Cao, D., Lin, Z., Zheng, Z., & Jieqing, T. (2012). Coalfield structures and potential evaluation of coal resources in china doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.356-360.2937.
17. Dai, S., Finkelman, R. B. (2018). Coal geology in china: An overview. *International Geology Review*, 60(5-6), 531-534. doi:10.1080/00206814.2017.1405287.
18. Dai, S., Chekryzhov, I. Y., Seredin, V. V., Nechaev, V. P., Graham, I. T., Hower, J. C., Wang, X. (2016). Metalliferous coal deposits in East Asia (Primorye of russia and south china): A review of geodynamic controls and styles of mineralization. *Gondwana Research*, 29(1), 60-82. doi:10.1016/j.gr.2015.07.001.
19. Cao D., Guo A., Chen L., Li H., Liu K., Tan J. (2016) New interpretation of coalfield tectonic evolution: from coal-forming basins to coal-bearing tectonic units. *Coal Geol Explor* 44(1):1–8.
20. McKenzie D. Active tectonics of the Alpine—Himalayan belt: the Aegean Sea and surrounding regions // *Geophysical Journal International*. – 1978. – T. 55. – №. 1. – С. 217-254.
21. Watts A. B. Isostasy and Flexure of the Lithosphere. – Cambridge University Press, 2001.
22. Cloetingh S. Intraplate stresses: a new tectonic mechanism for fluctuations of relative sea level // *Geology*. – 1986. – Т. 14. – №. 7. – С. 617-620.
23. Allen J.R., Allen P.A. Basin analysis: Principles and application to petroleum play assessment / Бассейновый анализ: принципы и применение для оценки нефтегазоносности. Wiley Blackwell, 2013 г., 632 стр., ISBN: 978-0-470-67376-8.
24. Einsele G., Chough S. K., Shiki T. Depositional events and their records – an introduction // *Sedimentary Geology*. – 1996. – Т. 104. – №. 1-4. – С. 1-9.
25. Reading H. G. (ed.). Sedimentary environments: processes, facies and stratigraphy. – John Wiley & Sons, 2009.
26. Yiwen J. et al. Dynamic types of basin formation and evolution and its geodynamic mechanisms // *Chinese Journal of Geology*. – 2015. – Т. 50. – №. 2. – С. 503-523.

27. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Геохимические и минералогические индикаторы вулканогенных продуктов в осадочных толщах. Екатеринбург: УрО РАН 2010. 412 с.
28. Середин В. В. Геохимия и минералогия углей России. — Томск: Изд-во ТГУ, 2005. — 338 с.
29. Dai S., Ren D., Chou C.-L., Finkelman R. B., Seredin V. V., Zhou Y. Geochemistry of trace elements in Chinese coals: A review of abundances, genetic types, impacts on human health, and industrial utilization. — *International Journal of Coal Geology*, 2012, Vol. 94, p. 3–21.
30. Hower, J. C., Kolker, A., Hsu-Kim, H., & Plata, D. L. (2024). *Rare Earth Elements in Coal Fly Ash and Their Potential Recovery*. In *Rare Earth Elements Sustainable Recovery Processing and Purification* (pp. 27–73). Wiley. DOI:10.1002/9781119515005.ch2.
31. Amangeldykyzy A., Kopobayeva A. N., Bakyt A., Ozhigin D.S., Blyalova G.G. Mineralogy and geochemistry of the Shubarkol deposit Jurassic coals // National Academy Of Sciences Of The Republic Of Kazakhstan. – 2021. – V. 5. - № 449. – P. 23-31. <https://doi.org/10.32014/2021.2518-170X.94>
32. Kopobayeva A.N., Portnov V.S., Kim S.P., Amangeldykyzy A., Askarova N.S. Tectonic factors of impurity elements accumulation at the Shubarkol coal deposit (Kazakhstan) // Naukovyi Visnik Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2021. – № 5. – P. 11-15. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-5/011>
33. Отчет по проекту AP08052608 «Исследование минералого-геохимических особенностей тонштейнов (глинистые прослойки в угольных пластах) Шубаркольского месторождения» Ожигин Д.С., Амангелдіқызы А., Копобаева А.Н., Блялова Г.Г., Аскарова Н.С., 2020-2022гг., Караганда: КарТУ.
34. Башарина Н.П. Мезозойские впадины Алтае-Саянской и Казахской складчатых областей. — М.: Наука, 1975. — 125 с.
35. Eskinazy G., Finkelman R.B., Chattarjee S. Some considerations concerning the use of correlation coefficients and cluster analysis in interpreting coal geochemistry data // *International Journal of Coal Geology*. – 2010. – 83(4). Pp. 491–493. doi:10.1016/j.coal.2010.05.006.
36. Geboy N.J., Engle M.A., Hower J. C. Whole-coal versus ash basis in coal geochemistry: A mathematical approach to consistent interpretations // *International Journal of Coal Geology*. – 2013. – 113. – Pp. 41–49. doi:10.1016/j.coal.2013.02.008
37. Бекжанов Г.Р., Кошкин В.Я., Никитченко И.И. и др. Геологическое строение Казахстана — Алматы: Академия минеральных ресурсов Республики Казахстан, 2000, 396 с.
38. Windley B. F. et al. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt // *Journal of the Geological Society*. – 2007. – Т. 164. – №. 1. – С. 31-47.

39. Kröner A. (ed.). The Central Asian Orogenic Belt: geology, evolution, tectonics and models. – Borntraeger Science Publishers, 2015.
40. Safonova I. Juvenile versus recycled crust in the Central Asian Orogenic Belt: Implications from ocean plate stratigraphy, blueschist belts and intra-oceanic arcs // *Gondwana Research*. – 2017. – Т. 47. – С. 6-27.
41. Буслов, М. М. Тектоника и геодинамика Центрально-Азиатского складчатого пояса: роль позднепалеозойских крупноамплитудных сдвигов / М. М. Буслов // *Геология и геофизика*. – 2011. – Т. 52. – № 1. – С. 66-90.
42. Han Y., Zhao G. Final amalgamation of the Tianshan and Junggar orogenic collage in the southwestern Central Asian Orogenic Belt: Constraints on the closure of the Paleo-Asian Ocean // *Earth-Science Reviews*. – 2018. – Т. 186. – С. 129-152.
43. Assessment G. M. R. Sandstone Copper Assessment of the Teniz Basin, Kazakhstan, 2010.
44. Камалиден А. С. Петрографическая характеристика вулканогенно-осадочных пород Сарысу-Тенизского поднятия / А. С. Камалиден. – Молодой учёный. – 2020. - № 14 (304). - С. 126-130.
45. Syusyura B., Box S. E., Wallis J. C. Spatial Databases of Geological, Geophysical, and Mineral Resource Data Relevant to Sandstone-Hosted Copper Deposits in Central Kazakhstan. – Open-File Report 2010-1124, U.S. Geological Survey, 2010. – 4 p. DOI: 10.3133/ofr20101124.
46. Mossakovsky A. Central Asian fold belt: geodynamic evolution and history of formation // *Geotectonics*. – 1993. – Т. 6. – С. 3-33.
47. Ryazantsev A. V. et al. Ophiolite sections of the Dzhair-Nayman zone, South Kazakhstan: their structure and age substantiation // *Doklady Earth Sciences*. – Dordrecht: SP MAIK Nauka/Interperiodica, 2009. – Т. 427. – №. 2. – С. 902-906.
48. Witt III E. C. Geospatial resources for the geology community: the USGS national map // *The Journal of Geology*. – 2015. – Т. 123. – №. 3. – С. 283-294.
49. Tulemissova Z. S., Buslov M. M., Bektukhametova Z. A. Geodynamic conditions of formation of sedimentary basins of Southern Kazakhstan (Shu-Sarysu, Pre-Balkhash, Ili) // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – Vol. 319. – 012021. DOI:10.1088/1755-1315/319/1/012021.
50. Коробкин В.В., Смирнов А.В. Палеозойская тектоника и геодинамика вулканических дуг Северного Казахстана // *Геология и геофизика*, 2006, т. 47 (4), с. 462-474
51. Zhumagulov A. et al. Petroleum Systems of the Shu-Sarysu Basin, Kazakhstan: A Review of Devonian–Permian Gas Potential // *Geosciences*. – 2025. – Т. 15. – №. 6. – С. 232.
52. Литогеодинамика и минерагения осадочных бассейнов / Е.А. Басков, Г.А. Беленицкая, С.И. Романовский/ Министерство природных ресурсов РФ, Российская академия наук, Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского (ВСЕГЕИ).

– Санкт-Петербург: Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского, 1998. – 480

53. Ju Y. et al. Geodynamic mechanism and classification of basins in the Earth system // *Gondwana Research*. – 2022. – Т. 102. – С. 200-228.

54. Drake C. L., Ewing M., Sutton G. H. Continental margins and geosynclines – The east coast of North America north of Cape Hatteras // L. H. Ahrens, F. Press, K. Rankama & S. Runcorn (eds.). *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 3. – Pergamon Press, 1959. – P. 110–198.

55. Aubouin J. *Geosynclines*. – Amsterdam; London; New York: Elsevier Publishing Company, 1965. – 335 p.

56. Dickinson W. R. Plate tectonics and sedimentation. – 1974.

57. Stockmal G. S., Beaumont C. Geodynamic models of convergent margin tectonics: the southern Canadian Cordillera and the Swiss Alps. – 1987.

58. Bally A. W. Basins and subsidence // *Dynamics of plate interiors*. – 1980. – Т. 1. – С. 5.

59. Miall A. D. The geology of fluvial deposits: sedimentary facies, basin analysis, and petroleum geology. – Springer, 2013.

60. Friedmann S. J., Burbank D. W. Rift basins and supradetachment basins: Intracontinental extensional end-members // *Basin Research*. – 1995. – Т. 7. – №. 2. – С. 109-127.

61. Hamilton W. Crustal extension in the Basin and Range province, southwestern United States // *Geological Society, London, Special Publications*. – 1987. – Т. 28. – №. 1. – С. 155-176.

62. Chorowicz J. The east African rift system // *Journal of African Earth Sciences*. – 2005. – Т. 43. – №. 1-3. – С. 379-410.

63. Huang X. L. et al. Mineralogical and geochemical constraints on the petrogenesis of post-collisional potassic and ultrapotassic rocks from western Yunnan, SW China // *Journal of Petrology*. – 2010. – Т. 51. – №. 8. – С. 1617-1654.

64. Cross T. A. Tectonic controls of foreland basin subsidence and Laramide style deformation, western United States // *Foreland basins*. – 1986. – С. 13-39.

65. Pang M., Nummedal D. Flexural subsidence and basement tectonics of the Cretaceous Western Interior basin, United States // *Geology*. – 1995. – Т. 23. – №. 2. – С. 173-176.

66. Roberts D. G., Bally A. W. (ed.). Regional geology and tectonics: Principles of geologic analysis. – Elsevier, 2012. – Т. 1.

67. Моссаковский А.А. Сравнительная тектоника, формационные ряды и магматизм структур орогенного этапа развития палеозойских складчатых зон Южной Сибири и Северной Европы // *Тектоника, магматизм и закономерности размещения рудных месторождений*. М.: Наука, 1964. С. 48-66.

68. Башарина Н. П. и др. Очерк тектоники мезозоя Центрально-Азиатского складчатого пояса // Новосибирск: изд-во «Наука» Сибирское отд. – 1974.

69. Воцалевский, Э. С., Жуков, Н. М., Киселев, А. Л., Кулинич, В. В., Мирошниченко, Л. А., Тетюхина, Е. Н., Ужкенов, Б.С. Минералогия мезозой-кайнозоя Казахстана. – Алматы, 2012. – 402 с.
70. Милановский Е.Е. Тектоническая карта России, сопредельных территорий и акваторий. М:1: 4000000 // <https://www.geokniga.org>. 10.08.2020.
71. Михайлов Б. М., Петровская Т. С. Литология мезозойских и кайнозойских отложений Тургайского бурогоугольного бассейна //Тр. ВСЕГЕИ», нов. сер. – 1959. – Т. 24.
72. Parafilov V. I. et al. GEOCHEMICAL SPECIALIZATION OF THE SHUBARKOL DEPOSIT COALS //Scientific Bulletin of National Mining University. – 2020. – №. 5.
73. Blyalova G. et al. A Comprehensive Study of the Spatial Variations in the Distribution of Rare Earth Elements (REE) and Their Potential in the Coals of the Shubarkol Deposit, Kazakhstan //Minerals. – 2025. – Т. 15. – №. 2. – С. 170.
74. Ulyeva G. A., Yemelyanova O. V. Production of special coke for electrothermal silicon production from Central Kazakhstan coal //Coke and Chemistry. – 2024. – Т. 67. – №. 4. – С. 243-250.
75. Отчет о геолого-разведочных работах с целью разделения запасов бурых и каменных углей на участке первоочередной отработки месторождения Шоптыколь с подсчетом запасов и технико-экономическим обоснованием промышленных кондиций каменных углей марки Д по состоянию на 01.01.2012 года. Исмагулова Г.С. и др. ТОО "Майкубен-Вест" ТОО "Кокше-АР".
76. Брунс Е.П. Генезис юрских угленосных отложений Южной Ферганы. Литологический сборник I.Гостоптехиздат, 1948.
77. Егоров А.И. Майкюбенский бурогоугольный бассейн. Ископаемые угли Казахстана. – Алматы, 1938. т. 2, вып. I.
78. Копобаева, А. Н., Блялова, Г. Г., Амангелдіқызы, А., Сунгатуллин, Р. Х., Оразбек, Н Геохимические особенности Майкюбенского угольного бассейна (Казахстан) // ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень// 2025;(9):135-150
79. Арбузов С. И. и др. Формы нахождения редкоземельных элементов (La, Ce, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu) в углях Северной Азии (обзор) //Химия твердого топлива. – 2019. – №. 1. – С. 3-25.
80. Kopyayeva, A. N., Amangeldikyzy, A., Blyalova, G. G., & Askarova, N. S. Features of rare earth elements geochemistry in coals of Central Kazakhstan. //Acta Geochimica, - 2024. 43(5), 876-888.
81. Ketris M. P., Yudovich Y. E. Estimations of Clarkes for Carbonaceous biolithes: World averages for trace element contents in black shales and coals //International journal of coal geology. – 2009. – Т. 78. – №. 2. – С. 135-148.
82. Taylor S. R., McLennan S. M. The continental crust: its composition and evolution. – 1985.
83. Dai S. et al. Elemental and mineralogical anomalies in the coal-hosted Ge ore deposit of Lincang, Yunnan, southwestern China: Key role of N₂–CO₂-

mixed hydrothermal solutions //International Journal of Coal Geology. – 2015. – Т. 152. – С. 19-46.

84. Маусымбаева А.Д., Портнов В.С., Амангелдыкызы А. Угли месторождения Шубарколь. – Караганда, 2021. – 330 с.

85. Юдович Я. Э. и др. Сочинские шарики //Вестник института геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН. – 2006. – №. 3. – С. 7-14.

86. Gluskoter H. J. Trace elements in coal: occurrence and distribution //Circular no. 499. – 1977.

87. Арбузов С. И. Металлоносность углей Сибири //Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2007. – Т. 311. – №. 1. – С. 77-83.

88. Seredin V. V. Rare earth element-bearing coals from the Russian Far East deposits //International Journal of Coal Geology. – 1996. – Т. 30. – №. 1-2. – С. 101-129.

89. Kopyayeva A.N., Blyalova G.G., Bakyt A., Portnov V.S., Amangeldikyzy A. The nature of rare earth elements accumulation in clay layers and coals of the shubarkol deposit // News of the academy of sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences. – 2022; № 2(452). – P. 117-130. <https://doi.org/10.32014/2022.2518-170x.164>.

90. Арбузов С. И. и др. Скандий в углях Северной Азии (Сибирь, российский Дальний Восток, Монголия, Казахстан) //Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55. – №. 11. – С. 1649-1660.

91. Аюпова Н. Р. Лейкоксен в умбритах из колчеданных месторождений Узельгинского рудного поля (Южный Урал) //Уральский минералогический сборник. – 2002. – №. 12. – С. 32-41.

92. Иванова Т. И. и др. Спектральный анализ в геологии и геохимии. – Учреждение Российской академии образования "Уральское отделение", 2003.

93. Carb A. B., Mukherjee B. An Interview with Bharati Mukherjee //The Massachusetts Review. – 1988. – Т. 29. – №. 4. – С. 645-654.

94. Asuen G.O. Assessment of major and minor elements in the Northumberland Coalfield, England // Int. J. Coal Geol., 1987. Vol. 9, № 2. P. 171-186.

95. Dai S, Ren D, Chou CL, Finkelman RB, Seredin VV, Zhou Y (2012) Geochemistry of trace elements in Chinese coals: A review of abundances, genetic types, impacts on human health, and industrial utilization. Int J Coal Geol. 94:3–21. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2011.02.003>.

96. Zhao L. et al. Enrichment of critical elements (Nb-Ta-Zr-Hf-REE) within coal and host rocks from the Datanhao mine, Daqingshan Coalfield, northern China //Ore Geology Reviews. – 2019. – Т. 111. – С. 102951.

97. Середин В. В. Основные закономерности распределения редкоземельных элементов в углях // Доклады Академии наук. – 2001. – Т. 377. – № 2. – С. 239-243.

98. Вялов В. И., Наставкин А. В., Шишов Е. П., & Чернышев А. А. Особенности распределения редкоземельных элементов в углях Дальнего Востока России // Георесурсы. – 2024. – № 26(2). – С. 34-52
99. Serykh, V.I. Geology, Petrology and Metallogeny of Ultraacid Granitoids of Central Kazakhstan; KSTU: Karaganda, Kazakhstan, 2009; pp. 105–112. (In Russian) [Google Scholar]
100. Serykh, V.I.; Kopobayeva, A.N. Patterns of distribution of rare metal deposits in central Kazakhstan. News Natl. Acad. Sci. Repub. Kazakhstan Ser. Geol. Tech. Sci. 2019, 1, 143-150. [Google Scholar] [CrossRef]
101. Blyalova G.G., Kopobayeva A.N., Amangeldykyzy A., Askarova N.S., Ozhigin D.S. Ways of Rare Earth Elements Migration and Transportation to the coals of the Shubarkol Deposit // Kompleksnoe Ispolzovanie Mineralnogo Syra = Complex Use of Mineral Resources. – 2023. – Vol. 324, No. 1. – P. 24-33. DOI: 10.31643/2023/6445.04.
102. Piñán-Llamas A., Escamilla-Casas J. C. Provenance and tectonic setting of Neoproterozoic to Early Cambrian metasedimentary rocks from the Cordillera Oriental and Eastern Sierras Pampeanas, NW Argentina // Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. – 2013. – T. 65. – №. 2. – С. 373-395.
103. Cox R., Lowe D. R., Cullers R. L. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States // Geochimica et cosmochimica acta. – 1995. – Т. 59. – №. 14. – С. 2919-2940.
104. Winchester J. A., Floyd P. A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements // Chemical geology. – 1977. – Т. 20. – С. 325-343.
105. Hoskin P. W. O. et al. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis // Reviews in mineralogy and geochemistry. – 2003. – Т. 53. – С. 27-62.
106. Amangeldykyzy A. et al. Study of rare earth elements in the coals of the Shubarkol deposit // Kompleksnoe Ispolzovanie Mineralnogo Syra = Complex use of mineral resources. – 2021. – Т. 319. – №. 4. – С. 48-56.
107. Ward C. R. Analysis, origin and significance of mineral matter in coal: An updated review // International Journal of Coal Geology. – 2016. – Т. 165. – С. 1-27. doi:10.1016/j.coal.2016.07.014
108. Ильенок С.С., Арбузов С.И. Металлоносные угли Азейского месторождения Иркутского угольного бассейна // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 8. – С. 132–144.
109. Wang X., Wang X., Pan Z., Pan W., Yin X. Mineralogical and geochemical characteristics of the permian coal from the qinshui basin, northern china, with emphasis on lithium enrichment // International Journal of Coal Geology. – 2019 – 214 – Pp. 275–305. doi:10.1016/j.coal.2019.1032541920
110. Ильенок С.С. Самородные элементы в углях и золах углей Азейского месторождения Иркутского угольного бассейна // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 1. – С. 65–71.

111. Сорокин А.П. и др. Формы нахождения и условия переноса рудных компонентов в бурые угли в зонах контрастных форм сопряжения осадочных бассейнов и горно–складчатых сооружений (на примере Зейско–Буреинского бассейна и Туранского массива) (Дальний Восток, Россия) // Тихоокеанская геология. – 2021. – Т. 40. – № 5. – С. 33–43. – DOI 10.30911/0207–4028–2021–40–5–33–43.

Приложение А

СОГЛАСОВАНО

Исполнительный директор НАО
«Карагандинский технический университет
имени Абылкаса Сагинова»

Исагулов А.З.
2022 г.



УТВЕРЖДАЮ

Вице-президент
АО «Шубарколь Комир»

Ким С.,П.

2022 г.



Акт внедрения о внедрении результатов научно-исследовательских работ

Заказчик АО «Шубарколь Комир»

Настоящим актом подтверждается, что результаты научно-исследовательских работ, выполненных в рамках финансирования проектов молодых ученых на 2020-2022 гг. Комитетом науки МОН РК на тему «Исследование минералого-геохимических особенностей тонштейнов (глинистые прослои в угольных пластах) Шубаркольского месторождения» выполненных в Некоммерческом акционерном обществе «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова»

Стоимостью: Без стоимости

Внедрены в АО «Шубарколь Комир»

1. Вид внедренных результатов: Информационная записка с аналитическими результатами, полученными методами ICP-MS, ICP-OES, SEM, рентгенофазовым и инструментальным нейтронно-активационным методами.
2. Характеристика масштаба внедрения: Единичная
3. Форма внедрения: Техническая документация
4. Новизна результатов научно-исследовательских работ: заключается в установленных геологических факторах влияющих на накопление элементов-примесей в глинистых прослоях и углях, закономерностей распределения в них элементов-примесей, минеральных формах их нахождения;
5. Внедрены:
 - в промышленное производство: для использования информации при геолого-разведочных работах, а также при разработке технологических схем обогащения и извлечения.
 - в проектные работы: для использования в проектах на поисковые работы.
6. Социальный и научно-технический эффект: для повышения эффективности геохимических исследований.

От ВУЗа:

И.о. директора ДНИИ

Б.Д. Сулеев

Руководитель проекта

Д.С. Ожигин

Ответственный исполнитель проекта

А. Амангелдіқызы

Исполнитель

Г.Г.Блялова

От Предприятия :

Вице-президент

АО «Шубарколь Комир»

