

*На правах рукописи*



**НАИДКО ВЛАДИМИР ИВАНОВИЧ**

**ГЕОЛОГИЯ И МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ  
СЕРЧАНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ГЕРМАНИЕНОСНЫХ  
ЛИГНИТОВ (СРЕДНЕЕ ТЕЧЕНИЕ РЕКИ ЕНИСЕЙ)**

Специальность 25.00.11 – «Геология, поиски и разведка твердых полезных  
ископаемых, минерагения» (геолого-минералогические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Красноярск – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет» (ФГАОУ ВО «СФУ»)

**Научный руководитель:** доктор геолого-минералогических наук, профессор  
**Макаров Владимир Александрович**

**Официальные оппоненты: Гамов Михаил Иванович,**

доктор геолого-минералогических наук, доцент,  
ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»,  
кафедра месторождений полезных ископаемых,  
профессор

**Лазарева Елена Владимировна,**

кандидат геолого-минералогических наук, ФГБУН  
«Институт геологии и минералогии им. В.С.  
Соболева Сибирского отделения Российской  
академии наук», лаборатория «Геохимии  
благородных и редких элементов», старший  
научный сотрудник.

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Иркутский национальный  
исследовательский технический университет»  
(ИРНИТУ), г. Иркутск.

Защита состоится «7» ноября 2019 года в 12 час. 30 мин., на заседании диссертационного совета Д 212.099.23 при ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» по адресу: 660025, г Красноярск, пр-т им. газеты «Красноярский рабочий», 95, ауд. 200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» и на сайте университета: <http://research.sfu-kras.ru/node/13319>

Автореферат диссертации разослан: «    » сентября 2019 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



С.С. Бондина

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Сфера использования германия непрерывно расширяется и включает космическую технику, волоконно-оптические линии связи, полупроводниковые детекторы, инфракрасную оптику и тепловизоры, катализаторы, люминофоры, медицинские и фармацевтические препараты.

Месторождения, где германий добывается как главный компонент, встречаются редко, в основном он извлекается как попутный химический элемент при комплексной переработке свинцово-цинковых, медных, оловянно-серебряных и оксидных железных руд, а также углей. Угольные месторождения являются основным источником германия в мире (60 % от общего объема добычи), в том числе и в России. На территории нашей страны промышленные концентрации германия выявлены в углях Приморского края и Сахалина, которые составляют основу его минерально-сырьевой базы. Суммарный потенциал выявленных месторождений составляет 7000–8000 т германия. Месторождения германий-угольного типа, как правило, формировались на фоне затухающего вулканизма, в ограниченных дизъюнктивными нарушениями угленосных депрессиях, а аномально высокие содержания германия установлены в их приподошвенной части. Вопрос о природе германиеносности углей в настоящее время остается дискуссионным.

Новый для России тип германиевого оруденения, представленный германиеносными углефицированными древесными остатками (лигнитами), выявлен в 60-х годах прошлого века в среднем течении реки Енисей в мел-палеогеновых терригенных отложениях Касской впадины. В процессе выполнения геологоразведочных работ на обширной территории было прослежено более 30 пластов лигнитов, ряд которых содержит германий в промышленных концентрациях. По результатам оценочных работ на площади выявлено Серчанское месторождение германиеносных лигнитов. Детальному исследованию лигнитов данного месторождения посвящена настоящая работа, призванная расширить представление о природе, механизмах накопления и формах нахождения германия в углефицированных древесных остатках.

**Цели и задачи.** *Целью* диссертационной работы являлось выявление механизмов формирования германиевого оруденения, изучение особенностей геологического строения Серчанского месторождения, вещественного состава лигнитов и геохимических особенностей вмещающих их терригенных образований. В связи с этим решались следующие **основные задачи**:

1. Изучение геолого-геохимических особенностей вмещающих оруденение горных пород;
2. Исследование вещественного состава, текстур и структур германиеносных лигнитов;
3. Выявление закономерностей распределения химических элементов в обломках углефицированных древесных остатков;

4. Изучение гидротермально-метасоматических преобразований, приведших к перераспределению вещества как в пределах отдельных фрагментов лигнитов, так и в рудовмещающей толще.

#### **Научная новизна полученных результатов.**

1. Впервые, на основании комплексного изучения вещественного состава и текстурно-структурных особенностей германиеносных лигнитов Серчанского месторождения, установлено наличие новообразованной рудной минерализации, которая представлена пиритом и баритом, выявлены деформационные текстуры и структуры, выраженные микроскладчатостью, зонами сжатия и сдвига.

2. Выявлены вариации в распределении геохимических элементов в рудоносном горизонте, как по его разрезу, так и по латерали.

3. Установлен факт влияния низкотемпературных гидротермально-метасоматических процессов на разубоживание первичных концентраций германия в лигните и повышение зольности.

4. Предложен механизм накопления промышленных концентраций германия в углефицированных древесных обломках, который заключается в сорбции ими редких металлов из растворов, дренировавших рудовмещающий слой слабо литифицированных песчаников.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы.**

1. Результаты диссертационного исследования могут быть использованы для уточнения прогнозно-поисковых моделей германиеносных лигнитов при поисках аналогичных месторождений на территории Касской впадины и в других регионах Российской Федерации.

2. Данные о вещественном составе и минералого-геохимических особенностях лигнитов, а также вмещающих их терригенных образований использованы предприятием ООО «КАС» при проведении геологоразведочных работ на участках Анцифировский и Усть–Питский.

3. На основании полученных данных о минералого-геохимических и текстурно-структурных особенностях германиеносных лигнитов предложены рекомендации по улучшению схемы обогащения путем внедрения предобогажительной стадии, включающей классификацию обломков и отделение мелкой, обедненной германием, фракции.

**Методология и методы исследований.** В основу диссертационного исследования положены материалы, собранные автором в процессе полевых работ 2016 г. Объектом изучения и опробования явилась рудоносная толща Серчанского месторождения, сложенная терригенными породами симоновской свиты, в месте ее выхода на дневную поверхность в долине р. Кас. Кроме того, использовались фондовые материалы, а также данные геологоразведочных работ компании ООО «КАС» на Касовском участке и на Серчанском месторождении в 2011–2015 гг.

В период полевых работ на месторождении проведено детальное геохимическое опробование терригенной толщи по сети горных выработок – канав. Отобрано 176 проб с интервалом 0,5 м, собрана коллекция образцов лигнитов для минералого-петрографических исследований, а также для

изучения механизмов сорбции германия и других химических элементов. Кроме того, для характеристики текстурно-структурных особенностей и химического состава лигнитов, а также золы после их сжигания использован рудный материал из большеобъемных технологических проб и эталонных коллекций ООО «КАС» и АО «Германий».

Химический состав проб вмещающих оруденение пород анализировался рентгенофлуоресцентным (MobiLAB X-50) и атомно-эмиссионным спектральным (МАЭС «Горный Поток») методами. На основании полученных аналитических данных составлены геохимические разрезы и диаграммы с использованием программного обеспечения Surfer 13 и ArcMap 10.2.2.

Вещественный состав образцов лигнита и золы исследовался комплексом аналитических методов, включающих рентгеновский фазовый и рентгеновский спектральный (дифрактометр Shimadzu XRD-6000 и спектрометр XRF1800 Shimadzu) и атомно-эмиссионный с индуктивно связанной плазмой (iCAP 6300 Duo Thermo Fisher Scientific).

Минералогический состав и текстурно-структурные особенности образцов лигнита изучались с использованием оптического (Axioscope 40 APol) и электронного (HitachiTM-3000 и Tescan Vega III SBH) микроскопов. Всего изучено 30 шлифов, 30 аншлифов, 17 приполированных шлифов.

Распределение химических элементов в образцах углефицированных древесных обломков исследовано с использованием сканирующего рентгенофлуоресцентного спектрометра Itrax Multi Scanner (лаборатория биогеохимии экосистем, СФУ). Всего проанализировано 6 образцов лигнитов, представляющих собой целостный фрагмент ствола углефицированного дерева, реже его часть.

#### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Германиеносные лигниты Серчанского месторождения представляют собой углефицированные фрагменты ископаемой древесины, локализующиеся в слабо литифицированных песчаниках симоновской свиты апт-альбского яруса мелового возраста. Породы рудовмещающего горизонта характеризуются значительными вариациями рудообразующих (Ba, Cu, Ge, Pb, Rb, Sr, Ti, Zn, Zr) и петрогенных элементов (Fe, Ca, K). На всем протяжении лигнитоносной пачки устойчиво проявлены ореолы серебра, маркирующие рудоносный горизонт.

2. Распределение новообразованных минералов, а также германия и других химических элементов внутри отдельных фрагментов углефицированных древесных остатков свидетельствует о сорбции металлов из низкотемпературных растворов, дренирующих лигнитоносные слабо литифицированные песчаники. Воздействие последующих гидротермально-метасоматических растворов на германиеносные лигниты привело к разубоживанию первичных концентраций германия и привнесу в краевые части обломков ряда элементов (Si, Ti, Fe, K, Ca), обусловивших повышение зольности.

3. Уровень содержания германия в лигните обратно пропорционален его зольности, которая, в свою очередь, зависит от крупности обломков –

максимальная зольность и наименьшие концентрации германия свойственны мелким фракциям лигнитов.

**Достоверность и обоснованность защищаемых положений** определяется кондиционными аналитическими данными, полученными в аккредитованных лабораториях, а также обширной апробацией полученных результатов исследования на различных научно-технических конференциях и симпозиумах.

**Апробация работы и публикации.** Диссертационное исследование выполнено в рамках научного проекта РФФИ №16-43-240719.

Апробация работы проводилась на Международном горно-геологическом форуме МИНГЕО СИБИРЬ (Красноярск, 2014); на молодежном МИНГЕО ФОРУМЕ (Красноярск, 2014, 2016); на Международном конгрессе и выставке «Цветные металлы и минералы» (Красноярск, 2014, 2016 и 2018); на II Международной научной конференции «Сибирский плацдарм: проблемы и задачи экономического развития Сибири и Красноярского края» (СФУ, Красноярск, 2016); на Международной конференции «Молодежь и наука: проспект Свободный» (СФУ, Красноярск, 2015, 2016 и 2017); на VIII Международной научно-практической конференции «Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов» (ФГБУ ЦНИГРИ, Москва, 2018). По теме диссертации опубликовано 6 работ, в том числе 2 из них в реферируемых журналах из перечня ВАК.

**Объем и структура работы.** Диссертационное исследование состоит из введения, 6 глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем работы – 130 страниц, в том числе 38 рисунков, 23 таблицы. Список литературы содержит 113 наименований, из них 102 опубликованных.

**Благодарности.** *Работа выполнена под руководством д-ра геол.-минерал. наук В.А. Макарова, которому автор выражает глубокую признательность. За ценные советы, рекомендации, критические замечания и консультации, а также за помощь в проведении полевых работ автор благодарит канд. геол.-минерал. наук Д.Г. Козьмина. Поддержку и помощь автору оказывал доктор химических наук А.Ф. Шиманский, которого автор искренне благодарит. Успешному выполнению диссертационного исследования способствовала совместная работа и консультации сотрудников кафедры ГМиМР и ГМиП ИГДГГ СФУ – профессоров А.М. Сазонова, С.И. Леонтьева, В.Г. Михеева, доцентов И.Ю. Яковлева, П.Н. Самородского, С.М. Макеева, О.Ю. Перфиловой. За помощь в аналитических исследованиях и практические советы автор выражает благодарность сотрудникам ООО ЦГИ «Прогноз»: заведующему лабораторией А.И. Фертикову и ведущему геологу В.Г. Фисенко. Особая благодарность родным и близким, без чьей поддержки и помощи работа не смогла бы состояться.*

## ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ИХ ОБОСНОВАНИЕ

**1. Германиеносные лигниты Серчанского месторождения представляют собой углефицированные фрагменты ископаемой древесины, локализующиеся в слабо литифицированных песчаниках симоновской свиты апт-альбского яруса мелового возраста. Породы рудовмещающего горизонта характеризуются значительными вариациями рудообразующих (Ba, Cu, Ge, Pb, Rb, Sr, Ti, Zn, Zr) и петрогенных элементов (Fe, Ca, K). На всем протяжении лигнитоносной пачки устойчиво проявлены ореолы серебра, маркирующие рудоносный горизонт.**

Серчанское месторождение германиеносных лигнитов выявлено в ходе проведения поисково-оценочных работ 2011–2015 гг. ООО «КАС» на территории Касской впадины, в среднем течении реки Енисей. По объекту подсчитаны запасы по категориям  $C_1$  и  $C_2$ , определены прогнозные ресурсы категорий  $P_1$  и  $P_2$ .

Рудовмещающая толща Серчанского месторождения представлена терригенными образованиями верхнего мела альб-сеноманского и сеноман-туронского ярусов симоновской свиты (рисунок 1), которые имеют моноклиальное, практически субгоризонтальное ( $-1^{\circ}40' - 3^{\circ}50'$ ), залегание, погружаясь на северо-запад.

На основании полевых наблюдений и результатов минералого-петрографических исследований установлено, что разрез терригенных образований на детально изученном участке Серчанского месторождения (см. рисунок 1) снизу-вверх, представлен углистыми аргиллитами, слабо литифицированными песчаниками и песками (рисунок 2).

Углистые аргиллиты слагают нижнюю часть литологического разреза, имеют темно-серый цвет и характеризуются интенсивной трещиноватостью. Видимая мощность углистых аргиллитов составляет, в среднем, 1,0 м.

Среднюю часть разреза слагают слабо литифицированные песчаники вмещающие лигнитоносный горизонт и, соответственно, рудные тела. Песчаники состоят преимущественно из кварца и полевого шпата и характеризуются повышенным содержанием глинистых минералов (каолинит и монтмориллонит). Из минералов тяжелой фракции, присутствует псевдорутил, монацит, ильменит, циркон и гранат. Все они, как правило, характеризуются средней и слабой окатанностью. Псевдорутил в тяжелой фракции имеет преобладающее значение – до 70 %. Песчаники имеют светло-серый цвет, мелко-, среднезернистую структуру, косую слоистость. В пласте слабо литифицированных песчаников присутствуют редкие включения темно-серых глин изометричной и уплощенной формы, обломки аргиллитов размером от 2 до 10 см, тонкие прослой растительного дитрита мощностью до 2 мм, а также отдельные фрагменты лигнитов. Мощность песчаников на исследуемом участке варьирует от 3,0 до 5,5 м.

Слой песчаников перекрывают светло-серые или светло-желтые пески, характеризующиеся слабой сортированностью. Состав песков – кварцево-полевошпатовый с примесью слюд и глинистого материала. В пласте песков

присутствуют включения окатанной гальки, размерами от 1 до 3 см, представленные широким набором метаморфических и изверженных пород. Видимая мощность песков составляет, в среднем, 2 м.

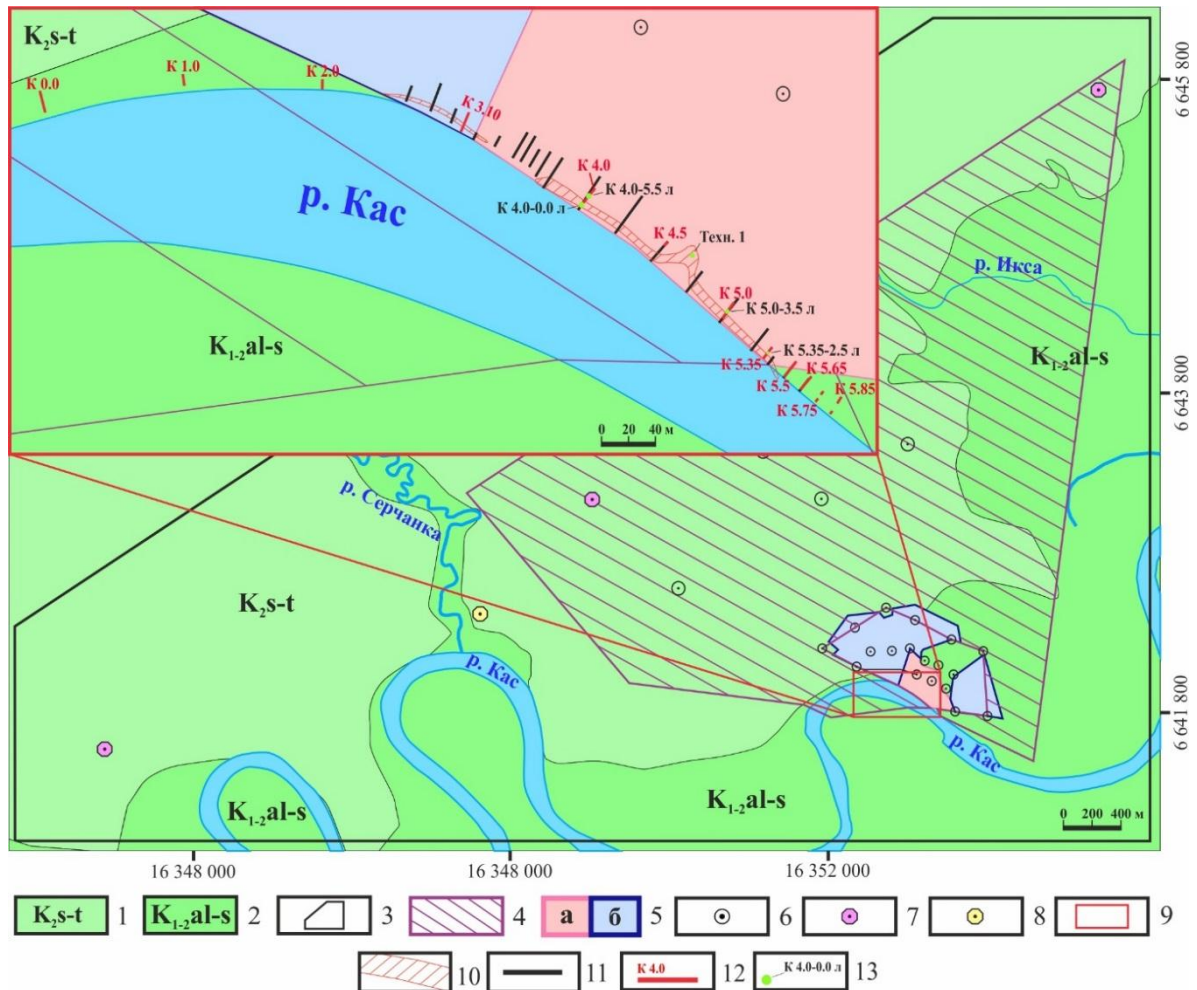


Рисунок 1 – Схема геологического строения Серчанского месторождения (составлена с использованием фондовых материалов, с дополнениями автора). 1 – верхний мел. Сеноманский – туронский ярусы. Симоновская свита. Верхняя пачка. Озерно-аллювиальные отложения. Пески кварцевые с прослоями слабо литифицированных песчаников; 2 – нижний-верхний мел. Альбский – сеноманский ярусы. Симоновская свита. Средняя пачка. Пески сероцветные слабо литифицированные, с прослоями глин, алевролитов и аргиллитов; 3 – контур Серчанского месторождения; 4 – контур площади с ресурсами германия, оцененными по категории  $P_1$ ; 5 – границы блоков с подсчитанными запасами германия: а – категории  $C_1$ , б – категории  $C_2$ ; 6 — скважины, пройденные при поисково-оценочных работах 2011–2014 гг.; 7 – скважины, пройденные в 2003 г.; 8 – скважины, пройденные при нефте-газоразведке; 9 – контур исследуемого участка; 10 – выход лигнитоносного пласта на дневную поверхность; 11 – горные выработки, пройденные в 2011–2014 гг.; 12 – горные выработки зачищенные и опробованные в ходе проведения полевых исследований автора в 2016 г. и их номера; 13 – точки отбора образцов лигнита

В осадочных породах, зачастую, присутствуют гидроокислы железа, проявляющиеся в виде тонких пленок в углистых аргиллитах, а также в виде прослоев и включений изометрической формы в лигнитоносных песчаниках и перекрывающих их песках.



Рудные тела выделяются на месторождении визуально и представляют собой участки пласта разномерных слабо литифицированных песчаников, максимально насыщенных обломками лигнитов. Всего на месторождении выявлено шесть рудных тел пластообразной формы, мощность которых варьирует от 0,3 до 2,6 м, в среднем 0,8 м. По простиранию рудные тела прослежены скважинами на протяжении 170 м. Расстояние между ними в разрезе, достигает, в среднем, 16 м, и изменяется от 2 до 33 м.

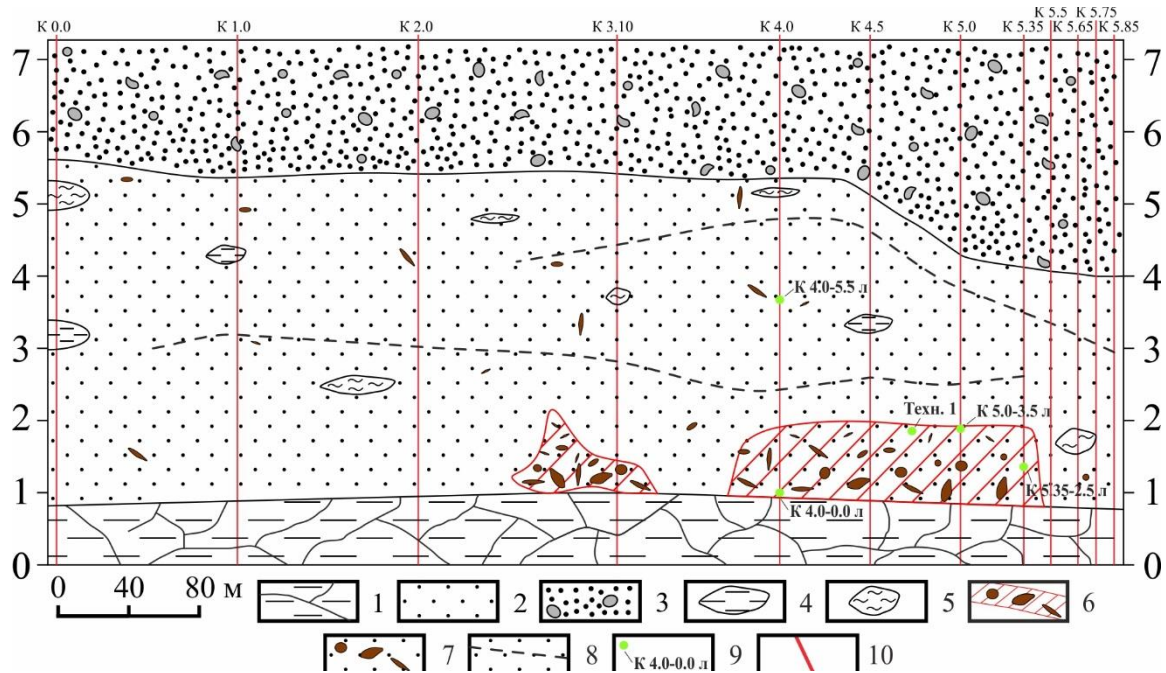


Рисунок 2 – Схематический геологический разрез, вскрытый канавами на участке детализации Серчанского месторождения (см. рисунок 1): 1 – углистые аргиллиты; 2 – слабо литифицированные песчаники; 3 – пески с включениями гальки; 4 – обломки аргиллитов; 5 – изометричные и уплощенные включения глин; 6 – контуры рудных тел по данным поисково-оценочных работ 2011–2014 гг.; 7 – единичные включения обломков лигнитов в слабо литифицированных песчаниках; 8 – прослои растительного детрита; 9 – точки отбора образцов лигнита; 10 – линии горных выработок, пройденных при проведении полевых исследований автором в 2016 г.

Песчаники в контурах рудных тел характеризуются крайне неравномерной насыщенностью фрагментами лигнита. Лигнитоносность по разрезу и по простиранию изменяется от 1 до 60,1 %, в среднем составляет 9,6 %. Обломки лигнитов в рудных телах располагаются хаотично, без какой-либо ориентировки. Установлена слабая сортировка обломков в разрезе рудных тел и вмещающих их слабо литифицированных песчаниках – более мелкие различия сосредоточены, в основном, в их кровельной части.

Германиеносные лигниты представляют собой фрагменты углефицированной ископаемой древесины (стволы, пни, ветки и т.д.), размеры которой варьируют от нескольких сантиметров до полутора метров (рисунок 3). Обломки лигнитов, как правило, имеют вытянутую форму. Соотношение длины обломков к их толщине приблизительно 1:10. Макроскопически древесная текстура органического материала четко выражена. Лигниты хрупкие, имеют

раковистый, иногда занозистый излом в поперечном сечении. На поверхности отдельных фрагментов встречаются пленки гидроокислов железа. В трещинах усыхания установлено наличие сульфидной минерализации, представленной агрегатами пирита.



Рисунок 3 – Обломки германиеносных лигнитов в слабо литифицированных песчаниках симоновской свиты. а – мелкие и крупные, б – весьма крупные

Под микроскопом в германиеносных лигнитах отмечается четко выраженная древесно-клеточная структура (рисунок 4).

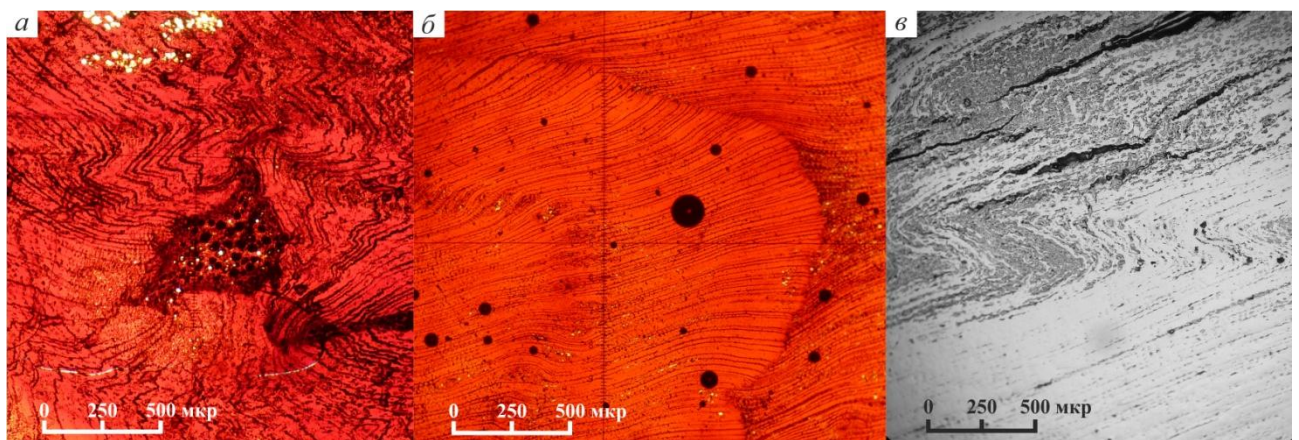


Рисунок 4 – Поперечный (а, б) и продольный (в) срезы цельного фрагмента лигнита; а и б – в проходящем свете; в – в отраженном свете

На приведенных изображениях (см. рисунок 4) видна зональность в виде годовичных колец, которые характерны для деревьев, произрастающих в сезонно изменяющихся климатических условиях.

Для выявления особенностей распределения химических элементов во вмещающих породах участка детализации Серчанского месторождения проведено исследование их макро- и микроэлементного состава (таблица 1).

Таблица 1 – Макро- и микроэлементный состав терригенных образований детально изученного участка Серчанского месторождения (см. рисунок 1)

Элемент	Горизонт песков (74 пробы)	Слабо литифицированные песчаники – рудоносный горизонт (82 пробы)	Углистые аргиллиты (20 проб)
	Среднее содержание элемента, г/т ± доверительный интервал его определения		
Ge	1,9±0,1	2,1±0,1	4,2±0,5
Pb	14,0±0,2	15,0±0,2	20,0±1,8
Zn	30,0±1,0	33,0±1,3	60,0±8,9
Fe	10940±526,6	11210±524,5	19830±2095,2
Cu	50,0±0,3	50,0±0,4	60,0±4,5
K	11720±447,6	15320±626,1	13490±579,1
Ca	4490±246,4	3700±248,5	4890±525,5
Rb	50,0±1,9	70,0±2,2	60,0±4,5
Sr	150,0±7,0	130,0±5,5	150,0±15,7
Zr	170,0±9,3	170,0±8,8	210,0±20,1
Ba	460,0±13,9	570,0±17,7	500,0±15,7
Ag	0,7±0,1	0,7±0,1	0,7±0,1
Ti	2160±113,9	2320±107,1	3790±400,3

Выявлено, что максимальные концентрации германия и сопутствующих элементов, таких как свинец, цинк, железо, медь, цирконий и титан, приурочены к углистым аргиллитам. Выше по разрезу содержание большинства элементов уменьшается с минимумом концентраций в песках, перекрывающих лигнитоносные песчаники.

Распределение германия и сопутствующих элементов по разрезу и по простиранию рудоносного горизонта и вмещающих его пород приведено на рисунках 5 и 6.

На приведенных диаграммах показаны значительные вариации в распределении химических элементов по разрезу и по простиранию рудоносного горизонта. Это, очевидно, связано с низкотемпературным гидротермально-метасоматическими преобразованиям осадочных пород Серчанского месторождения.

В распределении германия и рудообразующих элементов – Pb, Zn, Fe, Cu и Ti наблюдается неоднородность (см. рисунок 5). Максимальные их концентрации приурочены к углистым аргиллитам, подстилающим лигнитоносные песчаники. Вверх по разрезу содержание большинства элементов уменьшается. Исключение составляют свинец и цинк, геохимические поля которых также проявлены в слабо литифицированных песчаниках в центральной части исследуемого участка.

Германий в контурах рудных тел и вмещающих их слабо литифицированных песчаниках распределен относительно равномерно. Небольшое его увеличение отмечено в подошве пласта, в контуре рудного тела, где присутствует максимальное скопление обломков углефицированных деревьев.

Максимальные концентрации химических элементов в углистых аргиллитах, очевидно, обусловлены присутствием органического вещества,

определяющего повышенную сорбционную способность данного горизонта терригенных образований.

Из особенностей распределения элементов по простиранию рудоносного горизонта следует отметить следующие. Геохимические поля с повышенными концентрациями серебра устойчиво проявлены на всем протяжении слоя слабо литифицированных песчаников (см. рисунок 5). К песчаникам также приурочены повышенные содержания циркония, преимущественно, в приподошвенной части пласта.

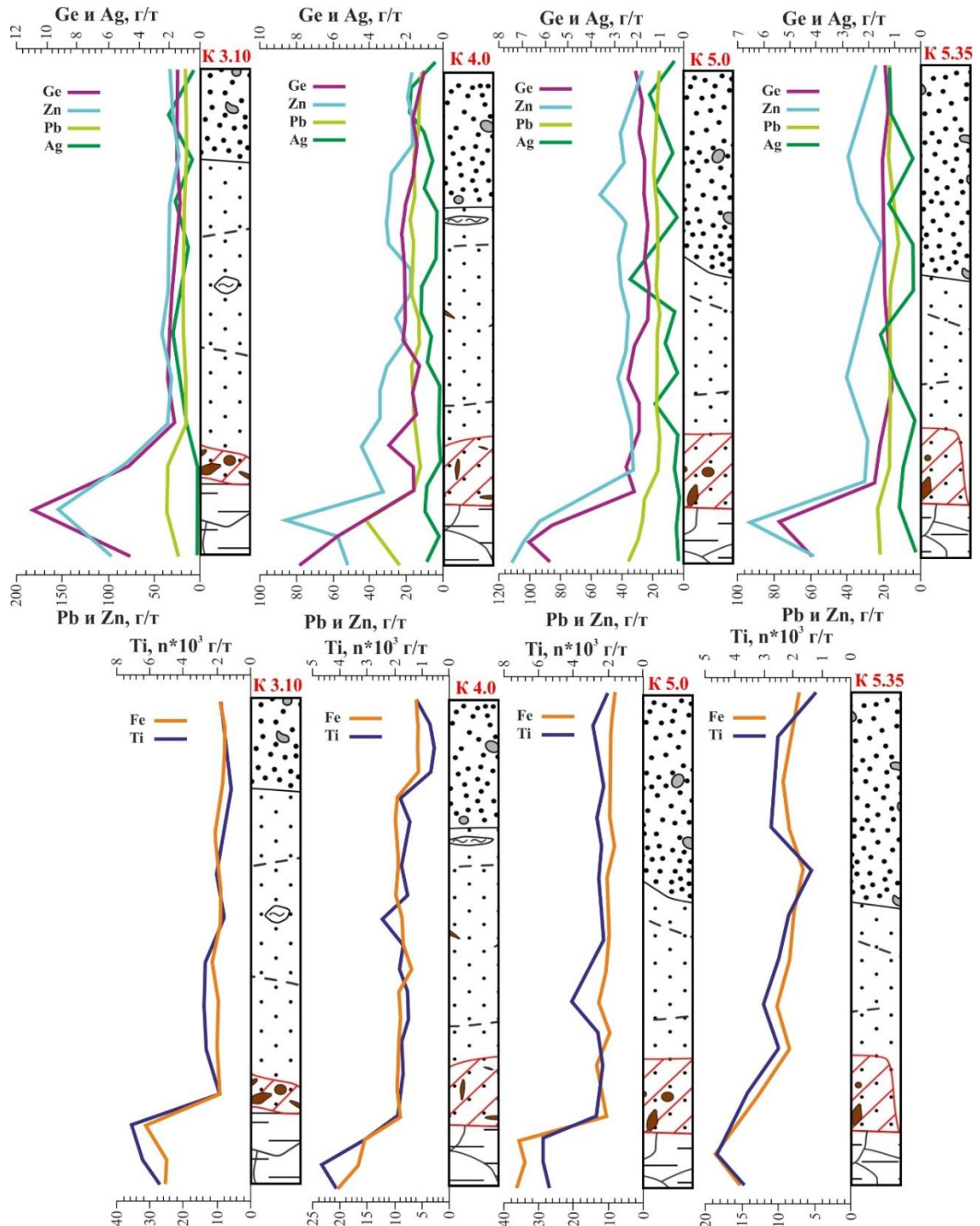


Рисунок 5 – Диаграммы распределения германия, свинца, цинка, серебра, железа и титана в разрезе рудоносного горизонта и вмещающих его пород. Условные обозначения к колонкам и номера каналов см. на рисунке 2.

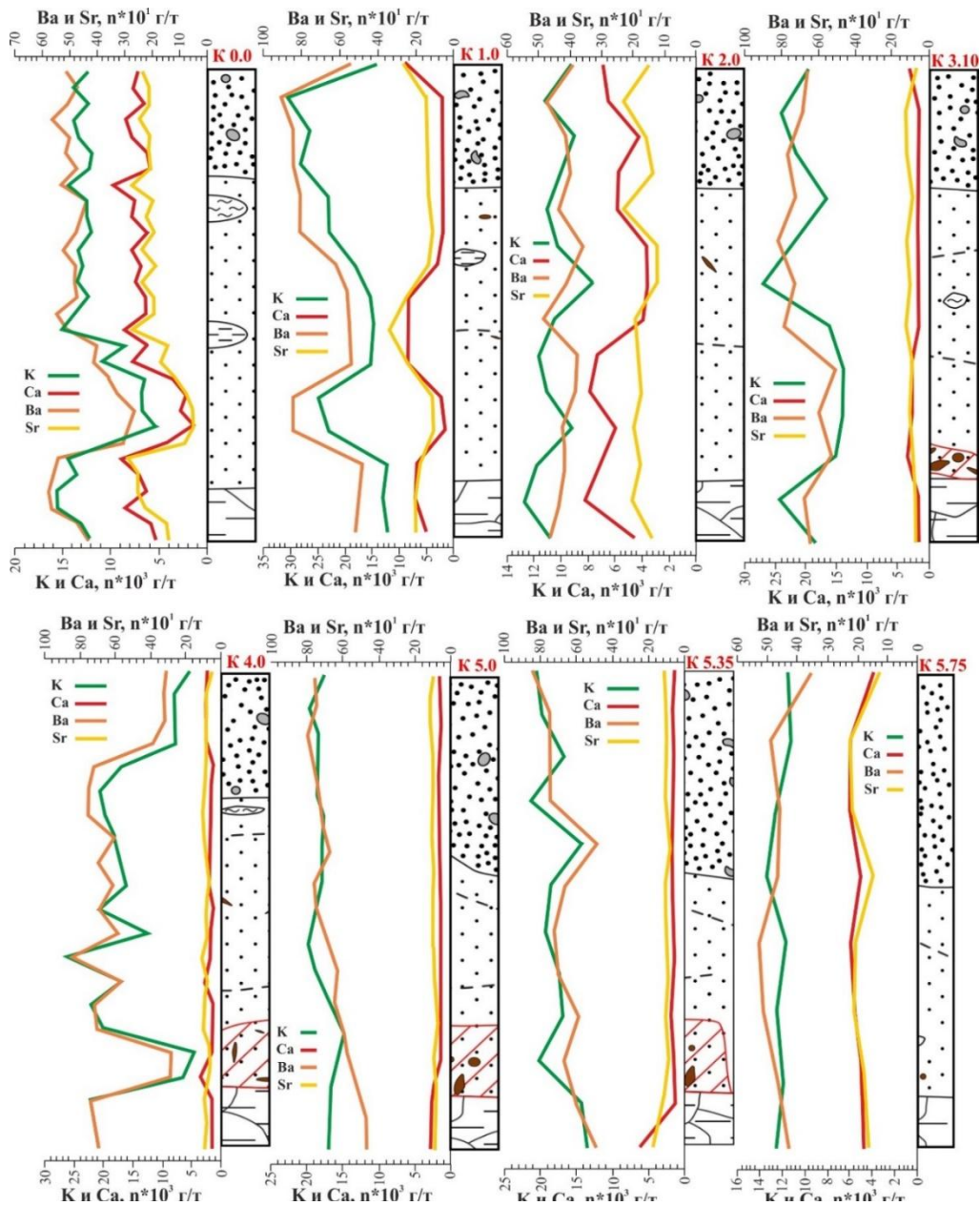


Рисунок 6 – Диаграммы распределения калия, кальция, бария и стронция в разрезе рудоносного горизонта и вмещающих его пород. Условные обозначения к колонкам и номера каналов см. на рисунке 2.

Распределение K, Ba, Rb, Ca и Sr в разрезе и по простиранию терригенных образований характеризуются крайней неоднородностью (см. рисунок 6). Установлено, что геохимические поля с повышенными концентрациями калия, бария и рубидия распространены преимущественно в центральной и, частично, западной области изученного участка. Геохимические поля кальция и стронция имеют обратную с ними пространственную корреляцию – максимумы их концентраций выявлены на флангах участка.

Выявленные геохимические особенности терригенных образований, а именно, ярко выраженная неоднородность в распределении содержаний германия, рудообразующих и петрогенных элементов по разрезу и по простиранию осадочной толщи, очевидно, свидетельствуют об активности

низкотемпературных гидротермально-метасоматических растворов, преобразующих рудоносную толщу на ранних этапах диагенеза.

**2. Распределение новообразованных минералов, а также германия и других химических элементов внутри отдельных фрагментов углефицированных древесных остатков свидетельствует о сорбции металлов из низкотемпературных растворов, дренирующих лигнитоносные слабо литифицированные песчаники. Воздействие последующих гидротермально-метасоматических растворов на германиеносные лигниты привело к разубоживанию первичных концентраций германия и привнесу в краевые части обломков ряда элементов (Si, Ti, Fe, K, Ca), обусловивших повышение зольности.**

С целью выяснения механизма накопления германия в обломках лигнита, а также реконструкции процессов последующих их преобразований выполнен комплекс минералого-геохимических исследований.

Установлено, что концентрация германия в обломках лигнита изменяется от 40 до 600 г/т. Содержание углерода составляет (мас. %) ~68,4, водорода ~5,3, серы ~1,6, азота ~0,7, кислорода ~25,0 мас. %. Из числа металлических элементов преобладают (мас. %) кремний (~1,0), алюминий (~0,5) и железо (~0,4).

Микроскопическими исследованиями установлена волнообразная клеточная структура лигнита (рисунок 7, а). Выявлена пилообразная форма отдельных клеточных волокон ископаемых древесных остатков (рисунок 7, б). Повсеместно наблюдается деформация годичных колец, выраженная микроскладчатостью (рисунок 7, в), зонами сжатия и сдвига (рисунок 7, г). В отдельных образцах лигнита присутствуют трещины катаклаза и усыхания. Наблюдаемые текстурно-структурные особенности свидетельствуют о постседиментационном преобразовании лигнитов, их деформации, в процессе диагенеза вмещающих слабо литифицированных песчаников.

Новообразованная минерализация в лигнитах представлена *пиритом* и *баритом*. Характерной особенностью является то, что данные минералы приурочены к краевым частям обломков углефицированных деревьев.

*Пирит* формирует фрамбоидальные включения, которые локализованы в виде единичных зерен либо их агрегатов (рисунок 8, а) на границах клеточных волокон (рисунок 8, б), а также в трещинах усыхания (см. рисунок 8, а). Размеры фрамбоидов могут достигать 10-30 мкм в диаметре. При значительном увеличении установлен октаэдрический и пентагондодекаэдрический облик кристаллов пирита, слагающего отдельные фрамбоиды (рисунок 9).

*Барит* выявлен в ходе микроскопических исследований отдельных фрамбоидов пирита (см. рисунок 9, в). Размер наблюдаемой частицы – первые микроны. Она имеет вытянутую, сплюснутую, морфологию и локализуется на краю сферического пиритового агрегата.

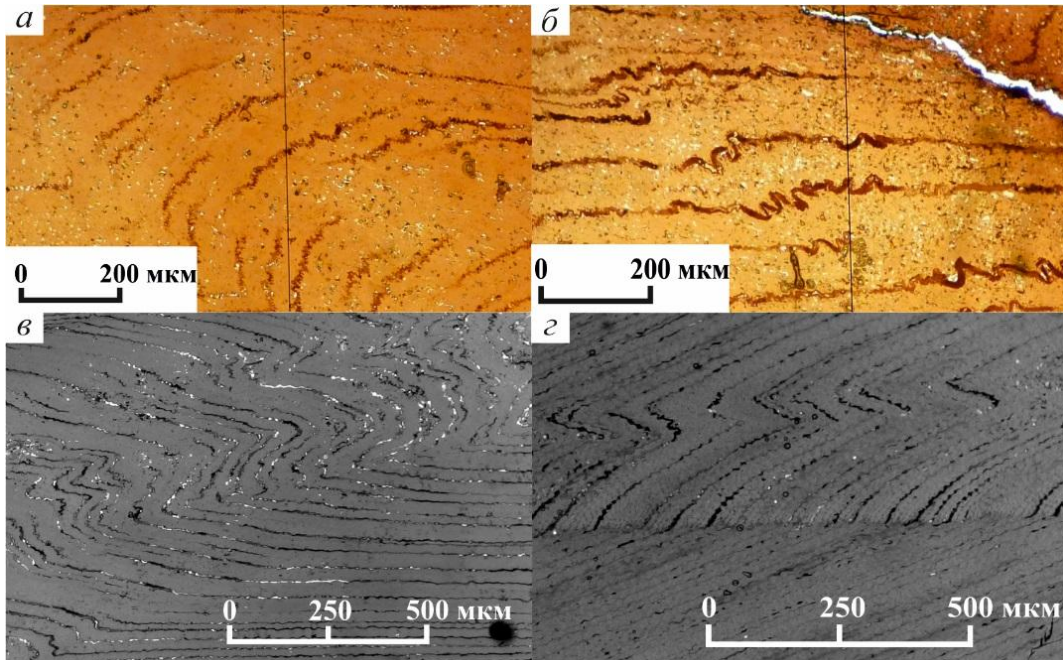


Рисунок 7 – Микрофотографии образцов лигнита в проходящем свете. а – волнообразные формы строения клеточного полотна; б – пилообразное строение отдельных клеточных волокон; в – микроскладчатость; г – зона сжатия волокон с дальнейшим ее сдвигом относительно границы годичных колец

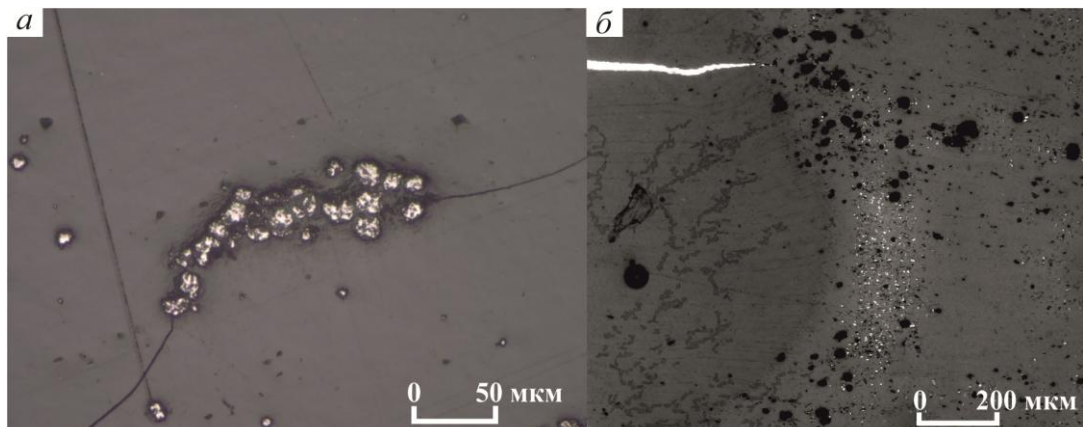


Рисунок 8 – Фрамбоидальный пирит в образцах лигнита в отраженном (а) и проходящем свете (б). а – отдельные включения фрамбидов пирита (белый) и его агрегаты; б – пиритовая минерализация в клеточной структуре лигнита

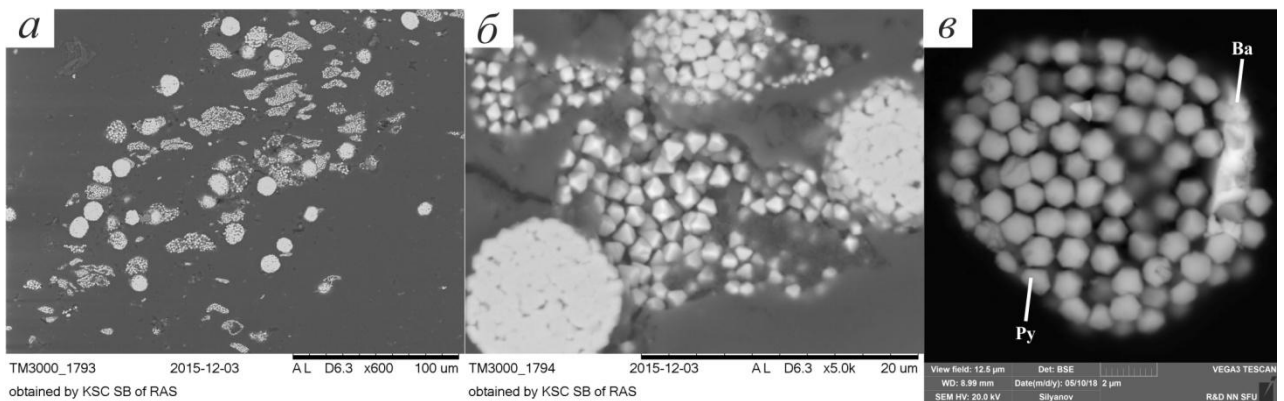


Рисунок 9 – Распределение агрегатов фрамбоидального пирита в лигните (а); кристаллы пирита и их агрегаты, слагающие отдельные фрамбиды (б); зерно фрамбоидального пирита с включением барита (в)

Барит в природе чаще всего образуется в условиях низких температур, при значительном парциальном давлении кислорода. Следовательно, находки данного минерала могут (так же, как и включения фрамбоидального пирита) свидетельствовать о гидротермальных, преимущественно низкотемпературных, изменениях, протекавших в рудовмещающей толще.

Отсутствие минеральных форм германия при его высоких концентрациях в лигните может указывать на сложную металлоорганическую форму (комплексные гуматы) нахождения элемента в углефицированных древесных остатках. Вместе с тем, электронно-микроскопическими исследованиями в древесной структуре лигнитов выявлены обособленные *серно-железистые включения* светло-серого цвета изометричной, реже уплощенной, овальной формы (рисунок 10) с повышенными содержаниями германия. Размеры частиц различны и могут достигать 20 мкм. В составе частиц выявлено повышенное содержание серы, железа, натрия, хрома и германия.

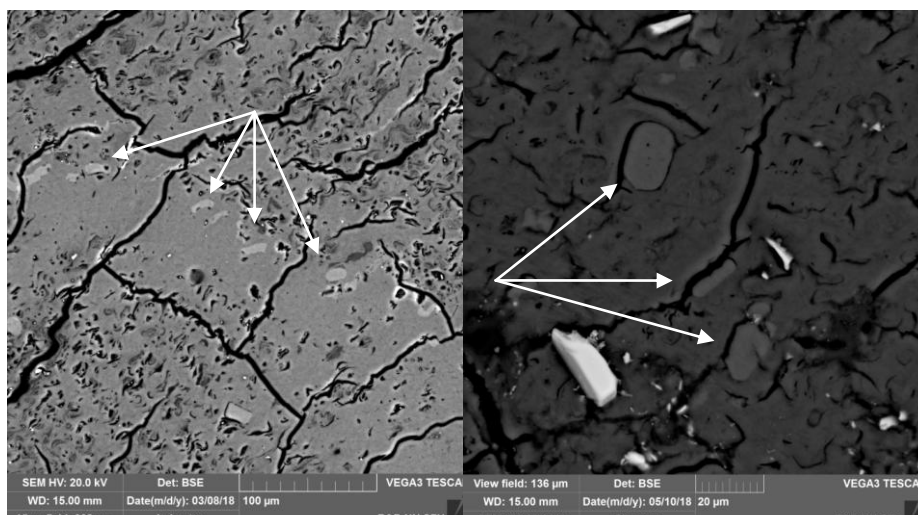


Рисунок 10 – Серно-железистые включения (светло-серые) в древесной структуре лигнитов

Происхождение подобных включений может быть обусловлено деятельностью железобактерий, с которыми также можно связывать наличие пленок и стяжений лимонита в рудовмещающем горизонте слабо литифицированных песчаников.

Новообразованная рудная минерализация, сформировавшаяся в пустотах и зонах разуплотнения лигнитов и локализующаяся на границах их обломков, имеет аутигенное происхождение. Это, очевидно, связано с наложенными вторичными гидротермально-метасоматическими преобразованиями, протекавшими во вмещающих песчаниках.

Геохимические особенности распределения элементов внутри отдельных фрагментов углефицированных деревьев изучены с использованием методики и оборудования, применяемого в дендрохронологии при исследовании годичных колец деревьев.

Сканированием установлено неравномерное распределение германия во всех изученных обломках. Повышенные его содержания выявлены в центральной части фрагментов лигнита. Максимальные концентрации титана,



железа, кремния, калия и кальция характерны для краевых частей обломков углефицированной древесины. Характер распределения германия и других химических элементов в поперечном срезе крупного целостного фрагмента лигнита представлен на рисунке 11.

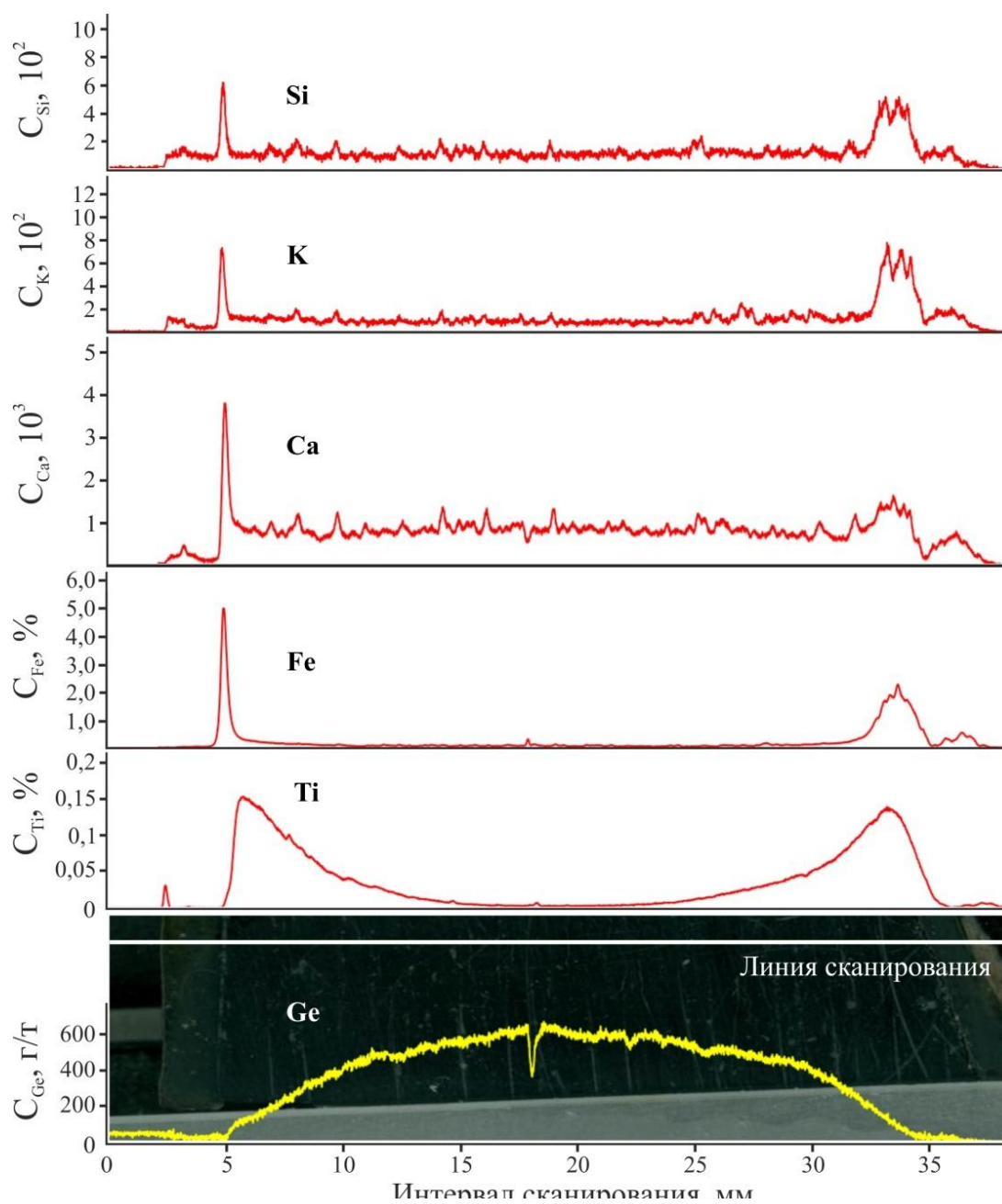


Рисунок 11 – Распределение германия и других химических элементов в поперечном срезе крупного (140×55 мм) целостного фрагмента лигнита

Выявленное распределение германия в обломках углефицированной древесины (см. рисунок 11) с максимумом концентрации в их центральной части, очевидно, свидетельствует о сорбционном механизме его накопления в лигните. Снижение содержания германия на периферии фрагментов с одновременным увеличением концентрации таких элементов как титан, железо, кремний, кальций и калий, может указывать на смену геохимической обстановки, приведшей к повышению активности минерализованных растворов

во вмещающих оруденение терригенных образованиях. Вследствие их воздействия из поверхностного слоя углефицированных фрагментов деревьев произошел вынос Ge и привнос Fe, K, Si, Ca, Ti, формирующих оторочки по краям обломков лигнитов. Увеличение содержания привнесенных элементов, так же, приводит к увеличению зольности лигнитов.

**3. Уровень содержания германия в лигнитах обратно пропорционален его зольности, которая, в свою очередь, зависит от крупности обломков – максимальная зольность и наименьшие концентрации германия свойственны мелким фракциям лигнитов.**

Механизм сорбции германия на углефицированные древесные обломки и последующие гидротермально-метасоматические их преобразования с формированием высокозольных оторочек и кайм подтверждаются статистическими исследованиями взаимосвязи между содержанием германия в лигните и его зольностью (рисунок 12).

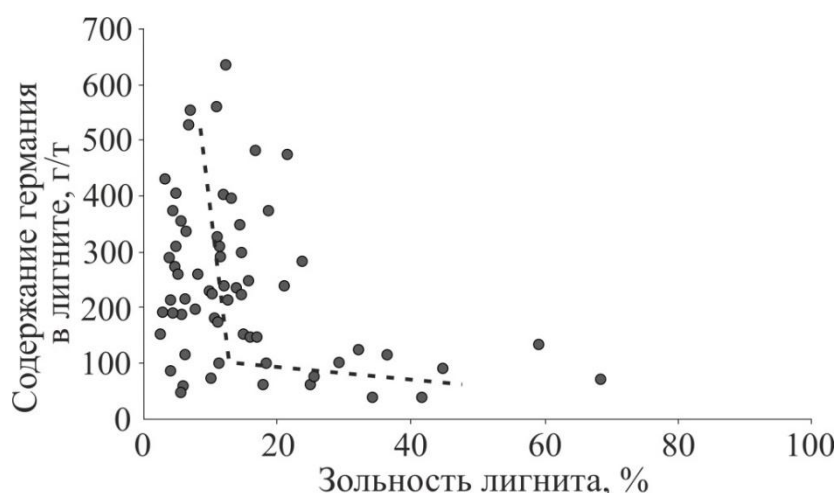


Рисунок 12 – Диаграмма зависимости содержаний германия в лигните и его зольности (n = 63).

Из графика видно, что в лигнитах с низкой зольностью (0-20 %) содержание германия широко варьирует от низких (40 г/т) до высоких значений (650 г/т). В лигнитах с повышенной зольностью (20-70 %) содержание германия также варьирует, но в области пониженных значений (50 г/т). Повышенные концентрации Ge в лигнитах низкой зольности свидетельствуют о связи германия с органическим веществом, что, в свою очередь, подтверждает выводы о сорбционном механизме формирования германиевого оруденения в углефицированной древесине и последующем разубоживании первичных концентраций германия под воздействием минерализованных гидротермально-метасоматических растворов, приведшим к увеличению зольности лигнитов.

Для оценки влияния размерности обломков углефицированных деревьев на содержание германия и золы выполнен гранулометрический анализ технологической пробы, отобранной из рудного тела Серчанский 1-1.

Материал технологической пробы был разделен на шесть классов: +20, -20+10, -10+6, -6+3, -3+1 и -1. Гранулометрический состав технологической пробы лигнитоносного песчаника приведен в таблице 2.

Таблица 2 – Гранулометрический состав технологической пробы лигнитоносного песчаника

Фракции крупности, в мм	Выход, %	Содержание лигнита во фракции, %	Содержание лигнита в пробе, %	Распределение лигнита по фракциям крупности, %
+20	3,00	100,00	3,00	34,84
-20+10	2,16	94,31	2,03	23,64
-10+6	1,47	88,39	1,30	15,08
-6+3	1,15	67,03	0,77	8,97
-3+1	5,19	14,08	0,73	8,50
-1	87,03	0,89	0,77	8,97
Итого	100,00	-	8,61	100,00

Установлено, что основная масса обломков сосредоточена в классах крупностью более 6 мм. На долю этих фракций приходится 73,5 % полезного компонента.

Отобранные фракции лигнитов проанализированы на содержание германия (таблица 3).

Таблица 3 – Содержание германия в анализируемых фракциях, полученных путем расситовки технологической пробы лигнитоносного песчаника

Фракция крупности, мм	Выход, %	Распределение лигнита, %	Содержание Ge, г/т в сухом лигните	Распределение Ge, %
+20	3,00	34,84	280,00	50,02
-20+10	2,16	23,64	260,00	31,52
-10+6	1,47	15,08	210,00	16,24
-6+3	1,15	8,97	25,00	1,15
-3+1	5,19	8,50	14,00	0,61
-1	87,03	8,97	10,00	0,46
итого	100,00	100,00	195,01	100,00

Выявлено, что при средневзвешенном содержании Ge 190 г/т на долю крупных классов (+6 мм и выше) приходится 94 % всего германия (рисунок 13). В то время как во фракциях -6 мм концентрации полезного компонента на порядок ниже.

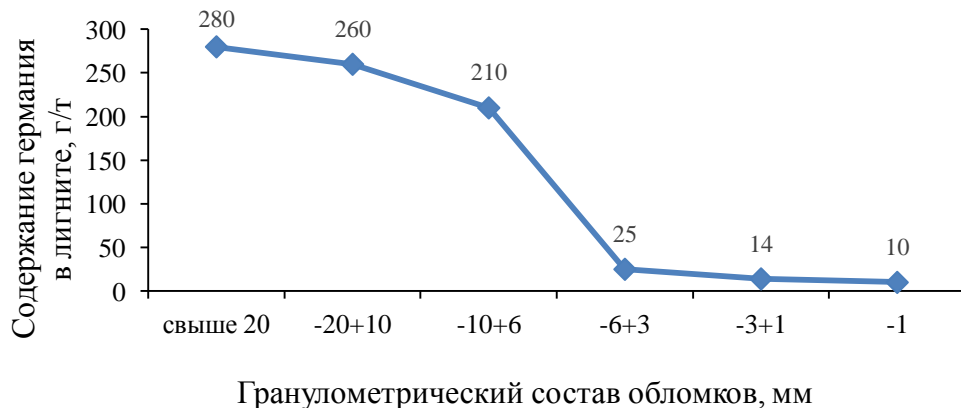


Рисунок 13 – График зависимости содержаний германия в лигните от размера его обломков

Установленные закономерности и взаимоотношения содержаний германия и размера обломков подтверждают гипотезу, согласно которой фрагменты ископаемых древесных остатков подвергались воздействию вторичных гидротермальных процессов. Проведенные исследования могут быть использованы для улучшения схемы обогащения, путем включения предобогажительной стадии, на которой будут отсортировываться обломки мелких фракций (до 6 мм) с низкими содержаниями германия и, очевидно, высокой зольностью.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые для германиеносных лигнитов Серчанского месторождения проведены детальные исследования вещественного состава и текстурно-структурных особенностей.

Обнаруженные текстурно-структурные особенности – деформации годовичных колец, выраженные микроскладчатостью, зонами сжатия и сдвига, различные трещины катаклаза и усыхания – свидетельствуют о преобразовании лигнитов в процессе диагенеза вмещающих их слабо литифицированных песчаников. При микроскопических исследованиях образцов углефицированных древесных остатков выявлена новообразованная минерализация, представленная отдельными фрамбоидами пирита или их агрегатами, в которых локализируются редкие включения барита. Характеризуемые минералы, очевидно, сформировались в процессе последующих гидротермально-метасоматических преобразований лигнитов, протекающих при температуре 100–150 °С.

Установлены закономерности распределения германия в отдельных целостных фрагментах лигнитов. В краевых частях обломков ископаемой древесины содержания германия уменьшаются, в то время как концентрации других химических элементов, в том числе Ti, Fe, Si, K, Ca увеличивается. Это свидетельствует о сорбционном механизме накопления германия в лигните и последующем их преобразовании под действием вторичных гидротермально-метасоматических процессов, приведших к выносу полезного компонента и привносу химических элементов, образующих каймы и оторочки по краям отдельных фрагментов углефицированных деревьев и, как следствие, способствующие повышению зольности.

Установлены закономерности размещения концентраций химических элементов в рудовмещающей толще, а именно, ярко выраженная неоднородность содержаний германия и других рудообразующих и петрогенных элементов по разрезу и по простиранию терригенной толщи, которые, очевидно, свидетельствуют об активности гидротермальных растворов, проявившейся на стадии диагенеза.

Выявленные минералого-петрографические и геохимические особенности германиеносных лигнитов и вмещающих их пород могут быть использованы для разработки прогнозно-поисковых моделей, направленных на обнаружение месторождений германия, локализующихся в меловых отложениях восточного

обрамления Западно-Сибирской плиты. Помимо поисковой значимости проведенных исследований полученные результаты могут быть использованы в технологическом процессе, а именно в разработке схемы обогащения германиевого сырья.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Статьи в научных журналах, входящих в перечень ВАК:*

1. Макаров, В.А. Лигниты среднего течения р. Енисей и перспективы их использования для производства германия / В.А. Макаров, О.И. Подкопаев, Д.Г. Козьмин, **В.И. Наидко**, А.Ф. Шиманский, С.А. Копыткова // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies 1. – 2014. – Т. 7. – № 7. – С. 862–871.

2. **Наидко, В.И.** Геологические и геохимические особенности формирования германиеносных лигнитов среднего течения реки Енисей / В.И. Наидко, В.А. Макаров, Д.Г. Козьмин, А.Ф. Шиманский, А.И. Фертиков // Геология и геофизика, 2019, т. 60, №1, с. 101—113.

### *Публикации в прочих научных изданиях:*

1. Козьмин, Д.Г. Предварительная модель формирования месторождений германия нового геолого-промышленного типа – лигнитоносных песчаников на примере рудных объектов Касской впадины. Красноярский край / Д.Г. Козьмин, Е.И. Берзон, Л.Н. Фалеева, **В.И. Наидко**, Д.С. Ключарев // Роль геохимии в развитии МСБ ТПИ. Прогноз, поиски, оценка и инновационные технологии освоения редкометалльных объектов : материалы Всерос. науч.-практ. конф. – Москва: ИМГРЭ, 2016. – С. 93–94.

2. **Наидко, В.И.** Вещественный состав ископаемых древесных остатков и вмещающих пород «Анцифировского» участка и их сравнительная характеристика с лигнитами бассейна р. Кас (участок «Касовский») / В.И. Наидко, Д.Г. Козьмин // Проспект Свободный-2016: материалы науч. конф., посвященной Году образования Содружества независимых государств (15– 25 апреля 2016 г.). – 2016. – С. 26–28.

3. **Наидко, В.И.** Германиеносные лигниты среднего течения р. Енисей / В.И. Наидко, Д.Г. Козьмин, В.А. Макаров, И.Ю. Яковлев // Цветные металлы и минералы: сб. докл. VI Междунар. конгресса – 2014. – С. 82–87.

4. **Наидко, В.И.** Вещественный состав германиеносных лигнитов Серчанского месторождения / В.И. Наидко, В.А. Макаров, Д.Г. Козьмин, Т.С. Серебрянская, З.А. Юлдашев // Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов : сб. тезисов докл. VIII Междунар. науч.-практ. конф. (16-18 апреля 2018 г.). Москва: ЦНИГРИ, 2018. – С. 56–57.