

СТРУКТУРНО-ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ УГЛЕЙ ПЛАСТА K_{12} КАРАГАНДИНСКОГО УГОЛЬНОГО БАССЕЙНА И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Н.М. Замалиев¹, Т.В. Кряжева², Р.А. Мусин¹, Д.Р. Ахматнуров¹, А.В. Садчиков¹

¹ Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова,
Караганда, Республика Казахстан, e-mail: R.A.Mussin@mail.ru

² Жезказганский университет им. О.А. Байконурова, Жезказган, Республика Казахстан

Аннотация: Представлены результаты комплексного геолого-петрографического исследования Карагандинского угольного бассейна. Рассмотрены особенности тектонического строения, стратиграфической приуроченности угленосных толщ и закономерности размещения продуктивных горизонтов в пределах Тентекского, Шерубайнуринского, Карагандинского и Верхнесокурского геолого-промышленных районов. Проанализированы условия осадконакопления и постседиментационные преобразования органического вещества, определившие современный вещественный состав и степень углефикации углей бассейна. Детально освещены вопросы петрологии углей, включая генетические предпосылки формирования органического вещества, классификацию и количественную характеристику мацералов, их морфологические и диагностические признаки в отраженном свете, а также структурно-текстурные особенности угольного вещества. Проведена систематизация микролитотипов и петротипов, отражающих условия торфонакопления, фациальную обстановку и степень преобразования исходного растительного материала. Показана взаимосвязь петрографических характеристик с физико-механическими и технологическими свойствами углей. Основное внимание уделено угольному пласту K_{12} – наиболее продуктивному горизонту карагандинской свиты нижнего карбона. На основе результатов микроскопических исследований и анализа показателей качества выполнена оценка вещественно-петрографического состава, степени метаморфизма, отражательной способности витринита, содержания минеральных примесей и структурной неоднородности угля. Показана взаимосвязь мацерального состава с коксующимися свойствами, газоносностью, обогатимостью и деформационным поведением массива. Отмечено, что петрографическая неоднородность углей пласта K_{12} является одним из факторов развития пластических деформаций и пучения пород почвы в горных выработках. Полученные результаты могут быть использованы при геолого-технологическом и геомеханическом моделировании, прогнозе качества углей и оценке устойчивости подземных выработок.

Ключевые слова: петрография углей, мацералы, витринит, микролитотипы, петротипы, степень метаморфизма, отражательная способность витринита, вещественно-петрографический состав, латеральная и вертикальная зональность, качество углей; коксующиеся свойства, газоносность угольных пластов.

Благодарность: Данное исследование выполнено при поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках программно-целевого финансирования по реализации научной и научно-технической программы с ИРН BR28712407.

Для цитирования: Замалиев Н. М., Кряжева Т. В., Мусин Р. А., Ахматнуров Д. Р., Садчиков А. В. Структурно-петрографические особенности углей пласта K12 Карагандинского угольного бассейна и их влияние на технологические свойства // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 7. – С. 109–129. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_7_0_109.

Structural and petrographic features of K₁₂ coal seam in the Karaganda Basin, and their influence on processing properties

N.M. Zamaliyev¹, T.V. Kryazheva², R.A. Mussin¹, D.R. Akhmatnurov¹, A.V. Sadchikov¹

¹ Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Republic of Kazakhstan,
e-mail: R.A.Mussin@mail.ru

² O.A. Baikonurov Zhezkazgan University, Zhezkazgan, Republic of Kazakhstan

Abstract: The article describes the integrated geological and petrographic research of the Karaganda Coal Basin. The scope of the analysis embraced the structural tectonics, stratigraphic confinedness of coal-bearing strata and the patterns of the physical layout of productive strata within the limits of the Tentek, Sherubainura, Karaganda and Upper Sokyr industrial regions. The deposition conditions of sediments and the post-sedimentation alterations of organic matter, which condition the actual material constitution and a carbonization degree of coal in the test basin, are analyzed. The details of coal petrology are given, including genetic prerequisites of organic matter formation, classification and quantitative characteristics of macerals, their morphological and diagnostic properties in reflected light, as well as structural and textural features of carbon matter. Micro-lithotypes and petrotypes, reflective of the conditions of pet accumulation, facial environment and transformation degree of an initial plant material are systematized. It is shown how the petrographic characteristics of coals are interconnected with their physical, mechanical and processing properties. Spotlight of the study is on K₁₂ coal seam—the highest productive stratum of the Lower Carboniferous Karaganda series. Based on the microscopic research data and the quality analysis, the material constitution and petrographic constituents, degree of metamorphism, vitrinite reflectance, mineral impurity content and the structure heterogeneity of the test coal type are evaluated. The interrelation of the maceral composition, coking properties, gas content and dressability of coal with the deformation behavior of rock mass is shown. It is highlighted that the petrography heterogeneity of K₁₂ coal is one of the development factors of plastic deformations and floor buckling in mine roadways. The results can be used in geological-engineering and geomechanical modeling, in coal quality prediction and in stability estimation of mine roadways.

Key words: coal petrography, macerals, vitrinite, micro-lithotypes, petrotypes, degree of metamorphism, vitrinite reflectance, material constitution and petrographic compositions, lateral and vertical zonalities, coal quality, coking properties, coal seam gas content.

Acknowledgements: This research was carried out with the support of the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan within the framework of program-targeted financing for the implementation of the scientific and scientific-technical program of the IRN BR28712407.

For citation: Zamaliyev N. M., Kryazheva T. V., Mussin R. A., Akhmatnurov D. R., Sadchikov A. V. Structural and petrographic features of K₁₂ coal seam in the Karaganda Basin, and their influence on processing properties. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(7):109-129. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_7_0_109.

Введение

Карагандинский угольный бассейн является одним из крупнейших и наиболее изученных угленосных регионов Центральной Азии и на протяжении более чем двух с половиной столетий играет ключевую роль в топливно-энергетическом балансе Республики Казахстан. Промышленная разработка углей бассейна ведется с середины XVIII в., что обусловило формирование обширной геологоразведочной и научной базы, отраженной в фундаментальных сводных работах и справочниках [1, 2]. В структурно-тектоническом отношении бассейн приурочен к Карагандинской рифтовой зоне широтного простирания протяженностью свыше 100 км, характеризующейся асимметричным строением: пологим северным крылом и крутым, местами опрокинутым южным крылом, осложненным складчатостями и разрывными нарушениями [3, 4].

В пределах бассейна выделяются крупные геолого-промышленные структуры — Шерубайнуринская, Карагандинская и Верхнесокурская, отличающиеся условиями угленакопления, степенью тектонической нарушенности и метаморфизма углей [5, 6]. Каменные угли приурочены к отложениям нижнего карбона, представленным чередованием песчаников, алевролитов и аргиллитов континентально-озерных, речных и болотных фаций [7, 8]. Основная угленосность связана с карагандинской свитой мощностью 630—800 м, включающей многочисленные угольные пласты и пропластки, карбонатные горизонты и терригенные породы различного гранулометрического состава [9, 10].

Угли карагандинской свиты относятся к каменным, гумусовым, преимущественно полосчатым и характеризуются сложным петрографическим строением, отражающим аллохтонно-автохтонный тип накопления органического вещества

[11, 12]. Существенное разнообразие марочного состава углей бассейна — от жирных и коксовых до слабоспекающихся и тощих — обусловлено как латеральными, так и вертикальными изменениями степени метаморфизма, что было показано в классических исследованиях Ф.А. Петровой и последующих работах [13, 14]. При этом установлено, что в Карагандинском районе преобладают жирные и коксовые угли, тогда как в Шерубайнуринском и Тентекском районах широко распространены коксовые и отощенные спекающиеся разновидности, а тощие угли приурочены к юго-западным и южным участкам синклиналильных структур [15, 16].

Особый интерес в этом отношении представляет угольный пласт K_{12} — наиболее продуктивный горизонт карагандинской свиты, залегающий в средней подсвите визейско-серпуховского возраста, сложенной песчаниками континентально-озерных и болотных фаций. Возраст пласта и вмещающих пород установлен на основании палеонтологических данных по фауне пелеципод, флоре и спорово-пыльцевым комплексам [17, 18]. Пласт K_{12} характеризуется значительной изменчивостью петрографического состава и содержания плавленых компонентов (40—65%), что отражает как региональные особенности угленакопления, так и локальные условия преобразования органического вещества [19].

Петрографические исследования углей играют ключевую роль в оценке их качества, технологических свойств, прогнозе коксуемости и рационального использования минерально-сырьевой базы. Как показано в ряде работ, именно микрокомпонентный состав и микроструктура углей наиболее полно отражают их генезис, условия осадконакопления и последующего метаморфизма [20]. Органические микрокомпоненты

углей представляют собой морфологически и структурно обособленные элементы исходного растительного материала, измененные под воздействием геологических факторов и различные преимущественно в микроскопическом масштабе [21].

Петрографический анализ углей пласта K_{12} свидетельствует о преобладании остатков крупной древесной растительности, что подтверждается присутствием фрагментов стеблевых тканей при сравнительно незначительном участии грибковых образований, спорангиев, спор и пыльцы. Коровые и листовые ткани, а также кутикулярные фрагменты встречаются редко, а сапропелевый материал в составе углей практически отсутствует. В углистых породах отмечены единичные находки водорослей типа *Pila*, что указывает на эпизодическое влияние водной среды в процессе угленакпления.

Комплексное петрографическое изучение углей пласта K_{12} Карагандинского угольного бассейна является необходимым этапом для углубленного понимания их генезиса, закономерностей вещественного состава и практической оценки качества угольного сырья в условиях современного горного производства.

Методика исследования.

В лаборатории Карагандинского технического университета имени Абылкаса Сагинова проводилось тщательное описание угольных пластов, уточнялась мощность отдельных пачек, определялся генетический тип угля, его текстурные и структурные признаки, минеральные включения и основные физические свойства (цвет, блеск, трещиноватость и др.). Микроскопические исследования проводились в проходящем свете, простом и поляризованном, и в отраженном при увеличении от 60 до 1000 [22].

Наряду с определением макро- и микроструктур различных типов углей, принимающих участие в строении пластов, особое внимание было уделено составу углей, определяемому по слоевым и общепластовым пробам, метаморфизму, с целью установления закономерностей в изменении вещественно-петрографического состава, степени восстановленности и метаморфизма в стратиграфическом разрезе и на площади исследования, что необходимо для прогноза качества углей на прилегающих участках — как на верхних, так и на глубоких горизонтах.

Основное внимание уделено петрографическому строению и фациальной изменчивости отдельных угольных пластов, особенностям микрокомпонентного состава и метаморфизму углей, составу и характеру распространения минеральных примесей.

В шлифах и аншлифах определялась микроструктура угля, ботаническая принадлежность отдельных растительных фрагментов, степень разложенности исходного материала, отмечался характер распределения микрокомпонентов, а также распределение и состав минеральных образований. Некоторые шлифы просматривались в проходящем и отраженном свете для установления деталей структуры и степени первичной окисленности фюзенизированных микрокомпонентов.

По степени первичной окисленности органические компоненты разделяются на четыре группы: витринит (неокисленные), семивитринит (слегка окисленные), семифюзенит (среднеокисленные) и фюзенит (сильноокисленные). Разделение микрокомпонентов на эти группы произведено по цветовым оттенкам и их отражательной способности, определяемых как в проходящем свете, так и в отраженном с масляной иммерсией.

Петрографическая характеристика углей пласта K_{12} выполнена в соответствии с классификацией органических микрокомпонентов Международного комитета по петрологии углей (ICCP). В составе углей выделены основные группы мацералов: витринит, инертинит и липтинит, каждая из которых подразделяется на структурные разновидности в зависимости от степени сохранности клеточного строения, характера гелификации и степени первичного окисления. Описание микрокомпонентов проведено по единой схеме, включающей морфологические признаки, оптические характеристики в проходящем и отраженном свете, генетическую интерпретацию и распространенность в пределах пласта.

В пределах пласта K_{12} доминирует группа витринита, представленная α -, β -, γ - и Δ -разновидностями, отражающими различную степень преобразования лигниноцеллюлозных тканей исходной растительности.

Споро-пыльцевой анализ углей пласта K_{12} выполнен в лабораторных условиях с применением общепринятой палинологической методики химической

обработки образцов (HCl, HF) с последующей промывкой, концентрированием и приготовлением микропрепаратов. Микроскопирование проводилось в проходящем свете при увеличении $\times 400$ – $\times 1000$.

Определение спор и пыльцы выполнено в соответствии с систематикой каменноугольных палинокомплексов, принятой в отечественной и международной палинологической практике. Таксономическая диагностика проводилась с использованием атласов и определителей палинологических форм палеозоя.

В составе споро-пыльцевого комплекса установлены представители родов *Lycospora*, *Densosporites*, *Laevigatosporites*, *Florinites*, характерные для каменноугольных отложений паралического типа.

Результаты

При проведении петрографического описания углей пласта K_{12} было проведено разделение фрагментов тканей с учетом сохранности признаков их первоначального клеточного строения.

Всего выделено четыре типа структур, обозначенных на рисунках буквами греческого алфавита: α , β , γ и Δ .

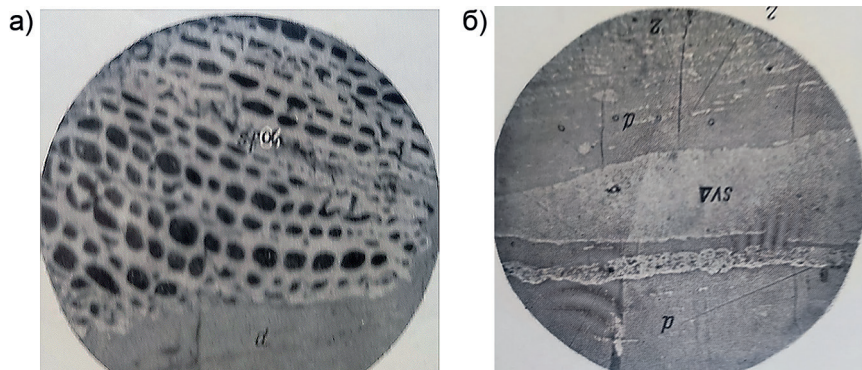


Рис. 1. Структуры каменного угля пласта K_{12} : линза семивитринита, отраженный свет без анализатора, увеличение $\times 200$ (а); Δ -семивитринит в дурене, отраженный свет без анализатора, увеличение $\times 200$ (б) [создано авторами]

Fig. 1. Structures of bituminous coal from seam K_{12} : lens of semivitrinite, reflected light without analyzer, magnification $\times 200$ (a); Δ -semivitrinite in durene, reflected light without analyzer, magnification $\times 200$ (b) [created by the authors]

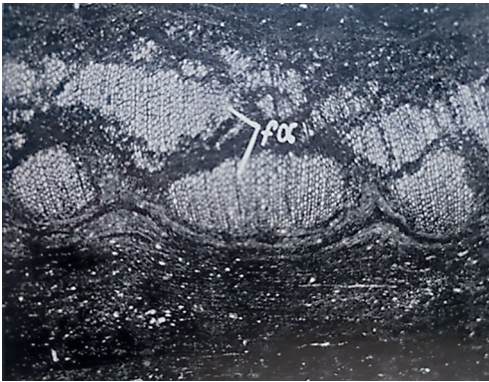


Рис. 2. Фрагмент фюзенизированной ткани с α -структурой. Отраженный свет, без анализатора, увеличение $\times 250$ [создано авторами]

Fig. 2. Fragment of fusinized tissue with α -structure. Reflected light, without analyzer, magnification $\times 250$ [created by the authors]

Примеры отдельных структур показаны на (см. рис. 1).

Компоненты с α -структурой (рис. 1, а) характеризуются хорошей сохранностью клеточного строения. Клеточные полости у таких тканей пустые или выполнены минеральными примесями. На рис. 1, б показаны β -структуры, которые характеризуются неясной сохранностью клеточного строения и наличием своеобразной комковатости. Эти структуры обычно именуется ксиленовой и ксиловитреновой структурами.

На рис. 2 в отраженном свете показана α -структура пласта K_{12} каменного

угля, в котором клеточные полости фюзенизированной ткани заполнены каолинитом.

Разновидности витринита пласта K_{12} представлены на рис. 3: γ -витринит отличается более однородной текстурой, тогда как Δ -витринит характеризуется неоднородной окраской и структурной дифференциацией в проходящем свете.

В углях пласта K_{12} Карагандинского угольного бассейна выделены различные морфологические разновидности витринита, отличающиеся структурными особенностями и характером окраски в проходящем свете.

Как γ -структуры выделены растительные фрагменты с хорошо выраженным клеточным строением, полости клеток которых заполнены аморфным органическим веществом, как правило, несколько иной окраски по сравнению со стенками клеток. В отдельных случаях стенки клеток пластически деформированы. Компоненты γ -структуры в литературе известны как структурный и слабоструктурный витрен (рис. 3).

Бесструктурные и скрытоструктурные компоненты обозначены Δ -структурой. Они при скрещенных николях в проходящем свете обнаруживают псевдо-структуру, обусловленную неодинаковой оптической анизотропией их вещества. Бесструктурные ткани при

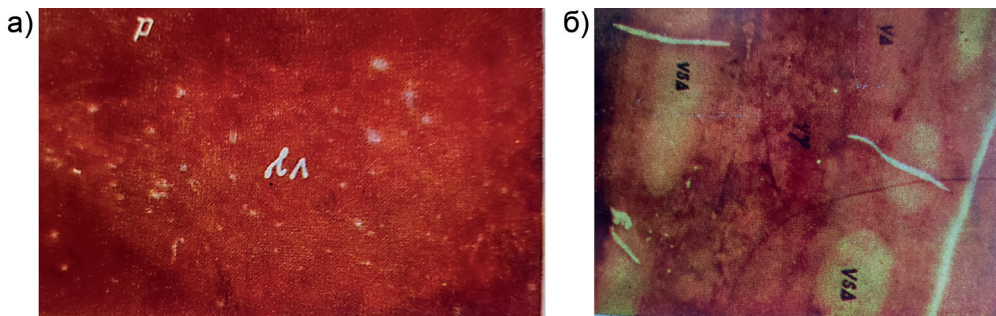


Рис. 3. Пласт K_{12} Разновидности витринита: γ -витринит (а); Δ -витринит с неоднородной окраской (б). Проходящий свет, без анализатора, увеличение $\times 250$ [создано авторами]

Fig. 3. Seam K_{12} Varieties of vitrinite: γ -vitrinite (a); Δ -vitrinite with heterogeneous coloration (b). Transmitted light, without analyzer, magnification $\times 250$ [created by the authors]

Таблица 1

Классификация органических микрокомпонентов пласта K_{12} и их обозначения [создано авторами]
Classification of organic microcomponents of seam K_{12} and their designations [created by the authors]

Исходный растительный материал	Группа витринита	Индекс V	Группа семивитринита	Индекс Sv	Группа semifюзинита	Индекс Sf	Группа физионита	Индексы F
Лигнино-целлюлозные ткани	α	$V\alpha$,	α	$sv\alpha$,	α -	sfa ,	α	fa ,
Стеблевые ткани	β	$V\beta$,	β	$sv\beta$,	β -	sfb ,	β	$f\beta$,
и листовая паренхима	γ	$V\gamma$	γ -	$sv\gamma$	γ -	sfg	γ	$f\gamma$
	Δ	$V\Delta$	Δ -	$sv\Delta$	Δ -	$sf\Delta$	Δ	$f\Delta$
Неопределимые растительные остатки	десминит	d		sd		sm		m

скрещенных николях остаются однородными. Классификация органических микрокомпонентов пласта K_{12} и их обозначения приведены в табл. 1.

Характеристика микрокомпонентов

Группа витринита. Компоненты образуются из лигниноцеллюлозных тканей растений-углеобразователей, которые прошли различную степень разложения в условиях сильно обводненных торфяников, вследствие чего не испытывали воздействия процессов первичного окисления (фюзенизации).

Содержание их в углях пласта K_{12} до 60%. Присутствуют они в виде крупных и мелких фрагментов, реже встречаются как цементирующие вещества.

Характерными особенностями компонентов группы витринита являются: прозрачность в шлифах, незначительная отражательная способность, низкий рельеф, повышенная хрупкость. В проходящем свете цвет их изменяется от оранжево-красного до красно-бурого, в отраженном свете они серые различных оттенков.

Витринит является основным носителем спекаемости, которая в углефикационном ряду изменяется по кривой с

максимумом на границе жирной и коксовой стадий.

По степени сохранности структуры растительных тканей, обусловленной преимущественно характером исходного материала и скоростью захоронения торфяника, выделяются α -, β -, γ - и Δ -витриниты.

α -Витринит представляет собой остатки растительных тканей с хорошо сохранившимся клеточным строением, несущим следы начальной стадии набухания (гелефикации). Цвет его в шлифах красный и буровато-красный, в аншлифах серый. Встречается в виде линз и обрывков, имеющих сравнительно четкий контур. Полости клеток округлые или овальные, иногда несколько сдавленные, чаще всего они выполнены минеральными примесями, реже пустые. В некоторых фрагментах наблюдается постепенный переход между α - и β -структурами.

β -Витринит — растительные ткани, прошедшие более глубокую стадию разложения, чем α -витринит. Полости клеток полузаплывшие или почти заплывшие. В некоторых фрагментах процесс набухания стенок клеток прошел неравномерно, в них наряду с почти заплывшими клетками имеются и полузаплыв-

шие. Цвет их в шлифах и аншлифах такой же, как и у α -витринита. Встречается β -витринит как в виде крупных, так и мелких линзочек и обрывков. Содержится он в угле в сравнительно небольшом количестве, хотя значительно преобладает над α -витринитом.

γ -Витринит — гелефицированные остатки растительных тканей, отличительной особенностью которых является наличие более или менее четко выраженной клеточной структуры при полном заполнении клеточных полостей аморфным органическим веществом, обычно иного, чем клеточные стенки, цвета. Как правило, последние по окраске несколько светлее (красновато-оранжевые), чем выполняющие клеточные полости вещество. Иногда встречаются фрагменты γ -витринита, у которых стенки клеток имеют красновато-бурый цвет или же полости клеток в них выполнены фюзенизированным веществом.

Характер структуры у этих компонентов бывает различным и зависит от ботанической принадлежности тканей, степени пластической деформации стенок клеток и плоскости среза (поперечной, продольной или тангентальной). Чаще всего стенки клеток имеют прямоугольную или овальную форму, иногда они образуют ломаные слегка волнистые линии, идущие вдоль или поперек фрагментов.

К γ -витриниту относятся также обрывки ткани, структура которых обусловлена наличием разных по размеру округло-овальных тел.

Под микроскопом структура довольно хорошо просматривается как в проходящем, так и в отраженном свете, и только с увеличением степени метаморфизма углей видимость ее постепенно теряется.

Фрагменты γ -витринита встречаются в угле в виде полосок различной ширины, реже в виде обрывков, которые име-

ют довольно четкий контур, благодаря которому они не сливаются с соседними гелифицированными компонентами. Для большинства карагандинских углей он, наряду с Δ -витринитом, является одним из основных компонентов группы витринита.

Δ -Витринит — это сильно разложившиеся растительные ткани, утратившие клеточное строение. Так же, как и γ -витринит, он имеет две разновидности: скрыто-структурную и бесструктурную (однородную). В первой структура может быть видна в проходящем свете со скрещенными николями или в аншлифах после травления смесью хромовой и серной кислот. Наблюдается он в угле в виде полосок различной ширины, иногда, особенно в пластах карагандинской и ашлярикской свит, не выдержанных по простиранию и расщепляющихся на тонкие волокна.

К особенностям Δ -витринита можно отнести наличие более или менее четкого контура и характерных трещин сокращения, располагающихся через определенные интервалы поперек фрагментов.

Цвет его в шлифах изменяется от красного различных оттенков до красно-бурого; в аншлифах, по сравнению с десминитом, имеет серый цвет более светлых оттенков.

Δ -Витринит является одним из основных компонентов группы витринита.

Десминит — продукт наиболее глубокого разложения растительных тканей, бесструктурный, однородный, иногда комковатый. В отличие от Δ -витринита не имеет четко выраженного контура и служит цементирующим веществом для других компонентов. Встречается в виде включений неправильных очертаний или комочков, размер которых редко превышает 50 мк.

В проходящем свете десминит красный и буро-красный, в отраженном свете — серый, при этом немного темнее по

Таблица 2

Спорово-пыльцевой состав каменного угля пласта K_{12} , % [создано авторами]
Spore—Pollen Composition of Hard Coal from the K_{12} Seam, % [created by the Authors]

Споры							Пыльца	
древние плауновые	плауновые	древние каламиты	каламиты	папоротники	птеридоспермовые	сфенофиллы	кордаиты	хвойные
0,5	20	0,9	3	22	51	0,8	0,5	1,3

окраске, чем Δ -витринит. Присутствует десминит в небольших количествах, при этом содержание его в углях верхних горизонтов резко уменьшается.

Результаты исследования показали, что угли пласта K_{12} содержат споры плауновых, папоротников, птеридоспермов, подчиненное значение имеют каламиты, сфенофиллы, хвойные и кордаиты (табл. 2). Причем вверх по разрезу отмечается постепенное увеличение пыльцы хвойных растений.

Содержание их в углях пласта K_{12} до 60%. Присутствуют они в виде крупных и мелких фрагментов, реже встречаются как цементирующие вещества.

α -Витринит (рис. 4) представляет собой остатки растительных тканей с хорошо сохранившимся клеточным строением, несущим следы начальной стадии набухания (гелефикации). Цвет его в шлифах красный и буровато-красный, в аншлифах серый. Встречается в виде линз и обрывков, имеющих сравнитель-

но четкий контур. Полости клеток округлые или овальные, иногда несколько сдавленные, чаще всего они выполнены минеральными примесями, реже пустые. В некоторых фрагментах наблюдается постепенный переход между α и β -структурами.

β -витринит характеризуется более глубокой степенью трансформации растительных тканей по сравнению с α -витринитом, что отражает более интенсивные процессы углефикации (рис. 5). В его структуре наблюдается значительное сокращение внутриклеточных полостей вследствие частичного или практически полного их заплывания продуктами преобразования органического вещества. В отдельных микрофрагментах отмечается неоднородность протекания процесса набухания клеточных стенок: наряду с почти полностью заплывшими клетками фиксируются участки с частично сохраненными просветами, что указывает на различную

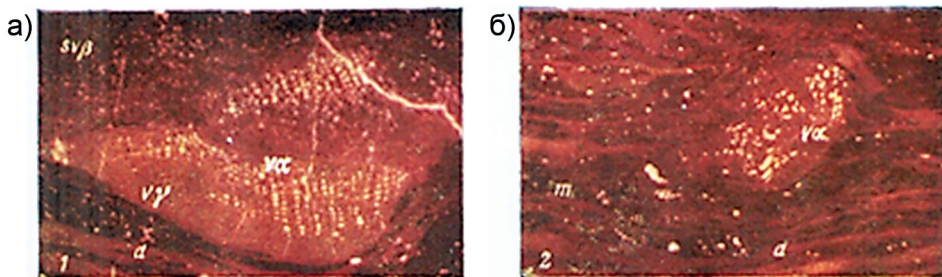


Рис. 4. Пласт K_{12} , шахта Абайская. Проходящий свет, без анализатора, увеличение $\times 250$; α -витринит, переходящий в $sv\beta$ -витринит и v -витринит, в нижнем левом углу десминит (d) (а); обрывок α -витринита в дурено-клареновом угле (d) (б) [создано авторами].

Fig. 4. K_{12} seam, Abayskaya Mine. Transmitted light, without analyzer, magnification $\times 250$: α -vitrinite transitioning into $sv\beta$ -vitrinite and v -vitrinite; desminite (d) in the lower left corner (a); fragment of α -vitrinite in durero-clarain coal (d) (b) [created by the authors]

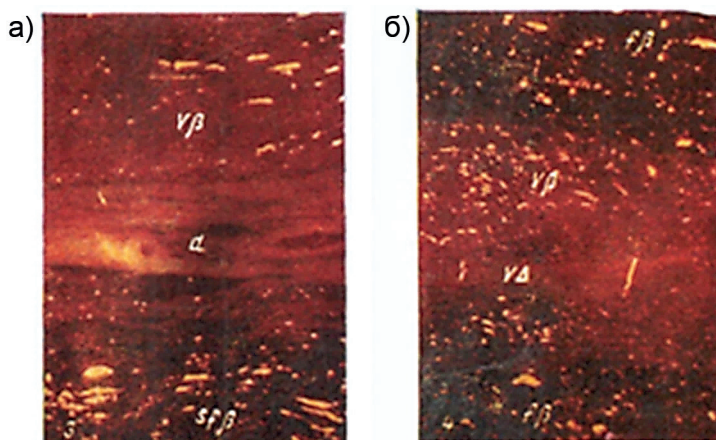


Рис. 5. Пласт K_{12} , шахта Абайская. Проходящий свет, без анализатора, увеличение $\times 250$; обрывок α -витринита в дюрено-клареновом угле (d) (a); $\gamma\beta$ -витринит (вверху), d-кларен, s $\beta\beta$ -семифузит в низу шлифа (б) [создано авторами]

Fig. 5. K_{12} seam, Abayskaya Mine. Transmitted light, without analyzer, magnification $\times 250$: fragment of α -vitrinite in durenno-clarain coal (d) (a); $\gamma\beta$ -vitrinite (upper part), d-clarain, and s $\beta\beta$ -semifusinite in the lower part of the thin section (b) [created by the authors]

интенсивность диагенетических изменений.

Оптические свойства β -витринита в шлифах и аншлифах близки к характеристикам α -витринита, однако микротекстура отличается большей неоднородностью и выраженной структурной дифференциацией. В угольной массе β -витринит встречается в виде линзовидных включений и обрывков различного размера — от мелких фрагментов до сравнительно крупных агрегатов. Несмотря на его относительно невысокую массовую долю в общем составе угля, по распространенности в микро-

структуре он существенно преобладает над α -витринитом, что свидетельствует о доминировании более продвинутых стадий преобразования исходного растительного материала.

γ -Витринит — гелефицированные остатки растительных тканей (рис. б), отличительной особенностью которых является наличие более или менее четко выраженной клеточной структуры при полном заполнении клеточных полостей аморфным органическим веществом, обычно иного, чем клеточные стенки, цвета. Как правило, последние по окраске несколько светлее (красно-

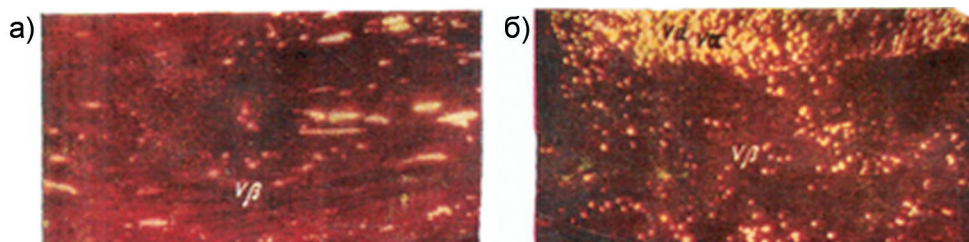


Рис. 6. Пласт K_{12} , шахта Саранская. Проходящий свет, без анализатора, увеличение $\times 250$; β -витринит (внизу десминит) (a); постепенный переход α -витринита в β -витринит (б) [создано авторами]

Fig. 6. K_{12} seam, Saranskaya Mine. Transmitted light, without analyzer, magnification $\times 250$: β -vitrinite (desminite at the bottom) (a); gradual transition of α -vitrinite into β -vitrinite (b) [created by the authors]

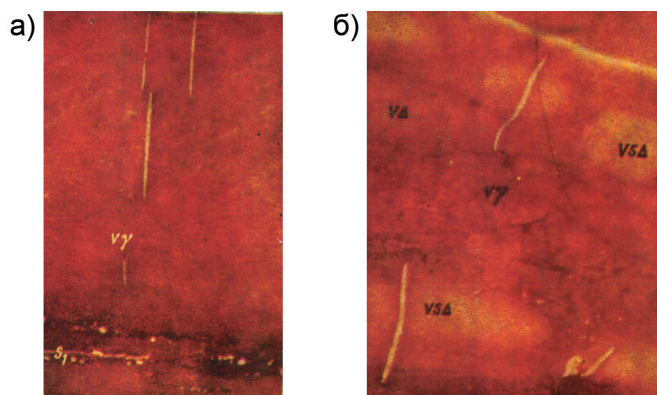


Рис. 7. Пласт K_{12} : шахта Абайская (а); шахта Тентекская (б); γ -витринит в ассоциации с Δ -витринитом и Δ -витринито-склеротинитом — крайне редкое сочетание для отложений карагандинской свиты. Проходящий свет, без анализатора, увеличение $\times 350$ [создано авторами]

Fig. 7. Seam K_{12} : Abayskaya Mine (a); Tentekskaya Mine (b); γ -vitrinite in association with Δ -vitrinite and Δ -vitrinite-sclerotinite, an assemblage extremely rare within the deposits of the Karaganda Formation. Transmitted light, without analyzer, magnification $\times 350$ [created by the authors]

вато-оранжевые), чем выполняющее клеточные полости вещество. Иногда встречаются фрагменты γ -витринита, у которых стенки клеток имеют красновато-бурый цвет, или же полости клеток в них выполнены фюзенизированным веществом.

Характер структуры у этих компонентов бывает различным и зависит он от ботанической принадлежности тканей, степени пластической деформации стенок клеток и плоскости среза (поперечной, продольной или тангентальной). Чаще всего стенки клеток имеют прямоугольную или овальную форму,

иногда они образуют ломаные слегка волнистые линии, идущие вдоль или поперек фрагментов.

В углях пласта K_{12} установлено присутствие γ -витринита в ассоциации с Δ -витринитом и Δ -витринито-склеротинитом, что является крайне редким сочетанием для отложений карагандинской свиты.

К γ -витриниту относятся также обрывки растительной ткани, структура которых обусловлена наличием различных по размеру округло-овальных тел, формирующих характерную текстурную неоднородность вещества (см. рис. 7).

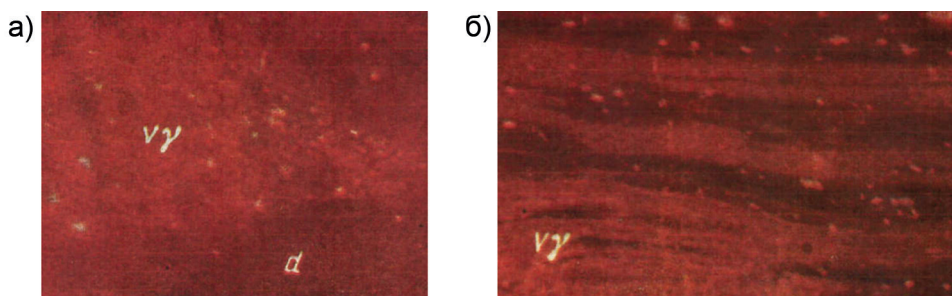


Рис. 8. Пласт K_{12} , шахта Абайская, γ -витринит. Проходящий свет, без анализатора, увеличение $\times 250$ [создано авторами]

Fig. 8. K_{12} seam, Abayskaya Mine. γ -vitrinite. Transmitted light, without analyzer, magnification $\times 250$ [created by the authors]

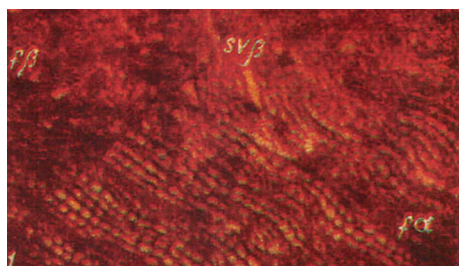


Рис. 9. α -Фюзенит, переходящий в β -фюзинит и β -семивитринит. Проходящий свет без анализатора, увеличение $\times 200$. Пласт K_{12} , шахта Карагандинская [создано авторами]

Fig. 9. α -fusinite transitioning into β -fusinite and β -semivitrinite. Transmitted light, without analyzer, magnification $\times 200$. K_{12} seam, Karagandinskaya Mine [created by the authors]

К γ -витриниту также отнесены фрагменты растительного материала с отчетливо выраженной микротекстурной неоднородностью, обусловленной присутствием включений различной морфологии и размеров, формирующих характерный ячеисто-пятнистый рисунок

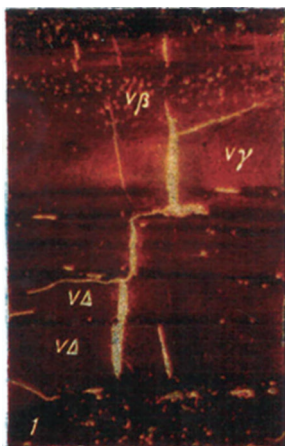


Рис. 10. Пласт K_{12} , шахта Дубовская. Проходящий свет без анализатора, увеличение $\times 200$. Линзовидные прослои Δ -витринита и γ -витринит, переходящий в β -витринит (уголь сильно восстановленный), с трещиноватой отдельностью [создано авторами]

Fig. 10. K_{12} seam, Dubovskaya Mine. Transmitted light, without analyzer, magnification $\times 200$: lens-shaped interlayers of Δ -vitrinite and γ -vitrinite transitioning into β -vitrinite (strongly reduced coal), with a pronounced fracture network [created by the authors]

вещества (рис. 8). На рис. 8, а в нижней части шлифа отмечен прослой десминита, на рис. 8, б — γ -витринит в дюренклареновом угле, в правом нижнем углу шлифа отмечен микринит (m).

Под микроскопом структура довольно хорошо просматривается как в проходящем, так и в отраженном свете, и только с увеличением степени метаморфизма углей видимость ее постепенно теряется.

Фрагменты γ -витринита встречаются в угле в виде полосок различной ширины (рис. 9), реже в виде обрывков, имеющих довольно четкий контур, благодаря которому они не сливаются с соседними гелифицированными компонентами. Для большинства карагандинских углей он, наряду с Δ -витринитом, является одним из основных компонентов группы витринита.

Δ -Витринит (рис. 10) — это сильно разложившиеся растительные ткани, утратившие клеточное строение. Так же, как и γ -витринит, он имеет две разновидности: скрыто-структурную и бесструктурную (однородную).

В первой разновидности структура может быть видна в проходящем свете со скрещенными николями или в аншлифах после травления смесью хромовой и серной кислот.

Δ -Витринит в угле наблюдается в виде полосок различной ширины, иногда, особенно в пластах карагандинской и ашляриксской свит, не выдержанных по простиранию и расщепляющихся на тонкие волокна (рис. 10).

Микроструктура γ -витринита в споровом (S1) клареновом угле пласта K_{12} (шахта Костенко) изучена в проходящем свете без анализатора. Витринитовая масса характеризуется сравнительно однородной оптической плотностью и выраженной микрослоистостью, обусловленной чередованием витринитовых и спорообогатенных прослоев. В преде-

лах витринитовой основы идентифицируется фрагмент спорангия, что свидетельствует о сохранности морфологических элементов исходного растительного материала. Наличие спорового компонента (S1) указывает на существенную роль спорофитной растительности в формировании органического вещества данного петротипа и отражает фациальные особенности торфонакопления.

Структурная организация γ -витринита, его ассоциация со споровыми включениями и характер распределения органических компонентов позволяют уточнить генетическую принадлежность кларенового угля и степень трансформации органического вещества в процессе диагенеза и последующего углеобразования. Выявленные микроструктурные признаки имеют значение для интерпретации условий седиментации, реконструкции палеоэкологической обстановки и прогноза технологических свойств угля (см. рис. 11).

В пределах пласта K_{12} (шахта Костенко) установлены характерные микроструктурные особенности спорового дюрена, отражающие специфику накопления и последующей трансформации органического вещества. В одном из образцов фиксируется скопление макро- и микроспор, формирующих плотную агрегированную текстуру, что свидетельствует о значительном участии споро-

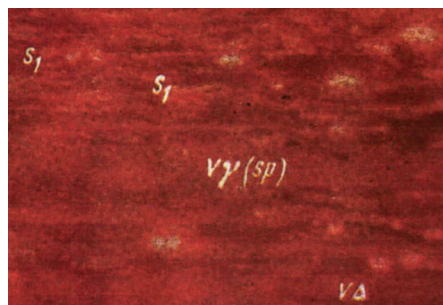


Рис. 11. Пласт K_{12} , шахта им. Костенко. Проходящий свет, без анализатора, увеличение $\times 540$; γ -витринит в споровом (S1) клареновом угле (с обрывком спорангия внутри) [создано авторами]

Fig. 11. K_{12} seam, Kostenko Mine. Transmitted light, without analyzer, magnification $\times 540$: γ -vitrinite in spore-bearing (S1) clarain coal, with a fragment of a sporangium inside [created by the authors]

фитного материала в составе угольной массы. Концентрация спор указывает на эпизодический характер поступления растительных остатков и определенную фациальную дифференциацию торфяной залежи.

В другом образце выявлены сферокристаллы графита, локализованные в органической матрице. Их присутствие может быть связано с локальными термодинамическими условиями преобразования органического вещества и отражает особенности метаморфических процессов в пределах угольного пласта. Формирование подобных структур свидетельствует о частичной перекристаллизации углеродистого вещества и ука-

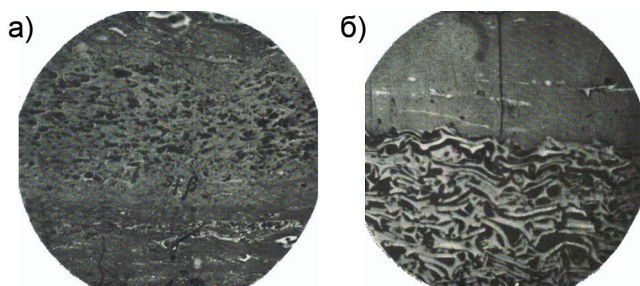


Рис. 12. Пласт K_{12} , шахта им. Костенко. Проходящий свет, без анализатора, увеличение $\times 540$; скопление макро- и микроспор в споровом дюрене (а); сферокристаллы графита (б) [создано авторами]

Fig. 12. K_{12} seam, Kostenko Mine. Transmitted light, without analyzer, magnification $\times 540$: accumulation of macro- and microspores in spore-bearing durain (a); spheroidal graphite crystals (b) [created by the authors]

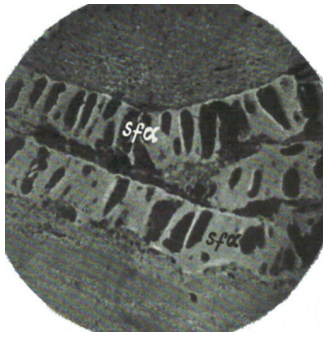


Рис. 13. Пласт K_{12} , увел. $\times 200$. Отраженный свет без анализатора. Линза семивитринита [создано авторами]

Fig. 13. K_{12} seam. Reflected light, without analyzer, magnification $\times 200$: lens-shaped semivitrinite [created by the authors]

зывает на повышенную степень структурной упорядоченности в отдельных микроучастках угля.

Представленные микроскопические признаки имеют значение для интерпретации условий углеобразования, оценки степени метаморфизма и прогнозирования физико-механических и технологических свойств угольного массива (рис. 12).

В образце угля пласта K_{12} в отраженном свете фиксируется линзовидное тело семивитринита, морфологически выделяющееся на фоне окружающей витринитовой матрицы. Объект имеет вытянутую форму с относительно четкими границами и ориентирован вдоль общей текстурной направленности угольной массы. Оптические характеристики семивитринита варьируют по интенсивности отражения, что указывает на внутреннюю неоднородность вещества и различную степень гелификации исходного растительного субстрата.

Внутренняя структура линзы представлена чередованием более светлых и темных участков, отражающих микрофациальную дифференциацию органического материала. Подобная конфигурация может быть связана с локальными изменениями условий осадконакопления

и последующей трансформации органического вещества в процессе диагенеза и углефикации. Линзовидное распределение семивитринита свидетельствует о неравномерном поступлении и аккумуляции растительных остатков в пределах торфяной залежи.

Установленные морфоструктурные особенности позволяют детализировать петрографическую характеристику угля, уточнить генетические особенности формирования витринитовых компонентов и оценить степень их преобразования на микроуровне (рис. 13).

В микроскопическом препарате угля пласта K_{12} в отраженном свете выявляются крупные линзовидные образования α -семивитринита, контрастно выделяющиеся на фоне окружающей органической массы. Они характеризуются повышенной отражательной способностью и сравнительно однородной внутренней структурой, при этом их форма преимущественно вытянута и согласована с общей текстурной направленностью угля.

В пределах этих линз отмечается наличие тонких прослоев микринита и семимикринита, представленных более темными и оптически плотными участками. Их распределение носит субпараллельный характер, что свидетельствует о микрофациальной дифференциации органического вещества и неоднородности условий его накопления. Повышенная концентрация микринитовых компонентов может указывать на локальные процессы окисления и переработки растительного материала на стадии торфообразования.

Совокупность выявленных структурных и оптических признаков отражает сложность процессов гелификации и инертинизации органического вещества, а также позволяет уточнить генетические особенности формирования данного петротипа угля и степень его метаморфических преобразований (рис. 14).

В отраженном свете фиксируются признаки структурной нарушенности инертнитовых компонентов, обусловленные постседиментационными деформационными процессами. На одном из микрофотоснимков представлен фрагмент α -семифузениита, разорванный и смещенный в результате микроподвижек внутри угольного массива. Развитие трещин и дислокаций свидетельствует о локальных напряжениях, сопровождавших уплотнение и последующую тектоническую переработку пласта.

В другом образце наблюдается α -семифузениит с нарушенной звездчатой (радиально-трещиноватой) структурой, а также десминит, содержащий включения мелких обрывков фузенизированных компонентов. Подобная текстурная организация отражает сложное сочетание процессов инертнизации, механического разрушения и вторичного перераспределения органического вещества. Наличие фрагментированных фузенизированных включений указывает на неоднократное воздействие деформационных факторов и свидетельствует о динамическом характере преобразования угольной массы.

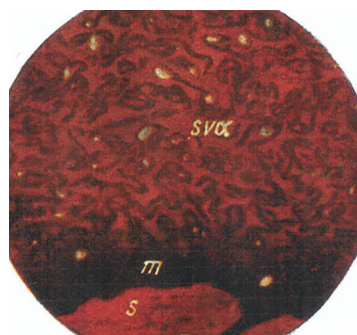


Рис. 14. Пласт K_{12} . Отраженный свет без анализатора, увел. $\times 200$. Крупные линзы α -семивитринита, с прослоями микринита и семимикринита [создано авторами]

Fig. 14. K_{12} seam. Reflected light, without analyzer, magnification $\times 200$: large lenses of α -semivitrinite with interlayers of micrinite and semi-micrinite [created by the authors]

Выявленные микроструктурные особенности позволяют уточнить степень структурной нарушенности пласта, оценить влияние тектонических и диагенетических процессов на инертнитовые компоненты и интерпретировать условия формирования угля на микроуровне (рис. 15).

Наблюдается внутримассовая неоднородность витринитовой составляющей, проявляющаяся в постепенном переходе

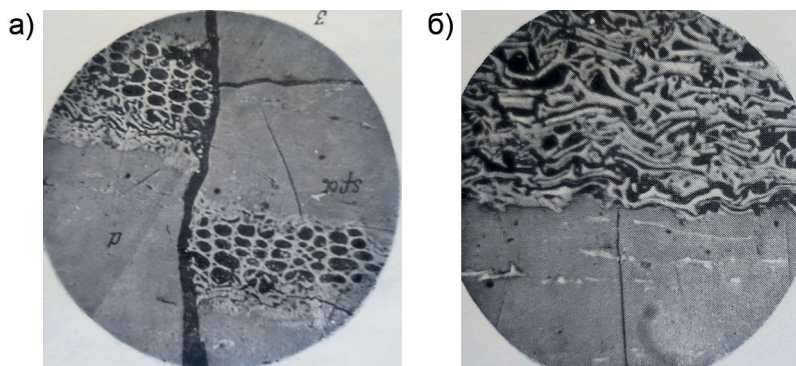


Рис. 15. Пласт K_{12} . Отраженный свет без анализатора, увел. $\times 200$; фрагмент α -семифузениита, разорванный в результате микроподвижек в пласте K_{12} (а); α -семифузениит с нарушенной звездчатой структурой и десминит с включением мелких обрывков фузенизированных компонентов (б) [создано авторами]

Fig. 15. K_{12} seam. Reflected light, without analyzer, magnification $\times 200$: fragment of α -semifusinite disrupted as a result of micro-movements within the K_{12} seam (a); α -semifusinite with a disturbed stellate structure and desminite containing inclusions of small fragments of fusinized components (b) [created by the authors]

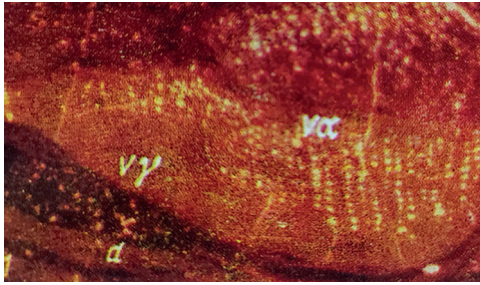


Рис. 16. Пласт K_{12} : α -витринит, переходящий в β - и γ -витринит. Проходящий свет, без анализатора, увеличение $\times 250$ [создано авторами]

Fig. 16. K_{12} seam. α -vitrinite transitioning into β - and γ -vitrinite. Transmitted light, without analyzer, magnification $\times 250$ [created by the authors]

де α -витринита к β - и γ -разновидностям. В пределах одного микрофрагмента фиксируется изменение оптической плотности, оттенка и текстурных особенностей, что отражает различную степень преобразования органического вещества.

α -Витринит отличается более равномерной структурой и сравнительно устойчивыми оптическими характеристиками, тогда как β - и γ -витринит характеризуются усиленной микротекстурной дифференциацией и большей изменчивостью окраски. Переходные зоны не имеют четко выраженных границ и формируют плавные контакты, что свидетельствует о континуальном характере гелификации и метаморфических преобразований.

Наблюдаемая микроструктурная изменчивость указывает на сложность процессов углеобразования и неоднородность условий диагенеза в пределах пласта. Выявленные особенности позволяют детализировать петрографическую классификацию витринитовых компонентов и уточнить их генетическую интерпретацию (рис. 16).

В проходящем свете десминит и α -витринит, с прослоями микринита и семивитринита имеют цвет красный или буро-красный, в отраженном свете — серый, при этом немного темнее по

окраске, чем Δ -витринит. Присутствует десминит в небольших количествах, при этом содержание его в углях верхних горизонтов резко уменьшается.

Наблюдается фрагмент водорослевого происхождения, отнесенный к *Pila* sp., что подтверждается характерной слоисто-складчатой морфологией и выраженной внутренней структурной организацией. Органический остаток представлен вытянутым телом с волнистой текстурой и отчетливо дифференцированной внутренней зональностью, отражающей особенности строения таллома.

В отраженном свете без анализатора структура демонстрирует контраст между более плотными и менее плотными участками органического вещества, что может быть связано с неоднородностью состава и различной степенью преобразования первичной биомассы.

Сохранность морфологических признаков свидетельствует о сравнительно благоприятных условиях захоронения и последующей консервации растительного материала в торфяной залежи.

Споро-пыльцевой комплекс пласта K_{12} характеризуется преобладанием наземной болотной флоры ликопсидного типа. Признаков массового развития гидрофитной растительности не установлено. Полученные данные свидетельствуют о формировании торфяной залежи преимущественно в условиях заболоченной низменности без значительного влияния открытых водоемов (рис. 17).

Выявленные включения *Pila* sp. характеризуются четко выраженной морфологической структурой и высокой степенью сохранности, что свидетельствует о быстрой изоляции органического материала в торфяной среде и минимальной степени механического перераспределения. Их присутствие отражает разнообразие исходного биогенного субстрата и подтверждает сложный состав органического вещества пласта K_{12} .

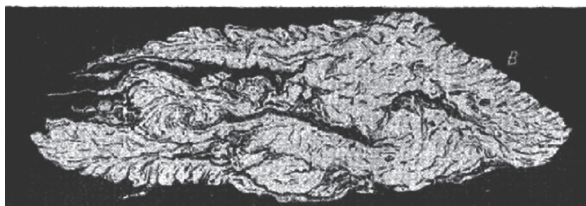


Рис. 17. Пласт K_{12} . Отраженный свет без анализатора, увел. $\times 270$. Водоросль *Pila* sp., прозрачный шлиф, николи параллельны

Fig. 17. K_{12} seam. Reflected light, without analyzer, magnification $\times 270$: alga *Pila* sp., transparent thin section, crossed nicols parallel

Эпизодическое распространение данных компонентов не оказывает существенного влияния на общий гумусовый тип углей, однако фиксирует локальные изменения условий осадконакопления.

Заключение

Комплексное петрографическое и споро-пыльцевое исследование углей пласта K_{12} позволило уточнить генетическую модель формирования данного продуктивного горизонта Карагандинского угольного бассейна. Установлено, что пласт сформирован в условиях континентально-болотной равнины паралического типа в визейско-серпуховское время при преимущественно низинном торфонакоплении.

Преобладание витринитовой группы мацералов при развитии семивитринитовых и семифузенитовых компонентов свидетельствует о доминировании автохтонного накопления растительного материала с локальными проявлениями аллохтонного перераспределения. Чередование структурных разновидностей витринита (α , β , γ и Δ) отражает вариации водонасыщенности торфяника и смену восстановительных и умеренно окислительных условий. Повышенное содержание инертинитовых компонентов фиксирует эпизоды аэрации и частичной дегградации растительного вещества.

Наличие переходных форм между структурными типами мацералов указывает на непрерывность углефикацион-

ных преобразований в пределах пласта и высокую чувствительность органического вещества к локальным фаціальным изменениям. Зафиксированное присутствие микринита, семимикринита и единичных сапропелевых включений (*Pila* sp.) свидетельствует о преимущественно гумусовом характере торфонакопления с эпизодическим участием водной растительности без формирования устойчивой гидрофитной фазы.

Споро-пыльцевой комплекс, характеризующийся преобладанием папоротниковых и птеридоспермов при подчиненной роли плауновых и каламитов, отражает развитие древесно-папоротниковых болот умеренно влажного климата. Наблюдаемое увеличение доли хвойной пыльцы вверх по разрезу свидетельствует о постепенной трансформации растительного покрова и климатических условий в позднем раннем карбоне.

Горизонт K_{12} представляет собой продукт гумусового торфонакопления в пределах устойчивой заболоченной равнины с колеблющимся уровнем грунтовых вод и периодическими фазами аэрации. Установленные генетические особенности обусловили петрографическую неоднородность углей и определяют вариабельность их физико-механических и технологических свойств.

Установленная петрографическая неоднородность углей пласта K_{12} Карагандинского угольного бассейна является

одним из ключевых структурно-вещественных факторов, определяющих склонность массива к пучению. Вариации мацерального состава, степень гелефикации и микроструктурная дифференциация витринита напрямую влияют на модуль деформации, предел текучести и параметры длительной прочности угля. Их учет в расчетах напряженно-деформированного состояния позволяет более корректно прогнозировать ползучесть, предельные деформации и устойчивость почвы выработок на глубоких горизонтах.

Полученные данные имеют принципиальное значение для интерпретации механизмов пучения в подготовительных и очистных выработках, поскольку

связывают геомеханическое поведение массива с его вещественным составом и структурной анизотропией. Следовательно, интеграция петрографических данных в систему прогноза горного давления и разработки мероприятий по активному креплению и управлению состоянием массива является необходимым условием повышения устойчивости выработок и снижения интенсивности пучения пород в условиях Карагандинского бассейна.

Полученные результаты имеют прикладное значение при прогнозировании качества угольного сырья, оценке его технологической пригодности и планировании разработки глубоких горизонтов Карагандинского угольного бассейна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Замалиев Н. М., Мусин Р. А., Ахматнуров Д. Р., Рабатулы М., Ганюков Н. Ю. Перспективы и проблемы заблаговременного извлечения метана из угольных пластов Карагандинского угольного бассейна // Уголь. — 2025. — № 9. — С. 100–105. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-9-100-105.

2. Пронина Н. В., Стукалова И. Е., Савельева Е. В., Панышев С. Г. Мацеральный состав углей каменноугольных месторождений Восточно-Европейской платформы // Георесурсы. — 2025. — Т. 27. — № 2. — С. 174–185. DOI: 10.18599/grs.2025.2.14.

3. Korbayeva A., Bidauletova I., Amangeldikyzy A., Askarova N. Trace elements distribution in the K7 seam of the Karaganda Coal Basin, Kazakhstan // Geosciences. 2024, vol. 14, article 143. DOI: 10.3390/geosciences14060143.

4. Dzhunusov M., Tarikhov F., Abildakhenov A., Zhanaidar D., Mekenbek G., Assambaeva A. Mineralogical and elemental analysis of Kazakh coals from three mines: Preliminary conclusions on depositional patterns and environmental impact // Open Geosciences. 2022, vol. 14, article 0721. DOI: 10.1515/geo-2022-0721.

5. Safaei-Farouji M., Misch D., Sachsenhofer R. F., Kostoglou N., Gaus G., Bauersachs T., Junussov M., Fustic M. CO₂ utilization and sequestration potential in deep coal seams: A case study on Carboniferous coals from the Karaganda Basin, Kazakhstan // Journal of CO₂ Utilization. 2025, vol. 101, article 103204. DOI: 10.1016/j.jcou.2025.103204.

6. Karbownik M., Krawczyk J., Godyń K., Schlieter T., Ščučka J. Analysis of the influence of coal petrography on the sorption characteristics of hard coal from the Upper Silesian Coal Basin // Energies. 2021, vol. 14, no. 24, article 8495. DOI: 10.3390/en14248495.

7. Заостровский А. Н., Журавлева Н. В., Потокина Р. Р., Грабовая Н. А., Исмагилов З. Р. Petrographic analysis of coals of the Pechora basin // Химия в интересах устойчивого развития. — 2015. — Т. 23. — № 2. — С. 131–134. DOI: 10.15372/KhUR20150204.

8. Ribeiro J., Suárez-Ruiz I., Ward C. R., Flores D. Petrography and mineralogy of self-burning coal wastes from anthracite mining in the El Bierzo Coalfield (NW Spain) // International Journal of Coal Geology. 2016, vol. 154–155, pp. 92–106. DOI: 10.1016/j.coal.2015.12.011.

9. Скурский М. Д. О вещественном (петрографическом) составе углей // Техника и технология горного дела. — 2022. — № 1 (16). — С. 31–82. DOI: 10.26730/2618-7434-2022-1-31-82.

10. Заостровский А. Н., Исмагилов З. Р. Петрографический метод оценки технологических свойств углей // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2021. — № 2. — С. 53–61. DOI: 10.26730/1999-4125-2021-2-53-61.
11. Yuan Y., Tang Y., Tong L., Cao D., Wei Y., Bi C. Porosity characteristics of coal seams and the control mechanisms of coal petrology in the Xishanyao Formation in the western part of the southern Junggar Basin // *Minerals*. 2024, vol. 14, no. 6, article 543. DOI: 10.3390/min14060543.
12. Esen O., Fişne A. A comprehensive study on methane adsorption capacities and pore characteristics of coal seams: Implications for efficient coalbed methane development in the Soma Basin, Türkiye // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2024, vol. 57, pp. 6355–6375. DOI: 10.1007/s00603-024-03854-1.
13. Li C., Xu G., Yao H., Xin C., Liu F. Changes in pore structure and gas adsorption characteristics of coal under HVEP treatment and their effects on gas desorption behavior // *Processes*. 2025, vol. 13, no. 6, article 1662. DOI: 10.3390/pr13061662.
14. Zhou X., Hou H., Li H. Influence of coalification on pore structure evolution in middle-ranked coals // *Frontiers in Earth Science*. 2023, vol. 11, article 1139852. DOI: 10.3389/feart.2023.1139852.
15. Li Z., Zhao W., Li C., Fan Z., Xian L., Chen M. Coal petrography characteristics and coal facies constraints of Kezilenur Formation coal seams in the northern tectonic belt of Kuqa Depression // *Coal Science and Technology*. 2025, vol. 53, no. 3, pp. 124–138. DOI: 10.12438/cst.2024-1836.
16. Valentin B. Petrography of coal combustion char: A review // *Fuel*. 2020, vol. 277, article 118271. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.118271.
17. Cheng W., Yang R., Zhang Q. Origin of a petrographic coal structure and its implication for coalbed methane evaluation // *Minerals*. 2020, vol. 10, article 543. DOI: 10.3390/min10060543.
18. Han Y., Liu Y. Advanced petrographic thin section segmentation through deep learning-integrated adaptive GLFIF // *Computers & Geosciences*. 2024, vol. 193, article 105713. DOI: 10.1016/j.cageo.2024.105713.
19. Back A. L., Kana Tepakbong C., Bédard L. P., Barry A. From rocks to pixels: A comprehensive framework for grain shape characterization through image analysis of roundness and roughness descriptors // *Frontiers in Earth Science*. 2025, vol. 13, article 1634237. DOI: 10.3389/feart.2025.1634237.
20. Cornard P. H., Degenhart G., Tropper P., Moernaut J., Strasser M. Application of micro-CT to resolve textural properties and assess primary sedimentary structures of deep-marine sandstones // *The Depositional Record*. 2024, vol. 10, no. 5, pp. 559–580. DOI: 10.1002/dep2.261.
21. Aldi Ç., Yarıo O. Investigation of the effect of mineralogical and petrographic properties of coal surrounding rocks in the Zonguldak Basin on grindability and excavability // *Arabian Journal of Geosciences*. 2025, vol. 18, article 202. DOI: 10.1007/s12517-025-12360-9.
22. Jin H., Cao L., Kan X., Sun W., Yao W., Wang X. Coal petrography extraction approach based on multiscale mixed-attention-based residual U-net // *Measurement Science and Technology*. 2022, vol. 33, no. 7, article 075402. DOI: 10.1088/1361-6501/ac5439. **PLoS**

REFERENCES

1. Zamaliev N. M., Musin R. A., Akhmatnurov D. R., et al. Prospects and problems of advance methane extraction from coal seams of the Karaganda Coal Basin. *Ugol'*. 2025, no. 9, pp. 100–105. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-9-100-105.
2. Pronina N. V., Stukalova I. E., Savelyeva E. V., Panyshev S. G. Maceral composition of coals from Carboniferous deposits of the East European Platform. *Georesursy*. 2025, vol. 27, no. 2, pp. 174–185. [In Russ]. DOI: 10.18599/grs.2025.2.14.
3. Kopobayeva A., Baidautlova I., Amangeldikyzy A., Askarova N. Trace elements distribution in the K7 seam of the Karaganda Coal Basin, Kazakhstan. *Geosciences*. 2024, vol. 14, article 143. DOI: 10.3390/geosciences14060143.
4. Dzhunusov M., Tarikhov F., Abildakhenov A., Zhanaidar D., Mekenbek G., Assambaeva A. Mineralogical and elemental analysis of Kazakh coals from three mines: Preliminary conclusions on depositional patterns and environmental impact. *Open Geosciences*. 2022, vol. 14, article 0721. DOI: 10.1515/geo-2022-0721.
5. Safaei-Farouji M., Misch D., Sachsenhofer R. F., Kostoglou N., Gaus G., Bauersachs T., Junussov M., Fustic M. CO₂ utilization and sequestration potential in deep coal seams: A case study

on Carboniferous coals from the Karaganda Basin, Kazakhstan. *Journal of CO₂ Utilization*. 2025, vol. 101, article 103204. DOI: 10.1016/j.jcou.2025.103204.

6. Karbownik M., Krawczyk J., Godyń K., Schlieter T., Ščučka J. Analysis of the influence of coal petrography on the sorption characteristics of hard coal from the Upper Silesian Coal Basin. *Energies*. 2021, vol. 14, no. 24, article 8495. DOI: 10.3390/en14248495.

7. Zaostrovskiy A. N., Zhuravleva N. V., Potokina R. R., Grabovaya N. A., Ismagilov Z. R. Petrographic analysis of coals of the Pechora Basin. *Chemistry for Sustainable Development*. 2015, vol. 23, no. 2, pp. 131–134. [In Russ]. DOI: 10.15372/KhUR20150204.

8. Ribeiro J., Suárez-Ruiz I., Ward C. R., Flores D. Petrography and mineralogy of self-burning coal wastes from anthracite mining in the El Bierzo Coalfield (NW Spain). *International Journal of Coal Geology*. 2016, vol. 154–155, pp. 92–106. DOI: 10.1016/j.coal.2015.12.011.

9. Skurskiy M. D. On the material (petrographic) composition of coals. *Journal of mining and geo-technical engineering*. 2022, no. 1 (16), pp. 31–82. [In Russ]. DOI: 10.26730/2618-7434-2022-1-31-82.

10. Zaostrovskiy A. N., Zhuravleva N. V., Potokina R. R., Grabovaya N. A., Ismagilov Z. R. Petrographic analysis of coals of the Pechora Basin. *Chemistry for Sustainable Development*. 2021, no. 2, pp. 53–61. [In Russ]. DOI: 10.26730/1999-4125-2021-2-53-61.

11. Yuan Y., Tang Y., Tong L., Cao D., Wei Y., Bi C. Porosity characteristics of coal seams and the control mechanisms of coal petrology in the Xishanyao Formation in the western part of the southern Junggar Basin. *Minerals*. 2024, vol. 14, no. 6, article 543. DOI: 10.3390/min14060543.

12. Esen O., Fişne A. A comprehensive study on methane adsorption capacities and pore characteristics of coal seams: Implications for efficient coalbed methane development in the Soma Basin, Türkiye. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2024, vol. 57, pp. 6355–6375. DOI: 10.1007/s00603-024-03854-1.

13. Li C., Xu G., Yao H., Xin C., Liu F. Changes in pore structure and gas adsorption characteristics of coal under HVEP treatment and their effects on gas desorption behavior. *Processes*. 2025, vol. 13, no. 6, article 1662. DOI: 10.3390/pr13061662.

14. Zhou X., Hou H., Li H. Influence of coalification on pore structure evolution in middle-ranked coals. *Frontiers in Earth Science*. 2023, vol. 11, article 1139852. DOI: 10.3389/feart.2023.1139852.

15. Li Z., Zhao W., Li C., Fan Z., Xian L., Chen M. Coal petrography characteristics and coal facies constraints of Kezilenur Formation coal seams in the northern tectonic belt of Kuqa Depression. *Coal Science and Technology*. 2025, vol. 53, no. 3, pp. 124–138. DOI: 10.12438/cst.2024-1836.

16. Valentim B. Petrography of coal combustion char: A review. *Fuel*. 2020, vol. 277, article 118271. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.118271.

17. Cheng W., Yang R., Zhang Q. Origin of a petrographic coal structure and its implication for coalbed methane evaluation. *Minerals*. 2020, vol. 10, article 543. DOI: 10.3390/min10060543.

18. Han Y., Liu Y. Advanced petrographic thin section segmentation through deep learning-integrated adaptive GLFIF. *Computers & Geosciences*. 2024, vol. 193, article 105713. DOI: 10.1016/j.cageo.2024.105713.

19. Back A. L., Kana Tepakbong C., Bédard L. P., Barry A. From rocks to pixels: A comprehensive framework for grain shape characterization through image analysis of roundness and roughness descriptors. *Frontiers in Earth Science*. 2025, vol. 13, article 1634237. DOI: 10.3389/feart.2025.1634237.

20. Cornard P. H., Degenhart G., Tropper P., Moernaut J., Strasser M. Application of micro-CT to resolve textural properties and assess primary sedimentary structures of deep-marine sandstones. *The Depositional Record*. 2024, vol. 10, no. 5, pp. 559–580. DOI: 10.1002/dep2.261.

21. Aldı Ç., Yaralı O. Investigation of the effect of mineralogical and petrographic properties of coal surrounding rocks in the Zonguldak Basin on grindability and excavability. *Arabian Journal of Geosciences*. 2025, vol. 18, article 202. DOI: 10.1007/s12517-025-12360-9.

22. Jin H., Cao L., Kan X., Sun W., Yao W., Wang X. Coal petrography extraction approach based on multiscale mixed-attention-based residual U-net. *Measurement Science and Technology*. 2022, vol. 33, no. 7, article 075402. DOI: 10.1088/1361-6501/ac5439.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Замалиев Наиль Муратович¹ – PhD,
исполняющий обязанности ассоциированного профессора,
e-mail: nailzamaliev@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-0628-2654,

Кряжева Татьяна Владимировна — канд. геол.-минерал. наук, доцент, Жезказганский университет имени О.А. Байконурова, Жезказган, Республика Казахстан, e-mail: kryazheva_t@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-2804-020X,
*Мусин Рустам Абдрашитович*¹ — PhD, исполняющий обязанности ассоциированного профессора, e-mail: R.A.Mussin@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-1206-6889,
*Ахматнуров Денис Рамильевич*¹ — PhD, зав. лабораторией, e-mail: d.akhmatnurov@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-9485-3669,
*Садчиков Александр Викторович*¹ — канд. техн. наук, старший преподаватель, e-mail: a.sadchikov@kstu.kz, ORCID ID: 0000-0002-6022-2073,
¹ Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Караганда, Республика Казахстан.
Для контактов: Мусин Р.А., e-mail: R.A.Mussin@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*N.M. Zamaliyev*¹, PhD, Acting Associate Professor, e-mail: nailzamaliyev@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-0628-2654,
T.V. Kryazheva, Cand. Sci. (Geol. Mineral.), Associate Professor, O.A. Baikonurov Zhezkazgan University, Zhezkazgan, Republic of Kazakhstan, e-mail: kryazheva_t@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-2804-020X,
*R.A. Mussin*¹, PhD, Acting Associate Professor, e-mail: R.A.Mussin@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-1206-6889,
*D.R. Akhmatnurov*¹, PhD, Head of Laboratory, e-mail: d.akhmatnurov@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-9485-3669,
*A.V. Sadchikov*¹, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer, e-mail: a.sadchikov@kstu.kz, ORCID ID: 0000-0002-6022-2073,
¹ Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100027, Republic of Kazakhstan.
Corresponding author: R.A. Mussin, e-mail: R.A.Mussin@mail.ru.

Получена редакцией 14.01.2026; получена после рецензии 13.02.2026; принята к печати 10.06.2026.
Received by the editors 14.01.2026; received after the review 13.02.2026; accepted for printing 10.06.2026.

