

КОНЦЕНТРИРОВАНИЕ МИНЕРАЛОВ- ИНДИКАТОРОВ ИЗ НЕФТЯНЫХ ПОРОД-КОЛЛЕКТОРОВ МЕТОДОМ ВЫСОКОГРАДИЕНТНОЙ МАГНИТНОЙ СЕПАРАЦИИ

Т. Н. Александрова¹, Н. В. Николаева¹, В. В. Кузнецов¹, А. В. Афанасова¹, А. О. Ромашев¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург,
199106, Россия, e-mail: Nikolaeva_nv@pers.spmi.ru

Аннотация: В условиях растущего потребления углеводородов и истощения известных месторождений разработка новых методов разведки и оценки залежей, особенно в сложных геологических условиях, приобретает особую актуальность. Данная работа посвящена обоснованию применения высокоградиентной магнитной сепарации для концентрирования минералов-индикаторов в породах-коллекторах как геохимических маркеров глубинной нефти. Объектом исследования стали образцы керна пород-коллекторов Нерутынского месторождения, отобранные с глубин 2833,77–2833,97 м (К 3.2), 2920,86–2921,0 м (К 4.1) и 3911,14–3911,4 м (К 1.4). Исследования подтвердили эффективность высокоградиентной магнитной сепарации для извлечения магнитной фракции и концентрирования микроэлементов (ванадий, никель, стронций, рубидий, титан), являющихся важными индикаторами нефтидогенеза. Установлена корреляция между содержанием этих элементов и глубиной залегания образцов, что позволяет интерпретировать геохимические изменения в разрезе и их влияние на образование и миграцию углеводородов. Выявленная взаимосвязь между элементным составом и физико-химическими условиями углубляет понимание термодинамических процессов в земной коре и открывает новые перспективы для разведки и разработки нефтяных месторождений в сложных геологических условиях. Концентрирование микроэлементов с помощью высокоградиентной магнитной сепарации повышает точность геохимического анализа и может стать перспективным направлением для поиска глубинной нефти.

Ключевые слова: высокоградиентная магнитная сепарация, ванадий, никель, микроэлементы, глубинная нефть, керны, геохимические индикаторы.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания «Исследование термодинамических процессов Земли с позиции генезиса углеводородов на больших глубинах» FSRW – 2024–0008.

Для цитирования: Александрова Т. Н., Николаева Н. В., Кузнецов В. В., Афанасова А. В., Ромашев А. О. Концентрирование минералов-индикаторов из нефтяных пород-коллекторов методом высокоградиентной магнитной сепарации // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 11-1. – С. 220–239. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_111_0_220.

Concentration of indicator minerals from oil reservoir rocks by high gradient magnetic separation

T. N. Aleksandrova¹, N. V. Nikolaeva¹, V. V. Kuznetsov¹, A. V. Afanasova¹, A. O. Romashev¹

¹ Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, St. Petersburg, 199106, Russia,
e-mail: Nikolaeva_nv@pers.spmi.ru

Abstract: In the conditions of growing consumption of hydrocarbons and exhaustion of known fields, the development of new methods of exploration and evaluation of deposits, especially in complex geologic conditions, becomes especially urgent. This work is devoted to substantiation of application of high-gradient magnetic separation (HGMS) for concentration of indicator minerals in reservoir rocks as geochemical markers of deep oil. The object of the study were core samples of reservoir rocks of the Nerutynskoye field taken from depths of 2833.77–2833.97 m (K 3.2), 2920.86–2921.0 m (K 4.1) and 3911.14–3911.4 m (K 1.4). The studies confirmed the efficiency of VGMS for extraction of magnetic fraction and concentration of trace elements (vanadium, nickel, strontium, rubidium, titanium), which are important indicators of naphthidogenesis. The correlation between the content of these elements and the depth of occurrence of samples was established, which allows us to interpret geochemical changes in the section and their influence on the formation and migration of hydrocarbons. The revealed relationship between elemental composition and physicochemical conditions deepens the understanding of thermodynamic processes in the Earth's crust and opens new prospects for exploration and development of oil fields in complex geological conditions. Concentration of trace elements by means of HGMS increases the accuracy of geochemical analysis and can become a promising direction for the search for deep oil.

Key words: high-gradient magnetic separation, vanadium, nickel, trace elements; naphthidogenesis; deep-sea oil, cores, geochemical indicators.

Acknowledgements: The work was performed within the framework of the state assignment "Investigation of thermodynamic processes of the Earth from the position of hydrocarbon genesis at great depths" FSRW – 2024–0008.

For citation: Aleksandrova T. N., Nikolaeva N. V., Kuznetsov V. V., Afanasova A. V., Romashev A. O. Concentration of indicator minerals from oil reservoir rocks by high gradient magnetic separation. *M.I.A.B. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(11-1):220–239. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_111_0_220.

Введение

Ежегодное увеличение спроса на углеводороды привело к необходимости проводить постоянную доразведку и вовлекать в разработку все новые и новые месторождения [1–3]. В сложившейся ситуации разработка и совершенствование технологий поиска и разведки месторождений углеводородов, в том числе на больших глубинах и в сложных геологических условиях, является достаточно актуальным направлением [4–6].

Определение наличия глубинной нефти нередко опирается на анализ минеральных включений, образующихся при миграции углеводородов и их взаимодействии с горными породами. Флюидные включения в кварце, кальците, доломите, барите и сульфатах (ангидрите) захватывают мигрирующие нефть и газ вместе с сопутствующими водными фазами, фиксируя их состав и термобарические условия формирования минералов [7–10]. Наличие жидких или газовых углеводородов

в таких включениях указывает на стадии насыщения порового пространства и помогает отличить локальное образование нефти от её миграции из глубоких горизонтов. Помимо флюидных фаз, важны битуминозные включения — микрокапсулы смол и асфальтенов, формирующиеся при катагенезе тяжёлых углеводородов в условиях высоких температур и давлений. Эти органогенные структуры нередко обнаруживаются во вмещающих породах и свидетельствуют о глубинном происхождении нефти, а их изотопно-элементный состав позволяет уточнить пути миграции и источники углеводородов [11–15].

Помимо этих исследований, необходимо учитывать геохимические индикаторы, такие как содержание ванадия, никеля, титана и других микроэлементов, которые могут предоставить дополнительную ценную информацию о местах локализации и процессах формирования и эволюции углеводородов [16–18]. Например, высокие уровни ванадия и никеля могут сигнализировать о взаимодействии углеводородов с определёнными типами органического вещества, что позволяет восстановить условия катагенеза [19–21]. Но для более точного анализа критически важно концентрировать минералы из пород-коллекторов [22–23]. При этом высокая дисперсность тонковкрапленных минералов в породах-коллекторах и их низкое содержание ограничивают эффективность традиционных способов обогащения [24]. Традиционно для извлечения ценных компонентов (ванадий, никель, титан и пр.) из углеродсодержащего сырья используют классические методы обогащения: флотационное, гравитационное и магнитное обогащение [25–26]. Гравитационное обогащение малоэффективно при размерах частиц менее

50 мкм и при разнице в плотности разделяемых минералов менее 0,1 г/см³; флотационное обогащение требует реализации сложных схем, высокого расхода реагентов и многоступенчатого контроля pH из-за присутствия органического вещества и карбонатов, которые адсорбируют коллоидами реагенты и снижают извлечение. Магнитная сепарация в слабом и сильном поле не позволяет выделить слабомагнитные или парамагнитные минералы. Это снижает выход и репрезентативность концентратов, затрудняя последующий геохимический анализ.

Для концентрирования тонковкрапленных минералов с исходным низким содержанием можно использовать высокоградиентную магнитную сепарацию (ВГМС) [27]. Метод обеспечивает высокую степень извлечения при сохранении структуры и вещественного состава минеральных фаз, работает как в сухом, так и в мокром режимах. ВГМС обеспечивает получение концентратов с повышенным содержанием минералов-носителей ванадия, никеля, титана и других микроэлементов-индикаторов, что создаёт основу для последующего более точного геохимического анализа процессов нефтидогенеза и миграции углеводородов.

Соответственно, цель работы заключалась в обосновании возможности применения высокоградиентной магнитной сепарации для концентрирования минералов-индикаторов из пород-коллекторов как потенциальных геохимических маркеров наличия глубинной нефти.

Материалы и методы исследования

Объектами исследования являлись образцы кернов пород-коллекторов нефтяного месторождения Нерутыньское с глубин отбора: 2833,77–2833,97 м

(К 3.2), 2920,86–2921,0 м (К 4.1) и 3911,14–3911,4 м (К 1.4) (рис. 1). Минералого-петрографические исследования образцов проводились с использованием поляризационного микроскопа Olympus RX50M, оборудованного системой цифровой регистрации изображений SIMAGIS TC-7CU. Полученные микрофотографии обработаны в программе «Минерал С7», предназначенной для анализа микроструктур твердых тел. Исследование полученных магнитных фракций проводилось с применением сканирующего электронного микроскопа Vega 3 LMH с системой рентгеновского энергодисперсионного микроанализа Oxford Instruments INCA Energy 250/X-max 20. Предварительно

проводилось науглероживание образцов при помощи напылительной установки Q150R E производства Quorum Technologies Ltd. с целью исключения засвечивания частиц при анализе.

Образец К 3.2 (см. рис. 1, а) представлен преимущественно известняком светло-кремово-серого цвета с примесью тонкодисперсного и тонкозернистого пирита, что обуславливает узорчатое окрашивание породы в темно-серые оттенки в отдельных прослоях. Текстура известняка комковато-сгустковая, сферолитовая, водорослевая, неравномерно «узорчато» перекристаллизованная. В отдельных прослоях наблюдается доломитизация и слабая сульфатизация. Присутствуют

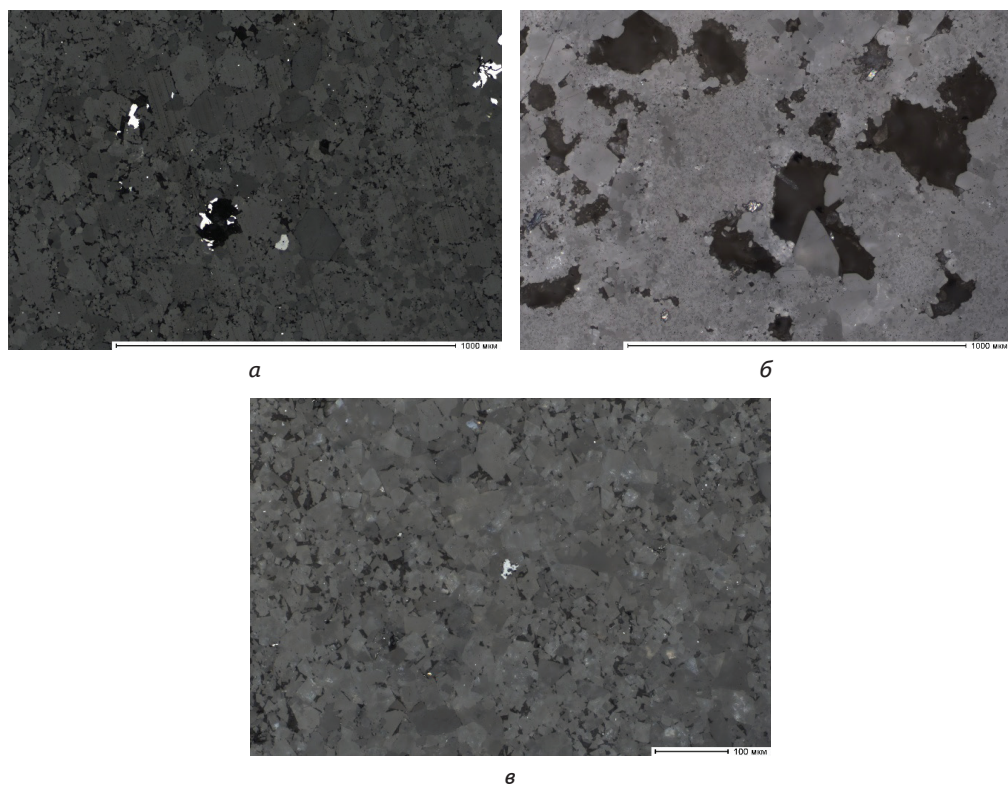


Рис. 1. Микрофотографии образцов кернов пород-коллекторов нефтяного месторождения Нерутынское: а – К 3.2, б – К 4.1, в – К 1.4

Fig. 1. Microphotographs of core samples of reservoir rocks from the Nerutyinskoye oil field: а – К 3.2, б – К 4.1, с – К 1.4

поры выщелачивания, многочисленные кальцитовые трещины и микротрещины, что привело к заметному разрушению породы в некоторых прослоях. Участки доломитизации, имеющие вид пятен различной формы, четко выделяются на фоне основной светлой массы известняка. Эти участки сложены темно-коричневато-серым тонкоскрытокристаллическим доломитом с четкими и расплывчатыми границами.

Образец К 4.1 (см. рис. 1, б) содержит преимущественно известняк светло-кремово-серого цвета, характеризующийся сгустково-комковатой текстурой со сферолитами и водорослевыми остатками. Наблюдается немногочисленный детрит брахиопод и гастропод, полностью перекристаллизованный и часто выщелоченный. В отдельных прослоях присутствуют мелкие, хорошо окатанные литокласты. Известняк сульфатизирован, содержит незначительную примесь пирита, неравномерно доломитизирован и перекристаллизован. Характерны прослои с горизонтально ориентированными цепочковидными фенестральными образованиями, выполненными белым кальцитом, а также стилолитовые швы, трещины и микротрещины. Доломитизированные участки отличаются повышенной плотностью, более темной окраской и как четкими, так и расплывчатыми границами. Структура породы неравномерно массивная, местами плитчатая, с признаками заметного выщелачивания.

Образец 1.4 (см. рис. 1, в) характеризуется переслаиванием доломита и тонкоплитчатого аргиллита. Доломит представлен скрытокристаллической разновидностью с низким содержанием карбонатов и глинистого материала, цветовые вариации от серого и бежеватосерого до почти черного обусловлены неравномерным распределением глинистого вещества и нефтенасыщением.

Текстура породы волнисто- и линзовидно-слоистая. Аргиллит местами окремнен, в нем наблюдаются редкие плоскости скольжения.

Анализ элементного состава осуществлялся с использованием рентгенофлуоресцентного энергодисперсионного анализатора EDX 7000. Экспериментальные исследования осуществлялись на установках Санкт-Петербургского горного университета. Эксперименты проводились на пробах крупностью $-0,1 + 0$ мм, полученных путем дробления исходного материала в щековой, а затем валковой дробилке, с использованием высокограддиентного магнитного сепаратора Slon 100 (компания «Outotec»), представленного на рис. 2.

Перед магнитной сепарацией проба подвергалась измельчению в шаровой мельнице с поверочной классификацией на сите $-0,071$ мм. Для определения возможности концентрирования минералов-индикаторов было проведено три серии опытов (каждая серия включала по 10 образцов). В каждом опыте использовалась навеска массой 100 г. В ходе исследований варьировались параметры матрицы (стержневая и шаровая), а также диаметр стержней матрицы (1, 3 и 6 мм); напряженность магнитного поля (1,1 Тл) и частота пульсации пульпы (38 Гц) были постоянными. Разделение осуществлялось в одну стадию. Магнитная и немагнитная фракции после разделения подвергались сушке, взвешиванию и рентгенофлуоресцентному анализу. Для подтверждения полученных данных и воспроизводимости каждый эксперимент проводился три раза на представительной пробе. Для оценки воспроизводимости и разброса результатов было рассчитано стандартное отклонение σ для выборки малого объема. На основании полученных данных были рассчитаны геохимические критерии.

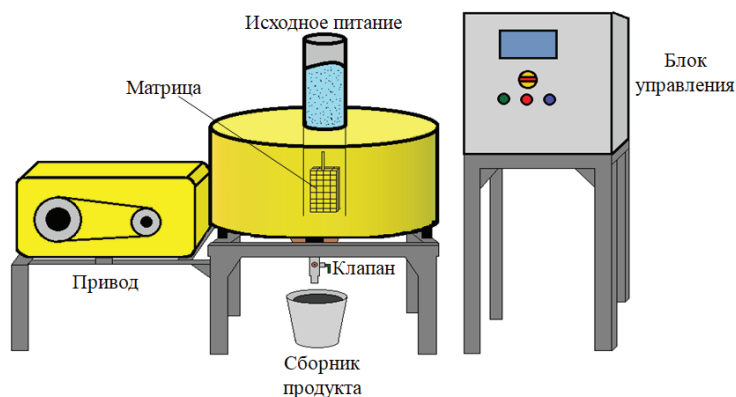


Рис. 2. Схема высокоградиентного магнитного сепаратора Slon 100
 Fig. 2. Scheme of the highly gradient magnetic separator Slon 100

Результаты и обсуждения

Анализ различных теорий образования нефти в земной коре показывает, что нефтидогенез представляет собой комплексный результат множества геологических процессов, включая седиментационные и постседиментационные диагенетические изменения, метаморфизм и метасоматизм горных пород, а также миграцию углеводородов как абиогенного, так и биогенного происхождения [28].

Ключевая роль в аккумуляции углеводородов принадлежит миграции флюидов, в том числе глубинных мантийных газов. При взаимодействии с вмещающими породами состав этих флюидов претерпевает изменения, что является важным фактором для формирования и миграции углеводородов. Также важное значение имеет развитие систем тектонических трещин, которые способствуют эффективной миграции углеводородов. В этом контексте геохимические индикаторы, связанные с составом пород, могут служить потенциальными индикаторами нефтидогенеза. Изучение минерального состава и текстурных особенностей пород помогает оценить их коллекторские свойства и способность к аккумуляции углеводо-

родов [29]. Концентрации микроэлементов могут указывать на генетический тип нефти, условия ее формирования и преобразования. Например, повышенные содержания ванадия (V) и никеля (Ni) характерны для нефтей морского генезиса, а соотношение V/Ni может служить индикатором степени зрелости органического вещества. Анализ геохимических показателей позволяет установить корреляцию между физико-химическими свойствами пород и условиями их формирования, что помогает в поиске глубинных залежей [30].

Прогнозной характеристикой пород-коллекторов на нефтеносность могут служить модифицированные петрохимические модули [31–32], которые отличаются тем, что рассчитываются по содержанию компонентов в магнитной фракции, такие как:

1) модифицированный гидролизатный модуль, который позволяет установить степень выветривания и зрелость осадочных пород:

$$ГМ_{м.ф.} = \frac{\beta(Al) + \beta(Ti) + \beta(Fe) + \beta(Mn)}{\beta(Si)}, \quad (1)$$

где $\beta(Al)$ — содержание Al, %; $\beta(Ti)$ — содержание Ti, %; $\beta(Fe)$ —

содержание Fe , %; $\beta(Mn)$ — содержание Mn , %; $\beta(Si)$ — содержание Si , %.

Гидрализатный модуль, детализирующий взаимодействие минералов с водными флюидами, а также их физико-химические характеристики, позволяет оценить условия метаморфизма пород и их способности к удержанию углеводородов. Этот модуль может показать, насколько порода была подвержена гидротермальным процессам, что, в свою очередь, может указывать на потенциальные зоны формирования глубоких залежей нефти;

2) модифицированный модуль щелочности пород оценивается через содержания щелочных и щелочноземельных элементов и позволяет оценить степень взаимодействия с флюидами и изменения в условиях осадконакопления:

$$\text{ЩМ}_{\text{м.ф.}} = \frac{\beta(Ca) + \beta(K) + \beta(Sr) + \beta(Rb)}{\beta(Si)} \quad (2)$$

где $\beta(Ca)$ — содержание Ca , %; $\beta(K)$ — содержание K , %; $\beta(Sr)$ — содержание Sr , %; $\beta(Rb)$ — содержание Rb , %; $\beta(Si)$ — содержание Si , %.

С использованием модуля щелочности можно выявить пласты, в которых происходят геохимические изменения, что, в свою очередь, может свидетельствовать о наличии углеводородов, так как высокий уровень щелочности может свидетельствовать о химических реакциях, которые происходят при образовании нефти и ее миграции;

3) модифицированный модуль переходных металлов позволяет оценить соотношение элементов группы железа к цветным металлам и является важным геохимическим индикатором:

$$\text{ПМ}_{\text{м.ф.}} = \frac{\beta(Fe) + \beta(Ti) + \beta(V) + \beta(Mn) + \beta(Cr)}{\beta(Cu) + \beta(Ni)} \quad (3)$$

где $\beta(Fe)$ — содержание Fe , %; $\beta(Ti)$ — содержание Ti , %; $\beta(V)$ — содержание V , %; $\beta(Mn)$ — содержание Mn , %; $\beta(Cr)$ — содержание Cr , %; $\beta(Cu)$ — содержание Cu , %; $\beta(Ni)$ — содержание Ni , %.

Такие элементы, как ванадий, никель, титан и др., могут служить маркерами процессов редокс, происходящих при формировании и миграции углеводородов. В частности, повышенные концентрации переходных металлов могут свидетельствовать о присутствии определенных типов нефти и условий, способствующих ее образованию.

Определение петрохимических модулей в породах-коллекторах зачастую затруднено рядом факторов. Геологическая неоднородность и, нередко, крайне низкие концентрации целевых элементов осложняют определение содержания основных элементов в исходном материале. В некоторых случаях определить содержания элементов в исходных пробах с использованием стандартных аналитических методов не представляется возможным из-за крайне низких значений, которые лежат за пределами их обнаружения. Поэтому первоочередной задачей становится концентрирование минералов, содержащих эти элементы. Применяемые для этого методы должны обеспечивать высокую степень извлечения. Одним из таких методов является высокоградиентная магнитная сепарация. ВГМС позволяет эффективно отделить магнитные минералы (например, магнетит, пирротин) от немагнитных (кварц, полевые шпаты), что критично для точного определения петрохимического состава. Примеси магнитных минералов могут искажать результаты химического анализа и, следовательно, расчет петрохимических модулей.





На первом этапе были проведены постановочные исследования по определению оптимального режима работы высокоградиентного магнитного сепаратора для максимального концентрирования ценных компонентов в магнитной фракции. Правильно подобранный режим работы сепаратора обеспечивает максимальное извлечение целевых магнитных минералов при минимальном захвате немагнитных. Исследования проводились на пробе *К 1.4*. Основные варьируемые параметры представлены в табл. 1.

После разделения магнитная и немагнитная фракции высушивались, взвешивались и подвергались рентгенофлуоресцентному анализу. Получен-

ные результаты элементного состава магнитной фракции представлены на рис. 3.

На основании анализа полученных данных можно отметить, что выход магнитной фракции во всех сериях составляет менее 4%, что говорит о низком содержании целевых компонентов в исходном материале, рассеянном характере их нахождения и высокой степени концентрации при ВГМС. При этом максимальное суммарное содержание основных элементов достигается при использовании стержневой матрицы с $d = 3,0$ мм при наименьших значениях содержания породообразующих элементов в магнитной фракции.

Таблица 1
Варьируемые параметры применяемых матриц
Varying parameters of applied matrices

№ эксперимента	Тип матрицы	Диаметр стержней/шаров, мм	Вид
1	Стержневая	1,5	
2		3,0	
3		6,0	
4	Шаровая	0,5	

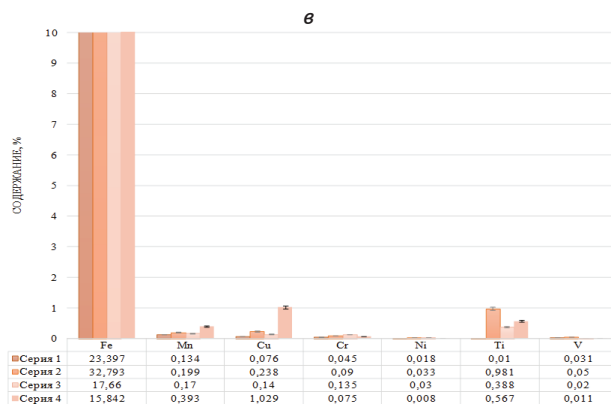
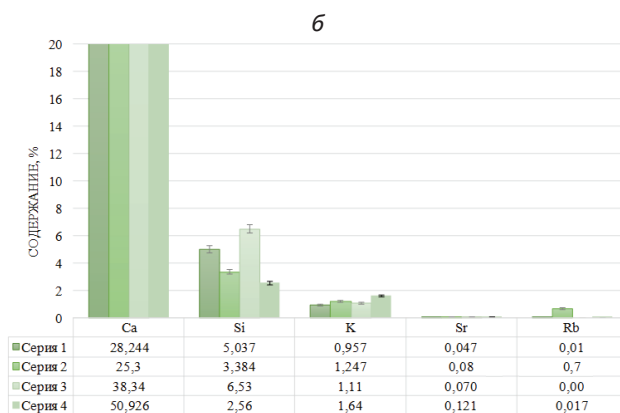
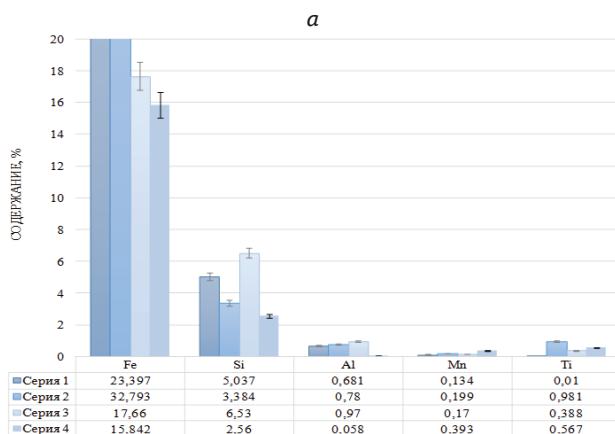


Рис. 3. Результаты исследования влияния типа матрицы на содержание основных элементов в магнитной фракции: а – элементы, входящие в состав гидролизатного модуля; б – элементы, входящие в состав модуля щелочности; в – элементы, входящие в модуль переходных металлов [составлено авторами]

Fig. 3. Results of the study of the influence of the matrix type on the content of basic elements in the magnetic fraction: a – elements included in the hydrolyzate module; b – elements included in the alkalinity module; c – elements included in the transition metal module

На втором этапе были проведены исследования по концентрированию ценных компонентов с использованием ВГМС образцов кернов пород-коллекторов К 3.2, К 4.1 и К 1.4 (серии 5–7) для расчета модифицированных петрохимических модулей и установления закономерностей распределения минералов-индикаторов от глубины залегания породы. Исследования проводились при режиме, установленном ранее: напряженность магнитного поля — 1,1 Тл; частота пульсации пульпы — 38 Гц; диаметр стержней матрицы — 3 мм. Результаты исследований и их графическая интерпретация представлены на рис. 4 и 5.

Полученные значения по содержанию основных элементов при изменении глубины залегания е превышают уровень статистической значимости в 5%.

Как показали результаты исследований, высокоградиентная магнитная сепарация позволила сконцентрировать такие элементы как: V, Ni, Sr, Rb, Ti, Cu, Al и др. в магнитной фракции. Полученные результаты позволили установить зависимость содержания основных компонентов от глубины залегания: с увеличением глубины наблюдается увеличение их содержания при незначительном выходе магнитной фракции. Эта закономерность позволяет предположить, что это может быть связано с изменением условий формирования и преобразования горных пород в зависимости от глубины: на изменение концентрации металлов может оказывать влияние увеличение температуры и давления.

Проведенные исследования позволяют предположить, что в более глубоких горизонтах происходит более эффективная селективная концентрация металлов, которая связана с различиями в физико-химических

условиях (изменение pH, температуры и состава флюидов). Эти изменения, в свою очередь, влияют на доступность и растворимость металлов. Например, высокие давление и температура приводят к изменениям в кристаллической структуре минералов, увеличивая их реакционную способность и взаимодействие с окружающими флюидами.

При этом стоит отметить, что Sr, Rb и Al обычно не образуют сильномагнитных минералов. Их присутствие в магнитной фракции может быть связано с сорбцией на поверхности магнитных минералов или вхождением в состав комплексных соединений с магнитными элементами [33–35].

Увеличение содержания металлов может быть также связано с действием геологических процессов, таких как метасоматоз — процесс замещения минералов другими в результате взаимодействия с растворами, проникающими в породы. Метасоматоз часто связан с гидротермальной активностью, когда горячие, богатые растворенными веществами флюиды циркулируют по трещинам и разломам, взаимодействуя с вмещающими породами. Структурные особенности пород, такие как разломы и трещины, играют важную роль, служа путями миграции гидротермальных флюидов.

Проведенные исследования позволили рассчитать содержания интересующих нас элементов в исходном сырье с использованием уравнений баланса; результаты расчетов представлены в табл. 2.

В таблице представлены данные усредненного элементного состава для трех глубин залегания. Самым распространенным элементом во всех пробах является кальций (Ca), его содержание стабильно и составляет 65,16%.

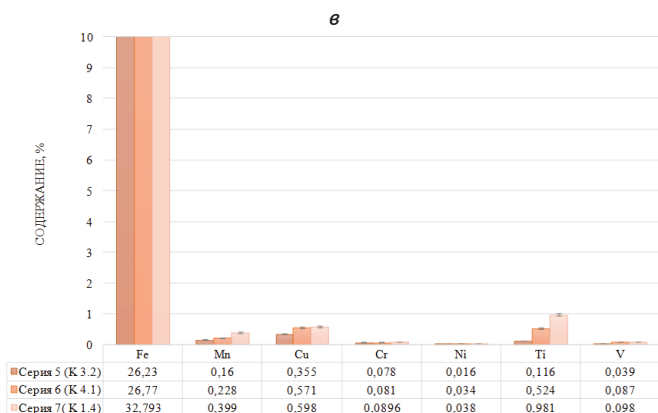
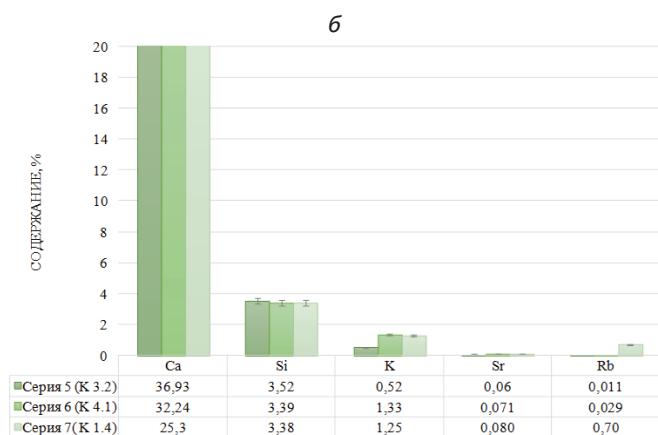
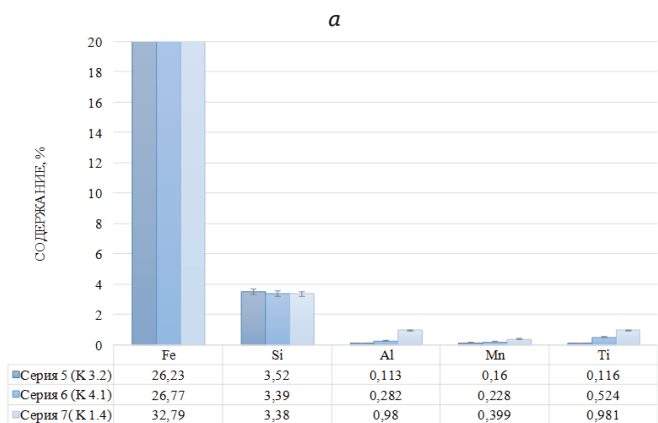


Рис. 4. Результаты исследования глубины залегания на содержание основных элементов в магнитной фракции: а — элементы, входящие в состав гидролизатного модуля; б — элементы, входящие в состав модуля щелочности; в — элементы, входящие в модуль переходных металлов

Fig. 4. Results of the study of the depth of burial on the content of major elements in the magnetic fraction: а — elements included in the hydrolyzate module; б — elements included in the alkalinity module; в — elements included in the transition metal module

Таблица 2

Усредненный элементный состав исследуемых продуктов

The average elemental composition of the studied products

Элемент	Содержание, % (* ppm)		
	Серия 5 (К 3.2)	Серия 6 (К 4.1)	Серия 7(К 1.4)
Ca	65,16	65,16	65,16
Fe	1,3	1,54	3,69
Si	2,92	2,86	2,19
K	0,43	0,92	1,32
Al*	20	24	15
Mn*	290	360	410
Cu*	530	560	590
Cr*	30	30	40
Sr	700	800	1200
Ni*	4	5	7
Ti*	100	150	190
Rb*	50	80	200
V*	7	8	16

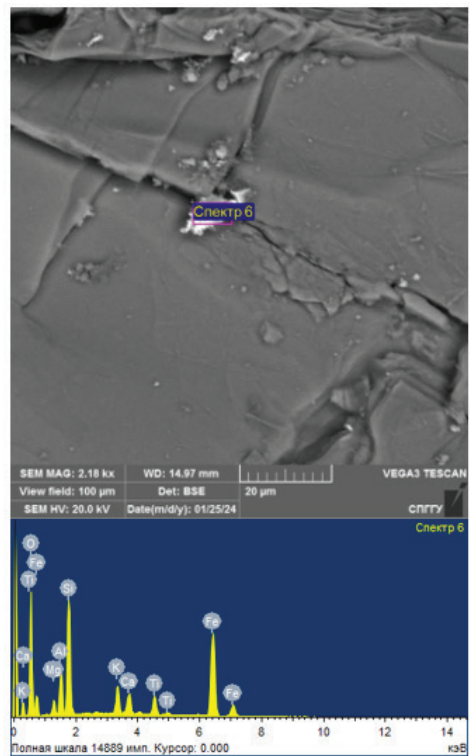
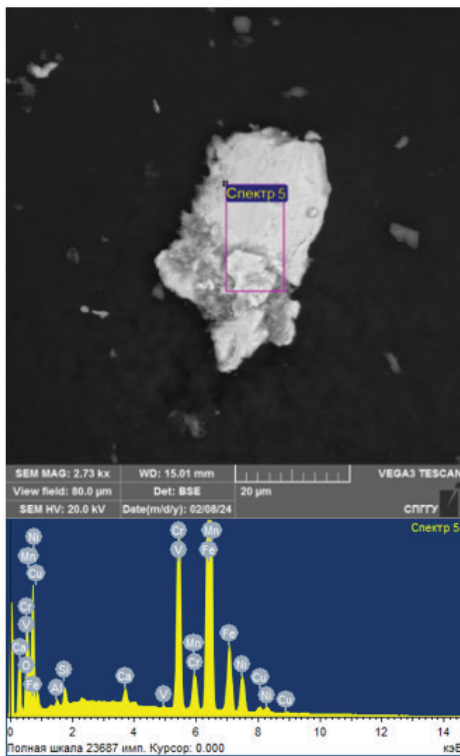


Рис. 5. Результаты исследования магнитной фракции (К 1.4) после магнитного обогащения с применением сканирующей электронной микроскопии

Fig. 5. Results of the magnetic fraction (K 1.4) after magnetic beneficiation using scanning electron microscopy

Остальные элементы присутствуют в значительно меньших количествах. Наблюдается вариабельность в содержании ряда элементов в пробах. В частности:

- железо (Fe): демонстрирует наиболее выраженную тенденцию к увеличению содержания от 1,3% до 3,69%, почти в три раза. Такие изменения в содержании Fe могут быть связаны с процессами, направленными на переход железа в более растворимую форму, что может происходить из-за различных условий гидротермального воздействия или с точки зрения метасоматоза;

- калий (K): также показывает рост содержания от 0,43% до 1,32%, более чем в три раза. Это увеличение может указывать на накопление калиевых соединений в процессе кристаллопроцесса, что также может быть связано с изменением pH среды или достаточной продолжительностью метасоматозных процессов, когда калий становится более доступным для захвата;

- кремний (Si): в отличие от Fe и K, содержание кремния снижается от 2,92% до 2,19%;

- алюминий (Al), марганец (Mn), медь (Cu), хром (Cr), стронций (Sr), никель (Ni), титан (Ti), рубидий (Rb), ванадий (V): все эти элементы присутствуют в следовых количествах. Хотя наблюдается общая тенденция к увеличению их содержания с увеличением глубины залегания. Увеличение содержания переходных металлов — Cu, Cr или V, может свидетельствовать о наличии геологических процессов, таких как магматизм или метаморфизм, которые могут привести к различной устойчивости и мобилизации этих элементов.

На основании проведенных экспериментально-теоретических исследований были рассчитаны петрохимические модули; полученные результаты представлены на рис. 6.

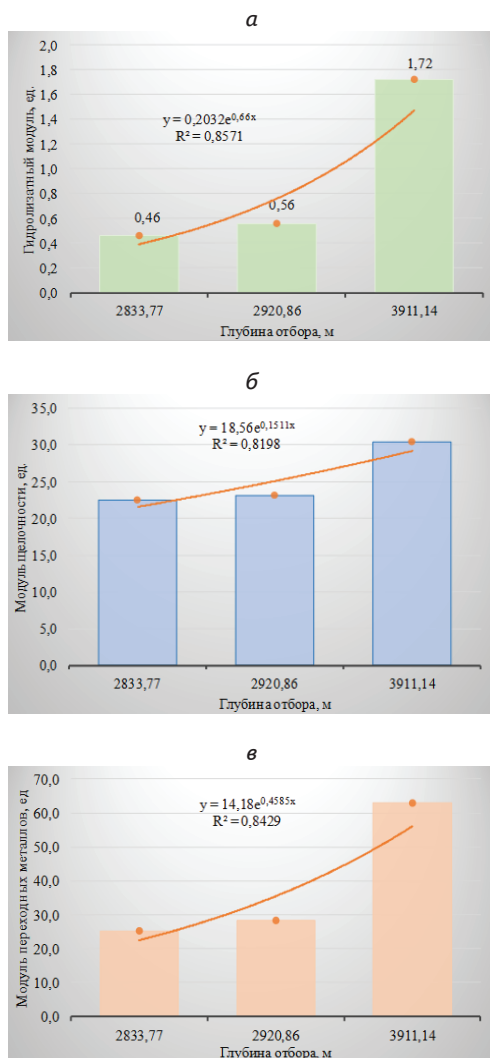


Рис. 6. Результаты расчета петрохимических модулей в зависимости от глубины залегания: а — данные по гидролизатному модулю, б — данные по модулю щелочности, в — данные по модулю переходных металлов
 Fig. 6. Results of calculation of petrochemical modules depending on the depth of occurrence: a — data on the hydrolyzate modulus, b — data on the alkalinity modulus, c — data on the transition metal modulus

ВГМС извлекает магнитную фракцию (< 4% от массы) с существенно повышенной концентрацией микроэлементов, коррелирующих с глубиной

залегающих, что позволяет интерпретировать геохимические изменения в разрезе пород-коллекторов.

Анализ результатов, представленных на рис. 6, показал зависимость петрохимических модулей (ГМ, ЩМ, ПМ) от глубины залегания: с увеличением глубины значения всех трех модулей возрастают. Это позволяет интерпретировать геохимические изменения в разрезе пород-коллекторов. Увеличение температуры и давления с глубиной способствует катагенезу — процессу преобразования органического вещества сначала в кероген, а затем, потенциально, в нефть и газ. Изменение петрохимических модулей может косвенно отражать эти процессы, а также другие факторы.

Например, рост ГМ (см. рис. 6, а) может указывать на увеличение содержания глинистых минералов, которые могут служить покрывками для углеводородных залежей. По значению гидролизатного модуля, наряду с высоким относительным содержанием железа, пробы пород на глубине 2833,77–2833,97 м можно отнести к типу сиферлитов — вулканогенных осадочных пород, которые являются следствием разрушения и выветривания древних глубинных магматических пород. На основании значений гидролизатного модуля проб пород с более глубоких горизонтов породы можно сделать вывод о преобладании с глубиной гидролизатов, характеризующихся высоким содержанием глинистых минералов. Рост ЩМ (см. рис. 6, б) с глубиной также может свидетельствовать об увеличении содержания обломочных вулканогенных пород в виде полевых шпатов и слюд. Таким образом, с увеличением глубины наблюдаются косвенные признаки совместного накопления обломков вулканогенных пород и минералов-носителей переход-

ных металлов (см. рис. 6, в), что могло способствовать поддержанию высокой щелочности среды. В этих условиях, наряду с наличием каталитически активных соединений, создавалась возможность преобразования органического вещества.

Кроме того, изменение модулей может быть связано с гидротермальной активностью, которая способна влиять на процессы образования, миграции и аккумуляции углеводородов.

Заключение

Исследования образцов пород-коллекторов подтвердили эффективность высокоградиентной магнитной сепарации для извлечения магнитной фракции и концентрирования микроэлементов, таких как ванадий, никель, стронций, рубидий и титан. Низкий выход магнитной фракции при значительном увеличении концентрации целевых компонентов свидетельствует о высокой селективности и чувствительности метода при работе с материалами, содержащими микроэлементы на уровне следовых значений. Эти элементы, играющие важную роль в процессах формирования и миграции углеводородов, являются ценными индикаторами нефтидогенеза.

На основании полученных данных были рассчитаны модифицированные петрохимические модули. С увеличением глубины все модули возрастали (ГМ_{м.ф.} с 0,46 до 1,72; ЩМ_{м.ф.} с 22,49 до 34,42 и ПМ_{м.ф.} с 25,14 до 62,91), что отражает повышение влияния гидротермальных и метасоматических процессов на накопление минералов-носителей микроэлементов и позволяет интерпретировать геохимические изменения в разрезе пород-коллекторов.

Таким образом, проведенные исследования подтверждают эффективность высокоградиентной магнитной сепарации как метода подготовки образцов

для детального изучения органометаллических соединений, а полученные данные подчеркивают важность дальнейшего изучения геохимических индикаторов и их связи с условиями формирования углеводородов

Вклад авторов

Александрова Т. Н. — разработка концепции исследования, постановка цели и задач исследования, интерпретация полученных данных и написание текста статьи;

Николаева Н. В. — проведение экспериментальных исследований

по высокоградиентной магнитной сепарации, написание текста статьи;

Кузнецов В. В. — выполнение работы по систематизации материала, анализ результатов исследования и подготовка данных;

Афанасова А. В. — выполнение работы по систематизации материала, проведение минералогического и рентгенофлюоресцентного анализа исходного материала и продуктов разделения;

Ромашев А. О. — обработка и систематизация результатов исследования.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Litvinenko V., Bowbrick I., Naumov I., Zaitseva Z.* Global guidelines and requirements for professional competencies of natural resource extraction engineers: Implications for ESG principles and sustainable development goals // *Journal of Cleaner Production.* 2022, vol. 338, pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130530.

2. *Cherepovitsyn A., Kazanin A., Rutenko E.* Strategic Priorities for Green Diversification of Oil and Gas Companies // *Energies.* 2023, vol. 16(13), p. 4985. DOI: 10.3390/en16134985.

3. *Prischeva O. M., Kireev S. B., Nefedov Y. V., Martynov A. V., Lutsky D. S., Krykova T. N., Sinitsa N., Xu R.* Theoretical and methodological approaches to identifying deep accumulations of oil and gas in oil and gas basins of the Russian Federation // *Frontiers in Earth Science.* 2023, vol. 11, pp. 1–35. DOI: 10.3389/feart.2023.1192051.

4. *Petrakov D. G., Karmanskiy D. A.* Comparison of Analytical and Experimental Methods for Determining Dependency of Permeability of Clayey Sandstones on Effective Pressure // *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications.* 2025, vol. 38(11), pp. 2502–2510. DOI: 10.5829/ije.2025.38.11b.03.

5. *Dengaev A., Shishulin V., Safiullina E., Palyanitsina A.* Modeling Results for the Real Horizontal Heavy-Oil-Production Well of Mechanical Solids // *Energies.* 2022, vol. 15(14), p. 5182. DOI: 10.3390/en15145182.

6. *Palyanitsina A., Safiullina E., Byazrov R., Podoprigora D., Alekseenko A.* Environmentally Safe Technology to Increase Efficiency of High-Viscosity Oil Production for the Objects with Advanced Water Cut // *Energies.* – 2022. – 15(3). – 753. DOI: 10.3390/en15030753.

7. *Лурье М. А.* Свойства и состав глубинных флюидов — источников углеводородов, гетерокомпонентов и микроэлементов абиогенных нефтей // *Геология нефти и газа.* — 2020. — № 3. — С. 43–49. DOI: 10.31087/0016-7894-2020-3-43-49.

8. *Большакова М. А., Ситар К. А., Кожанов Д. Д.* Об особенностях состава и свойств древних нефтегазоматеринских отложений // *Записки Горного института.* — 2024. — Т. 269. — С. 700–707.

9. *Тимурзиев А. И.* Миф «энергетического голода» от Хабберта и пути воспроизводства ресурсной базы России на основе реализации проекта «Глубинная нефть» // *Бурение и нефть.* — 2019. — № 1. — С. 12–21.

10. *Chengzao Jia, Xiongqi Pang, Yan Song.* The mechanism of unconventional hydrocarbon formation: Hydrocarbon self-sealing and intermolecular forces // *Petroleum Exploration and Development.* 2021, vol. 48, iss. 3, pp. 507–526.

11. Александрова Т. Н., Кузнецов В. В., Николаева Н. В. Потенциальные микроэлементные маркеры процессов нефтегенеза: моделирование и эксперимент // Записки Горного института. – 2024. – Т. 269. – С. 687–699.

12. Прищепа О. М., Луцкий Д. С., Киреев С. Б., Саница Н. В. Термодинамическое моделирование как основа прогноза фазовых состояний углеводородных флюидов на больших и сверхбольших глубинах // Записки Горного института. – 2024. – Т. 269. – С. 815–832.

13. Якубова С. Г., Абилова Г. Р., Тазеева Э. Г., Тазеев Д. И., Миронов Н. А., Милордов Д. В., Якубов М. Р. Сопоставительный анализ ванадилпорфиринов, выделенных из асфальтенов тяжелых нефтей с высоким и низким содержанием ванадия // Нефтехимия. – 2022. – Т. 62. – № 1. – С. 99–110. DOI: 10.31857/S002824212201004X.

14. Иванова Ю. Б., Семейкин А. С., Пуховская С. Г., Мамардашвили Н. Ж. Синтез, спектральные и координационные свойства мезо-тетраарилпорфиринов // Журнал органической химии. – 2019. – Т. 55. – № 12. – С. 1888–1894. DOI: 10.1134/S0514749219120115.

15. Walters C. C., Isaksen G. H., Peters K. E. Applications of Light Hydrocarbon Molecular and Isotopic Compositions in Oil and Gas Exploration // Analytical Advances for Hydrocarbon Research. 2003, pp. 247–266. DOI: 10.1007/978-1-4419-9212-3_10.

16. Balitsky V. S., Balitskaya L. V., Bublikova T. M., Borkov F. P. Water-hydrocarbon inclusions in synthetic quartz, calcite, and fluorite crystals grown from oil-bearing hydrothermal solutions (experimental data) // Doklady Earth Sciences. 2005, vol. 404(7), pp. 1050–1053.

17. Nefedov Y. V., Vostrikov N. N., Yashmolkin A. M. Impact of Tectono-sedimentation Factor on Prospects of Oil and Gas Potential of Sakhalin Offshore of Okhotsk Oil and Gas Province Established through Stochastic Seismic Data Inversion and Constructed Digital Paleotectonic Model // International Journal of Engineering. 2025, vol. 38(7), pp. 1726–1736.

18. Lapidus A. L., Kerimov V. Y., Mustaev R. N., Movsumzade E. M., Salikhova I. M., Zhagfarov F. G. Natural Bitumens: Physicochemical Properties and Production Technologies // Solid Fuel Chemistry. 2018, vol. 52(6), pp. 344–355. DOI: 10.3103/s0361521918060071.

19. Peters K. E., Fowler M. G. Applications of petroleum geochemistry to exploration and reservoir management // Organic Geochemistry. 2002, vol. 33(1), pp. 5–36. DOI: 10.1016/s0146-6380(01)00125-5.

20. Kontorovich A. E., Dolzhenko K. V., Fomin A. N. Transformation of Terrestrial Organic Matter during Mesocatagenesis and Apocatagenesis // Russian Geology and Geophysics. 2020, vol. 61, no. 8, pp. 891–905. DOI: 10.15372/RGG2020116.

21. López L., Lo Mónaco S. Vanadium, nickel and sulfur in crude oils and source rocks and their relationship with biomarkers: Implications for the origin of crude oils in Venezuelan basins // Organic Geochemistry. 2017, vol. 104, pp. 53–68. DOI: 10.1016/j.orggeochem.2016.11.007.

22. Zhmodik S. M., Airiyants E. V., Belyanin D. K., Damdinov B. B., Karmanov N. S., Kiseleva O. N., Kozlov A. V., Mironov A. A., Moroz T. N., Ponomarchuk V. A. Native Gold and Unique Gold–Brannerite Nuggets from the Placer of the Kamenny Stream, Ozerninsky Ore Cluster (Western Transbaikalia, Russia) and Possible Sources // Minerals. 2023, vol. 13(9), 1149. <https://doi.org/10.3390/min13091149>.

23. Aleksandrova T., Nikolaeva N., Kuznetsov V. Thermodynamic and Experimental Substantiation of the Possibility of Formation and Extraction of Organometallic Compounds as Indicators of Deep Naphthogenesis // Energies. 2023, vol. 16, 3862. DOI: 10.3390/en16093862.

24. Афанасова А. В., Абурова В. А. Укрупнение низкоразмерных благородных металлов из углеродистых материалов с применением микроволновой обработки // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 1. – С. 20–35. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_1_0_20.

25. Яковлева Т. А., Ромашев А. О., Машевский Г. Н. Оптимизация дозирования флотационных реагентов при флотации руд цветных металлов с применением цифровых технологий // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 6–2. — С. 175–188. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_175.

26. Bazhin V. Y., Kuskov V. B., Kuskova Y. V. Processing of low-demand coal and other carbon-containing materials for energy production purposes // Inzynieria Mineralna. 2021. DOI: 10.29227/IM-2019-01-37.

27. Aleksandrova T., Afanasova A., Nikolaeva N., Romashev A., Aburova V., Prokhorova E. Investigation of the Possibility of Obtaining High-Purity Carbon Materials and Recovering Valuable Metals from Shungite Rocks // Minerals. 2025, vol. 15, p. 90. DOI: 10.3390/min15010090.

28. Höök M., Bardi U., Feng L., Pang X. Development of oil formation theories and their importance for peak oil // Marine and Petroleum Geology. 2010, vol. 27(9), pp. 1995–2004. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2010.06.005.

29. Wdowin M., Tarkowski R., Franus W. Supplementary Studies of Textural and Mineralogical Changes in Reservoir and Caprocks from Selected Potential Sites Suitable for Underground CO₂ Storage // Arabian Journal for Science and Engineering. 2013, vol. 39(1), pp. 295–309. DOI: 10.1007/s13369-013-0862-0.


30. Jegede T. O., Adekola S. A., Akinlua A. Trace element geochemistry of kerogens from the central Niger Delta // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 2018, pp. 1587–1595. DOI: 10.1007/s13202-018-0448-1.

31. Юдович Я. Э., Кетрис М. П. Основы литохимии. — СПб: Наука, 2000. — 479 с.

32. Конторович А. Э., Бурштейн Л. М., Лившиц В. Р. Теория нефтидогенеза: количественная модель эволюции аквагенного органического вещества в катагенезе // Геология и геофизика. — 2021. — Т. 62. — № 8. — С. 1026–1047.

33. Sean Langley, Andrew G. Gault, Alexandre Ibrahim, Yoshio Takahashi, Rob Renaud, Danielle Fortin, Ian D. Clark, F. Grant Ferris. Sorption of strontium onto bacteriogenic iron oxides // Environ Sci Technol. 2009, vol. 15, no. 43(4), pp. 1008–1014. DOI: 10.1021/es802027f.

34. Wentao Wang, Wenjun Zhang, Yuke Fan, Qu Chenchen. Facet-dependent adsorption of aluminum(III) on hematite nanocrystals and the influence on mineral transformation // Environmental science. Nano. 2022, vol. 9(6). DOI: 10.1039/D2EN00062H.

35. Shanshan Cao, Feifei Kang, Xin Yang, Zhen Zhen, Hui Liu, Rufen Chen, Yu Wei. Influence of Al substitution on magnetism and adsorption properties of hematite // Journal of Solid State Chemistry. 2015, vol. 228, pp. 82–89. DOI: 10.1016/j.jssc.2015.04.034. 

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Александрова Татьяна Николаевна*¹ — докт. техн. наук, профессор, член-корр. РАН, зав. каф. обогащения полезных ископаемых, ORCID ID: 0000-0002-3069-0001, e-mail: Aleksandrova_TN@pers.spmi.ru;

*Николаева Надежда Валерьевна*¹ — канд. техн. наук, доцент кафедры обогащения полезных ископаемых, ORCID ID 0000-0001-7492-1847, e-mail: Nikolaeva_nv@pers.spmi.ru;

Кузнецов Валентин Вадимович — канд. техн. наук, ассистент кафедры обогащения полезных ископаемых, ORCID ID 0000-00016159-316X, e-mail: kuznetsov@vvalen.ru;

*Афанасова Анастасия Валерьевна*¹ — канд. техн. наук, доцент кафедры обогащения полезных ископаемых, ORCID ID: 0000-0002-8451-2489, e-mail: Afanasova_av@pers.spmi.ru;

*Ромашев Артём Олегович*¹ — канд. техн. наук, доцент кафедры обогащения полезных ископаемых, ORCID ID: 0000-0003-3210-8000, e-mail: Romashev_ao@pers.spmi.ru.

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2, Россия.

Для контактов: Николаева Надежда Валерьевна, e-mail: Nikolaeva_nv@pers.spmi.ru

REFERENCES

1. Litvinenko V., Bowbrick I., Naumov I., Zaitseva Z. Global guidelines and requirements for professional competencies of natural resource extraction engineers: Implications for ESG principles and sustainable development goals. *Journal of Cleaner Production*. 2022, vol. 338, pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130530.

2. Cherepovitsyn A., Kazanin A., Rutenko E. Strategic Priorities for Green Diversification of Oil and Gas Companies. *Energies*. 2023, vol. 16(13), p. 4985. DOI: 10.3390/en16134985.

3. Prischeпа O. M., Kireev S. B., Nefedov Y. V., Martynov A. V., Lutsky D. S., Krykova T. N., Sinitsa N., Xu R. Theoretical and methodological approaches to identifying deep accumulations of oil and gas in oil and gas basins of the Russian Federation. *Frontiers in Earth Science*. 2023, vol. 11, pp. 1–35. DOI: 10.3389/feart.2023.1192051.

4. Petrakov D. G., Karmanskiy D. A. Comparison of Analytical and Experimental Methods for Determining Dependency of Permeability of Clayey Sandstones on Effective Pressure. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*. 2025, vol. 38(11), pp. 2502–2510. DOI: 10.5829/ije.2025.38.11b.03.

5. Dengaev A., Shishulin V., Safiullina E., Palyanitsina A. Modeling Results for the Real Horizontal Heavy-Oil-Production Well of Mechanical Solids. *Energies*. 2022, vol. 15(14), p. 5182. DOI: 10.3390/en15145182.

6. Palyanitsina A., Safiullina E., Byazrov R., Podoprigora D., Alekseenko A. Environmentally Safe Technology to Increase Efficiency of High-Viscosity Oil Production for the Objects with Advanced Water Cut// *Energies*. – 2022. - 15(3). - 753. DOI: 10.3390/en15030753.

7. Lure M. A. Sources of hydrocarbons, heterocomponents, and trace elements of abiogenic oil: properties and composition of deep fluids. *Russian Oil and Gas Geology*. 2020, no. 3, pp. 43–49. [In Russ]. DOI: 10.31087/0016-7894-2020-3-43–49.

8. Bolshakova M. A., Sitar K. A., Kozhanov D. D. On peculiarities of composition and properties of ancient hydrocarbon source rocks. *Journal of Mining Institute*. 2024, vol. 269, pp. 700–707. [In Russ].

9. Timurziev A. Myth of power hunger from Habbert and ways of the decision of the global power problem on base of “Deepoil” project realization. *Burenie & Neft*. 2019, no. 1, pp. 12–21. [In Russ].

10. Chengzao Jia, Xiongqi Pang, Yan Song. The mechanism of unconventional hydrocarbon formation: Hydrocarbon self-sealing and intermolecular forces. *Petroleum Exploration and Development*. 2021, vol. 48, iss. 3, pp. 507–526.

11. Aleksandrova T. N., Kuznetsov V. V., Nikolaeva N. V. Potential trace element markers of naphthogenesis processes: modeling and experimentation. *Journal of Mining Institute*. 2024, vol. 269, pp. 687–699. [In Russ].

12. Prishchepa O. M., Lutskiy D. S., Kireev S. B., Sinitsa N. V. Thermodynamic modelling as a basis for forecasting phase states of hydrocarbon fluids at great and super-great depths. *Journal of Mining Institute*. 2024, vol. 269, pp. 815–832. [In Russ].

13. Yakubova S. G., Abilova G. R., Tazeeva E. G., et al. A Comparative Analysis of Vanadyl Porphyrins Isolated from Heavy Oil Asphaltenes with High and Low Vanadium Content. *Petroleum Chemistry*. 2022, vol. 62, no. 1, pp. 83–93. [In Russ]. DOI: 10.31857/S002824212201004X.

14. Ivanova Y. B., Semeikin A. S., Pukhovskaya S. G., Mamardashvili N. Z. Synthesis and Spectral and Coordination Properties of meso-Tetraarylporphyrins. *Russian Journal*

of *Organic Chemistry*. 2019, vol. 55, no. 12, pp. 1888–1894. [In Russ]. DOI: 10.1134/S0514749219120115.

15. Walters C. C., Isaksen G. H., Peters K. E. Applications of Light Hydrocarbon Molecular and Isotopic Compositions in Oil and Gas Exploration. *Analytical Advances for Hydrocarbon Research*. 2003, pp. 247–266. DOI: 10.1007/978-1-4419-9212-3_10.

16. Balitsky V. S., Balitskaya L. V., Bublikova T. M., Borkov F. P. Water-hydrocarbon inclusions in synthetic quartz, calcite, and fluorite crystals grown from oil-bearing hydrothermal solutions (experimental data). *Doklady Earth Sciences*. 2005, vol. 404(7), pp. 1050–1053. [In Russ].

17. Nefedov Y. V., Vostrikov N. N., Yashmolkin A. M. Impact of Tectono-sedimentation Factor on Prospects of Oil and Gas Potential of Sakhalin Offshore of Okhotsk Oil and Gas Province Established through Stochastic Seismic Data Inversion and Constructed Digital Paleotectonic Model. *International Journal of Engineering*. 2025, vol. 38(7), pp. 1726–1736.

18. Lapidus A. L., Kerimov V. Y., Mustaev R. N., Movsumzade E. M., Salikhova I. M., Zhagfarov F. G. Natural Bitumens: Physicochemical Properties and Production Technologies. *Solid Fuel Chemistry*. 2018, vol. 52(6), pp. 344–355. DOI: 10.3103/s0361521918060071.

19. Peters K. E., Fowler M. G. Applications of petroleum geochemistry to exploration and reservoir management. *Organic Geochemistry*. 2002, vol. 33(1), pp. 5–36. DOI: 10.1016/s0146-6380(01)00125-5.

20. Kontorovich A. E., Dolzhenko K. V., Fomin A. N. Transformation of Terrestrial Organic Matter during Mesocatagenesis and Apocatagenesis. *Russian Geology and Geophysics*. 2020, vol. 61, no. 8, pp. 891–905. DOI: 10.15372/RGG2020116.

21. López L., Lo Mónaco S. Vanadium, nickel and sulfur in crude oils and source rocks and their relationship with biomarkers: Implications for the origin of crude oils in Venezuelan basins. *Organic Geochemistry*. 2017, vol. 104, pp. 53–68. DOI: 10.1016/j.orggeochem.2016.11.007.

22. Zhmodik S. M., Airiyants E. V., Belyanin D. K., Damdinov B. B., Karmanov N. S., Kiseleva O. N., Kozlov A. V., Mironov A. A., Moroz T. N., Ponomarchuk V. A. Native Gold and Unique Gold–Brannerite Nuggets from the Placer of the Kamenny Stream, Ozerninsky Ore Cluster (Western Transbaikalia, Russia) and Possible Sources. *Minerals*. 2023, vol. 13(9), 1149. <https://doi.org/10.3390/min13091149>.

23. Aleksandrova T., Nikolaeva N., Kuznetsov V. Thermodynamic and Experimental Substantiation of the Possibility of Formation and Extraction of Organometallic Compounds as Indicators of Deep Naphthogenesis. *Energies*. 2023, vol. 16, 3862. DOI: 10.3390/en16093862.

24. Afanasova A. V., Aburova V. A., Prokhorova E. O., Lushina E. A. Investigation of the influence of depressors on flotation-active rock-forming minerals in sulphide gold bearing ore flotation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 6–2, pp.161–174. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_1_0_20.

25. Yakovleva T. A., Romashev A. O., Mashevsky G. N. Digital technologies for optimizing the dosing of flotation reagents during flotation of non-ferrous metal ores. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 6–2, pp. 175–188. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_175.

26. Bazhin V. Y., Kuskov V. B., Kuskova Y. V. Processing of low-demand coal and other carbon-containing materials for energy production purposes. *Inzynieria Mineralna*. 2021. DOI: 10.29227/IM-2019-01-37.

27. Aleksandrova T., Afanasova A., Nikolaeva N., Romashev A., Aburova V., Prokhorova E. Investigation of the Possibility of Obtaining High-Purity Carbon Materials and Recovering Valuable Metals from Shungite Rocks. *Minerals*. 2025, vol. 15, p. 90. DOI: 10.3390/min15010090.

28. Höök M., Bardi U., Feng L., Pang X. Development of oil formation theories and their importance for peak oil. *Marine and Petroleum Geology*. 2010, vol. 27(9), pp. 1995–2004. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2010.06.005.

29. Wdowin M., Tarkowski R., Franus W. Supplementary Studies of Textural and Mineralogical Changes in Reservoir and Caprocks from Selected Potential Sites Suitable for Underground CO₂ Storage. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2013, vol. 39(1), pp. 295–309. DOI: 10.1007/s13369-013-0862-0.

30. Jegede T. O., Adekola S. A., Akinlua A. Trace element geochemistry of kerogens from the central Niger Delta. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2018, pp. 1587–1595. DOI: 10.1007/s13202-018-0448-1

31. Yudovich Ya. E., Ketris M. P. Fundamentals of lithochemistry. Saint Petersburg, Nauka, 2000, p. 479. [In Russ].

35. Kontorovich A. E., Burshtein L. M., Livshits V. R. The theory of naphthidogenesis: a quantitative model of the catagenetic evolution of aquatic organic matter. *Russian Geology and Geophysics*. 2021, vol. 62, no. 8, pp. 840–858. [In Russ].

33. Sean Langley, Andrew G. Gault, Alexandre Ibrahim, Yoshio Takahashi, Rob Renaud, Danielle Fortin, Ian D. Clark, F. Grant Ferris. Sorption of strontium onto bacteriogenic iron oxides. *Environ Sci Technol*. 2009, vol. 15, no. 43(4), pp. 1008–1014. DOI: 10.1021/es802027f.

34. Wentao Wang, Wenjun Zhang, Yuke Fan, Qu Chenchen. Facet-dependent adsorption of aluminum(III) on hematite nanocrystals and the influence on mineral transformation. *Environmental science. Nano*. 2022, vol. 9(6). DOI: 10.1039/D2EN00062H.

35. Shanshan Cao, Feifei Kang, Xin Yang, Zhen Zhen, Hui Liu, Rufen Chen, Yu Wei. Influence of Al substitution on magnetism and adsorption properties of hematite. *Journal of Solid State Chemistry*. 2015, vol. 228, pp. 82–89. DOI: 10.1016/j.jssc.2015.04.034.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Aleksandrova T. N., Dr. Sci. (Eng.), Corresponding Member of Russian Academy of sciences, Professor, Head of the Mineral Processing department, ORCID ID: 0000-0002-3069-0001; Saint Petersburg Mining University, 199106, St. Petersburg, Vasilievsky Island, 21 line 2, Russia, e-mail: Aleksandrova_TN@pers.spmi.ru;

Nikolaeva N. V., Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, ORCID ID: 0000-0001-7492-1847, Saint Petersburg Mining University, 199106, St. Petersburg, Vasilievsky Island, 21 line 2, Russia, e-mail: Nikolaeva_nv@pers.spmi.ru;

Kuznetsov V. V., Cand. Sci. (Eng.), Assistant, ORCID ID: 0000-0001-6159-316X, Saint Petersburg Mining University, 199106, St. Petersburg, Vasilievsky Island, 21 line 2, Russia, e-mail: kuznetsov@vvalen.ru;

Afanasova A. V., Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, ORCID ID: 0000-0002-8451-2489, Saint-Petersburg Mining University, Saint Petersburg Mining University, 199106, St. Petersburg, Vasilievsky Island, 21 line 2, Russia, e-mail: Afanasova_av@pers.spmi.ru;

Romashev A. O. – Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, ORCID ID: 0000-0003-3210-8000, Saint-Petersburg Mining University, Saint Petersburg Mining University, 199106, St. Petersburg, Vasilievsky Island, 21 line 2, Russia, e-mail: Romashev_ao@pers.spmi.ru.

For contact: Nikolaeva N. V., e-mail: Nikolaeva_nv@pers.spmi.ru.

Получена редакцией 14.08.2025; получена после рецензии 08.10.2025; принята к печати 10.10.2025.

Received by the editors 14.08.2025; received after the review 08.10.2025; accepted for printing 10.10.2025.