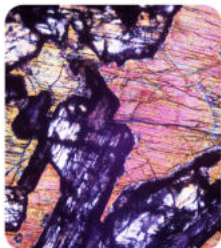


ISSN 2712-7761

№ 9 (357), сентябрь 2024



Вестник геонаук





Vestnik of Geosciences
Вестник геонаук

Сентябрь
September
2024,
№ 9 (357)

Журнал издается под научно-методическим руководством Отделения наук о Земле РАН
The journal is published under the research and methodological guidance of the RAS Department of Earth Sciences

Главный редактор *А. М. Асхабов*

Зам. главного редактора *И. Н. Бурцев*

Зам. главного редактора *О. Б. Котова*

Ответственный секретарь *И. В. Козырева*

Chief Editor *A. M. Askhabov*

Deputy Chief Editor *I. N. Burtsev*

Deputy Chief Editor *O. B. Kotova*

Executive Secretary *I. V. Kozyreva*

Редакционный совет

- Л. Н. Андреева*, Сыктывкар, Россия
А. И. Антошкина, Сыктывкар, Россия
Т. М. Безносова, Сыктывкар, Россия
М. А. Богдасаров, Брест, Беларусь
М. А. Т. М. Брокманс, Тронхейм, Норвегия
Д. А. Бушнев, Сыктывкар, Россия
Ю. Л. Войтеховский, Апатиты, Россия
А. Д. Гвишиани, Москва, Россия
В. А. Жемчугова, Москва, Россия
А. В. Журавлев, Сыктывкар, Россия
Д. А. Зедгенизов, Екатеринбург, Россия
В. А. Каширцев, Новосибирск, Россия
М. Комак, Любляна, Словения
С. В. Кривовичев, Санкт-Петербург, Россия
С. К. Кузнецов, Сыктывкар, Россия
Н. А. Малышев, Москва, Россия
М. Мартинс, Ору-Прету, Бразилия
Т. П. Майорова, Сыктывкар, Россия
П. Мянник, Таллин, Эстония
А. И. Николаев, Апатиты, Россия
Б. М. Осовецкий, Пермь, Россия
Ю. Ф. Патраков, Кемерово, Россия
И. В. Пеков, Москва, Россия
Д. В. Пономарев, Сыктывкар, Россия
Д. Ю. Пушаровский, Москва, Россия
А. М. Пыстин, Сыктывкар, Россия
Ш. Сун, Мянъян, Китай
К. М. Соджа, Гамильтон, Нью-Йорк, США
О. В. Удоратина, Сыктывкар, Россия
М. А. Федонкин, Москва, Россия
А. Г. Шеломенцев, Екатеринбург, Россия

Технический редактор *Г. Н. Каблис*

Заведующий редакцией *Т. А. Некучаева*

Editorial Board

- L. N. Andreicheva*, Syktyvkar, Russia
A. I. Antoshkina, Syktyvkar, Russia
T. M. Beznosova, Syktyvkar, Russia
M. A. Bogdasarov, Brest, Belarus
M. A. T. M. Broeckmans, Trondheim, Norway
D. A. Bushnev, Syktyvkar, Russia
Yu. L. Voytekhovskiy, Apatity, Russia
A. D. Gvishiani, Moscow, Russia
V. A. Zhemchugova, Moscow, Russia
A. V. Zhuravlev, Syktyvkar, Russia
D. A. Zedgenizov, Yekaterinburg, Russia
V. A. Kashirtcev, Novosibirsk, Russia
M. Komac, Ljubljana, Slovenia
S. V. Krivovichev, St. Petersburg, Russia
S. K. Kuznetsov, Syktyvkar, Russia
N. A. Malyshev, Moscow, Russia
M. Martins, Ouro Preto, Brazil
T. P. Mayorova, Syktyvkar, Russia
P. Männik, Tallinn, Estonia
A. I. Nikolaev, Apatity, Russia
B. V. Osovetsky, Perm, Russia
Yu. F. Patrakov, Kemerovo, Russia
I. V. Pekov, Moscow, Russia
D. V. Ponomarev, Syktyvkar, Russia
D. Yu. Pushcharovsky, Moscow, Russia
A. M. Pystin, Syktyvkar, Russia
Sh. Sun, Mianyang, China
C. M. Soja, Hamilton, NY, USA
O. V. Udoratina, Syktyvkar, Russia
M. A. Fedonkin, Moscow, Russia
A. G. Shelomentsev, Yekaterinburg, Russia

Technical Editor *G. N. Kablis*

Managing Editor *T. A. Nekuchaeva*

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Выходит ежемесячно. Основан в 1995 году
академиком Н. П. Юшкиным.

Предыдущее название:

Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН

Пятилетний импакт-фактор
РИНЦ журнала (2023) — 0.425



SCIENTIFIC JOURNAL

Monthly issued. Founded in 1995
by Academician N. P. Yushkin.

Former title:

Vestnik of Institute of Geology of Komi SC UB RAS

Five-year RSCI
impact factor (2023) — 0.425

geo.komisc.ru/vestnik

Содержание

Content

Научные статьи

Scientific articles

Кинетика образования индивидуальных углеводородов C ₁ –C ₅ при ступенчатом сухом пиролизе керогена доманикового сланца после гидротермального воздействия <i>Д. А. Бушнев, Н. С. Бурдельная</i>3	Kinetics of formation of individual C ₁ -C ₅ hydrocarbons during stepwise dry pyrolysis of kerogen from Domanik shale after hydrothermal treatment <i>D. A. Bushnev, N. S. Burdelnaya</i>3
Результаты электронно-микроскопических исследований нижнепермских ооидных доломитов (Южный Тиман) <i>О. С. Ветошкина</i>12	The results of electron microscopic studies of the Lower Permian ooid dolomites (South Timan) <i>O. S. Vetoshkina</i>12
Новые данные о строматопороидеях эмского возраста на Полярном Урале (р. Большая Уса) <i>Е. В. Антропова</i>21	New data on stromatoporoidea of the Emsian age in the Polar Urals (Bolshaya Usa River) <i>E. V. Antropova</i>21
Минералого-технологическая оценка отходов ЦОФ «Кузбасская» (Кемеровская область) <i>Т. А. Чикишева, А. Г. Комарова, Н. Ю. Турецкая</i>28	Mineralogical and technological assessment of waste from the Kuzbasskaya Central Processing Plant (Kemerovo region) <i>T. A. Chikisheva, A. G. Komarova, N. Yu. Turetskaya</i>28
Применение нейронных сетей для распознавания хитиной оболочки на изображениях <i>Р. Р. Якупов, К. В. Гусманова</i>35	Application of neural networks for chitinozoans recognition in images <i>R. R. Yakupov, K. V. Gusmanova</i>35

Хроника, события, факты. История науки

Chronicle, events, facts. History of Science

Встреча обогатителей в научной столице Кольского Заполярья (Плаксинские чтения – 2024)40	Meeting of ore enrichment specialists in the scientific capital of the Kola Polar region (Plaksin Readings – 2024).....40
Памяти Владимира Степановича Цыганко (13.02.1938–28.09.2024)42	In the memory of Vladimir Stepanovich Tsyganko (13.02.1938–28.09.2024)42

Правила
оформления
статей



Vestnik
article
Formatting



Кинетика образования индивидуальных углеводородов C_1-C_5 при ступенчатом сухом пиролизе керогена доманиковского сланца после гидротермального воздействия

Д. А. Бушнев, Н. С. Бурдельная

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар
boushnev@geo.komisc.ru

В статье представлены результаты определения кинетических характеристик образования отдельных углеводородных газов на разных этапах искусственно достигнутой термической зрелости доманиковского сланца, отобранного из обнажения по р. Чуть (Ухтинский район). На основании данных ступенчатого пиролиза остаточного керогена, выделенного после гидротермального воздействия на доманиковый сланец, рассчитаны распределения потенциала образования индивидуальных углеводородов состава C_1-C_5 по шкале энергий активации (кинетические спектры). Кинетические спектры *n*-бутана и *n*-пентана не изменяются с ростом температуры гидротермального эксперимента и нарастанием зрелости органического вещества. Максимум распределения потенциала по шкале энергий активации метана и этана смещается в область более высоких значений при росте термической зрелости. Полученные результаты могут быть использованы для уточнения условий реализации потенциала газообразования в доманиковых отложениях Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции.

Ключевые слова: углеводородные газы, кероген, доманиковый сланец, кинетический спектр, гидротермальный эксперимент, ступенчатый сухой пиролиз

Kinetics of formation of individual C_1-C_5 hydrocarbons during stepwise dry pyrolysis of kerogen from Domanik shale after hydrothermal treatment

D. A. Bushnev, N. S. Burdelnaya

Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar

The article presents the results of determining the kinetic characteristics of the formation of individual hydrocarbon gases at different stages of artificially increased thermal maturity of the Domanik shale from an Chut River outcrop (Ukhta District). Based on the data of stepwise pyrolysis of residual kerogen isolated from the shale after hydrothermal treatment, the distributions of the formation potential of individual hydrocarbons of the composition C_1-C_5 by the activation energy scale (kinetic spectra) were determined. The kinetic spectra of *n*-butane and *n*-pentane do not change with increasing temperature of the hydrothermal experiment and increasing maturity of the organic matter. The maximum of the potential distribution on the activation energy scale of methane and ethane shifts to the region of higher values with increasing thermal maturity. The results can be used to clarify the conditions for the implementation of the gas formation potential in the domanik deposits of the Timan-Pechora basin.

Keywords: hydrocarbon gases, kerogen, domanik shale, kinetic spectrum, hydrothermal experiment, stepwise dry pyrolysis

Введение

Образование керогеном углеводородных газов в процессе катагенеза является одним из проявлений или составляющей нафтидогенеза в целом (Тиссо, Вельте, 1981; Рогозина, 1983). Можно выделить два ключевых момента в задаче изучения образования углеводородов органическим веществом (ОВ). Первый — определить механизмы образования углеводородов, в данном случае газов, веществом, находящимся на определённом этапе термического созревания, и второй — выяснить, как изменяется структура керогена по мере его термического созревания и реализации им своего углеводородного потенциала (Behar et al., 1997; Астахов, 2016; Leushina et al., 2021). Поэтому наш подход к изучению газообразования керогена основан на совместном применении двух взаимодополняющих

термических методов. Для моделирования термического созревания керогена в составе породы применяется водный термолиз (гидротермальный эксперимент в автоклаве) (Lewan, 1985; Behar et al., 1997; Lewan, Ruble, 2002; Меленевский и др., 2009; Бушнев, Бурдельная, 2013; Бушнев и др., 2023а; Калмыков и др., 2021), а для изучения керогена определённой стадии термического созревания — сухой высокотемпературный пиролиз, причём последний — в варианте ступенчатого повышения температуры (Wang et al., 2013; Liao et al., 2015; Gai et al., 2018).

Целью настоящего исследования является анализ изменения распределения потенциала образования углеводородных газов состава C_1-C_5 по шкале энергий активации на основании данных, полученных в результате ступенчатого пиролиза керогена доманико-

Для цитирования: Бушнев Д. А., Бурдельная Н. С. Кинетика образования индивидуальных углеводородов C_1-C_5 при ступенчатом сухом пиролизе керогена доманиковского сланца после гидротермального воздействия // Вестник геонаук. 2024. 9(357). С. 3–11. DOI: 10.19110/geov.2024.9.1

For citation: Bushnev D. A., Burdelnaya N. S. Kinetics of formation of individual C_1-C_5 hydrocarbons during stepwise dry pyrolysis of kerogen from Domanik shale after hydrothermal treatment. Vestnik of Geosciences, 2024, 9(357), pp. 3–11, doi: 10.19110/geov.2024.9.1

вого сланца до и после гидротермального воздействия, для исследования молекулярных механизмов образования углеводородов.

Методика работ

Для исследования был отобран доманиковский горючий сланец из обнажения по р. Чуть Ухтинского района (Республика Коми, Тимано-Печорская провинция). Горючий сланец представляет собой кремнисто-карбонатную породу с содержанием органического углерода в породе 19.6 %. Сам сланец битуминозный, содержит кероген II типа, характеризующийся значениями атомных отношений Н/С и О/С — 1.23 и 0.09 соответственно (Бушнев, Бурдельная, 2013).

Гидротермальный эксперимент с предварительно дебитуминизированной породой проводился в автоклаве объёмом 740 мл при температурах (°C): 250 (24 и 72 часа), 275 (24 и 72 часа), 300 (24 и 72 часа), 325 (24 и 72 часа), 350 (24, 48 и 72 часа) и 375 (24 часа) — по методике, изложенной в работе (Бушнев и др., 2023а).

Сухой пиролиз выполнялся с использованием хроматографа «Кристалл-2000М», оснащённого пиролитической системой ввода, разработанной в ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по авторской методике (Бушнев и др., 2023б). Пиролиз проводится при температурах 333, 435, 522, 618, 710 и 800 °C (время 10 с) при последовательном нагреве одной и той же навески с анализом газообразных продуктов каждой температурной ступени.

Результаты пиролитического исследования доманиковского сланца по методу Rock-Eval получены для исходного сланца и суточных экспериментов в ТПУ (Томск) на приборе Rock-Eval-6 turbo, а для двух- и трёхсуточных — в МГУ им. М. В. Ломоносова (Москва) с использованием пробова Hawk.

Основа расчётов распределений энергий активации образования газообразных углеводородов по данным ступенчатого пиролиза — уравнения химической кинетики первого порядка:

- скорость реакции:

$$-dC/dt = kC;$$

- концентрация реагента к моменту времени t:

$$C(t) = C_0 \exp(-kt);$$

- уравнение Аррениуса:

$$k = A \exp(-E_a/RT).$$

Выход при пиролизе углеводородного газа представляется суммой выходов так называемых псевдокомпонентов, характеризующихся заранее заданными значениями энергии активации, распределение выходов которых как раз и является искомым кинетическим спектром (композиционная кинетика). Количество каждого углеводородного газа, образованного на температурной ступени T_j , определялось из следующего выражения:

$$V(T_j, t) = \sum_{i=1}^n a_i \left(C_0 - \sum_{j=1}^{j-1} V(T_j, t) \right) \times \left(1 - \exp \left(-A \exp \left(\frac{-E_i}{RT_j} \right) t \right) \right),$$

где C_0 — максимально возможный выход углеводородного газа (совпадает с концентрацией структуры-пред-

шественника и равна суммарному выходу компонента по всем температурным ступеням), j — номер температурной ступени, i — номер псевдокомпонента, a_i — доля псевдокомпонента, а E_i — его энергия активации. Константа Аррениуса принималась одинаковой для всех псевдокомпонентов, в наших расчётах это $1 \times 10^{14} \text{ с}^{-1}$. Расчёт распределения энергий активации производился путём численного решения задачи о минимизации суммы квадратов разницы между измеренным и вычисленным значением выхода углеводородного газа на всех температурных ступенях. Расчёт выполнялся в программе Excel надстройкой Solver.

Результаты и их обсуждение

По данным пиролиза Rock-Eval, повышение температуры гидротермального эксперимента привело к увеличению значения показателя T_{\max} от 413 до 482 °C. Тренд экспериментальных изменений показателей Rock-Eval в гидротермальном эксперименте в основном соответствует тренду изменений органического вещества доманика при натуральном катагенезе (рис. 1). Расчётная величина EASY %Ro достигла 1.18 при температуре 375 °C (24 часа) (Sweeney, Burnham, 1990).

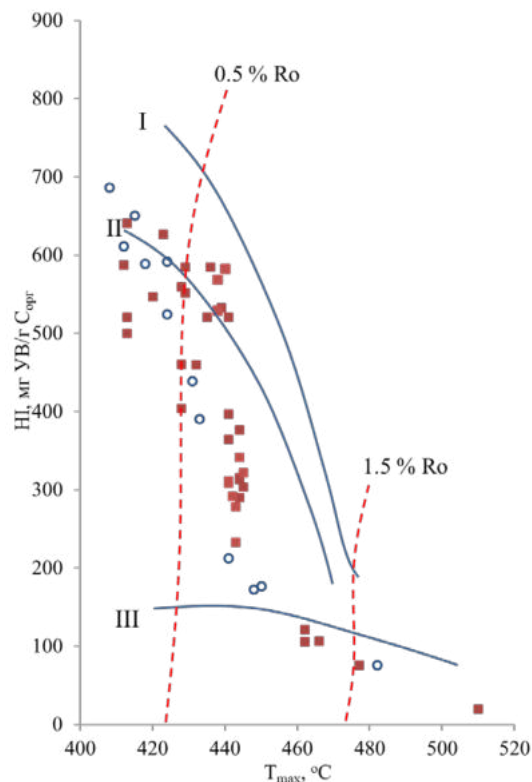


Рис. 1. Зависимость от T_{\max} показателя HI, полученного по данным Rock-Eval-пиролиза: квадратики соответствуют ранее опубликованным данным по породам доманика (Бушнев и др., 2023с), кружочки — данным, полученным после гидротермального эксперимента доманиковой породы

Fig. 1. Dependence of HI index on T_{\max} obtained from Rock-Eval pyrolysis data: squares correspond to previously published data on Domanik rocks (Bushnev et al., 2023c), circles correspond to data obtained after a hydrothermal experiment on Domanik rock



Кинетические спектры метана, этана, *n*-бутана и *n*-пентана для исходного керогена и для керогена, подвергнутого гидротермальному воздействию, представлены на рис. 2, 3 и в табл. 1 и 2.

На рис. 2 и в табл. 1 видно, что кинетические спектры образования метана и этана в сухом пиролизе керогена претерпевают изменения при гидротермальной обработке доманиковского сланца в автоклаве. В случае метана и этана чётко фиксируется перераспреде-

ление потенциала по шкале энергий активации образования этих углеводородов. Для незрелого и слабопреобразованного керогена исследуемого образца основной максимум образования метана лежит в диапазоне 49–60 ккал/моль (табл. 1). Для наиболее зрелого керогена в данной серии экспериментов, полученного при гидротермальном воздействии 375 °С/24 часа, наблюдается значительное «плечо» при значениях 61–67 ккал/моль. В случае этана основной макси-

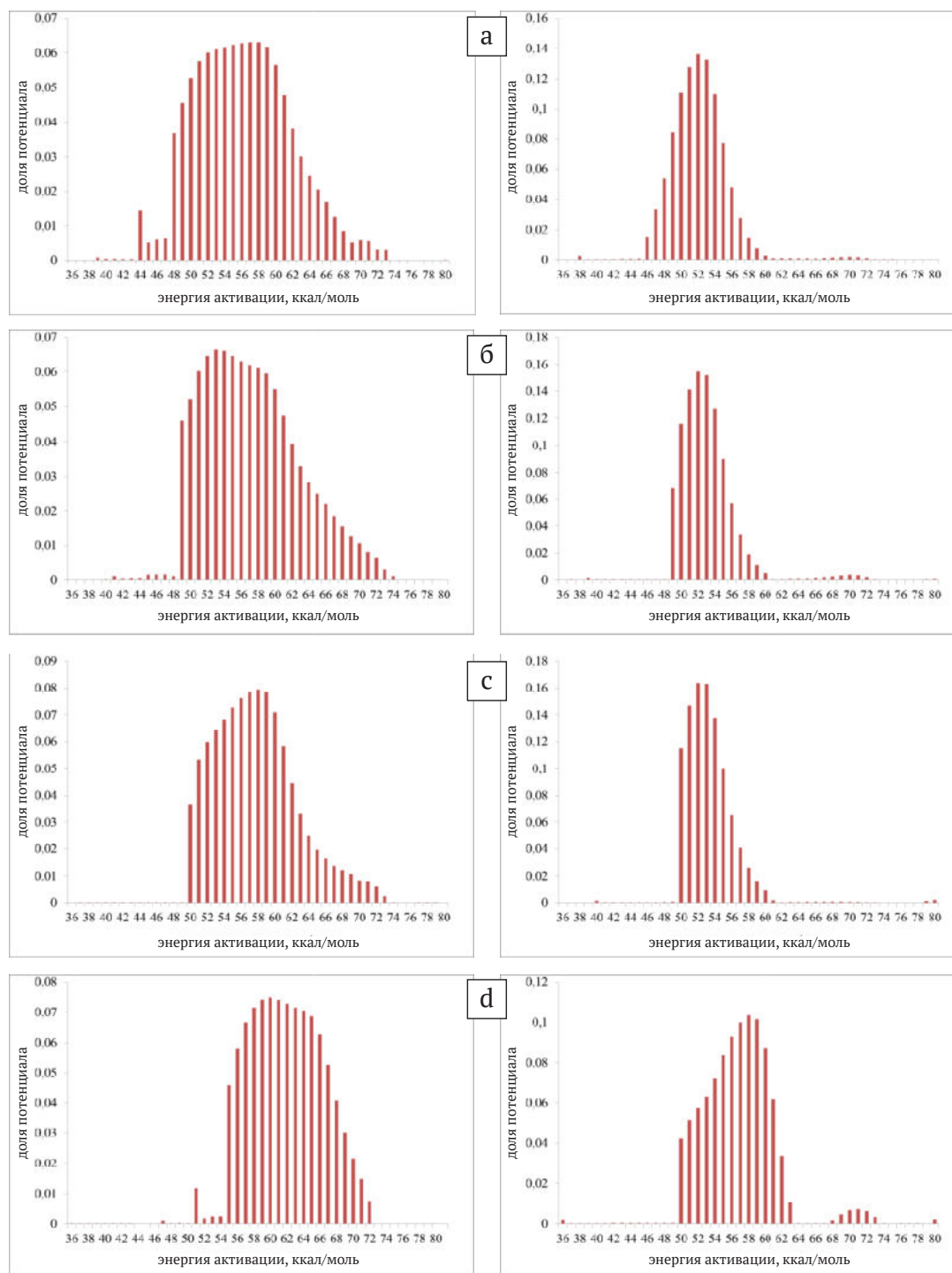


Рис. 2. Распределение начального потенциала образования метана (левая колонка) и этана (правая колонка) по шкале энергий активации при сухом ступенчатом пиролизе керогена до и после гидротермального воздействия:

a — для исходного керогена, b — после 275 °С/24 ч, c — после 325 °С/24 ч, d — после 375 °С/24 ч

Fig. 2. Kinetic spectra for the formation of methane (left) and ethane (right) during dry stepwise pyrolysis of kerogen before and after hydrothermal treatment:

a — for the initial kerogen, b — after 275 °С/24 hr, c — after 325 °С/24 hr, d — after 375 °С/24 hr

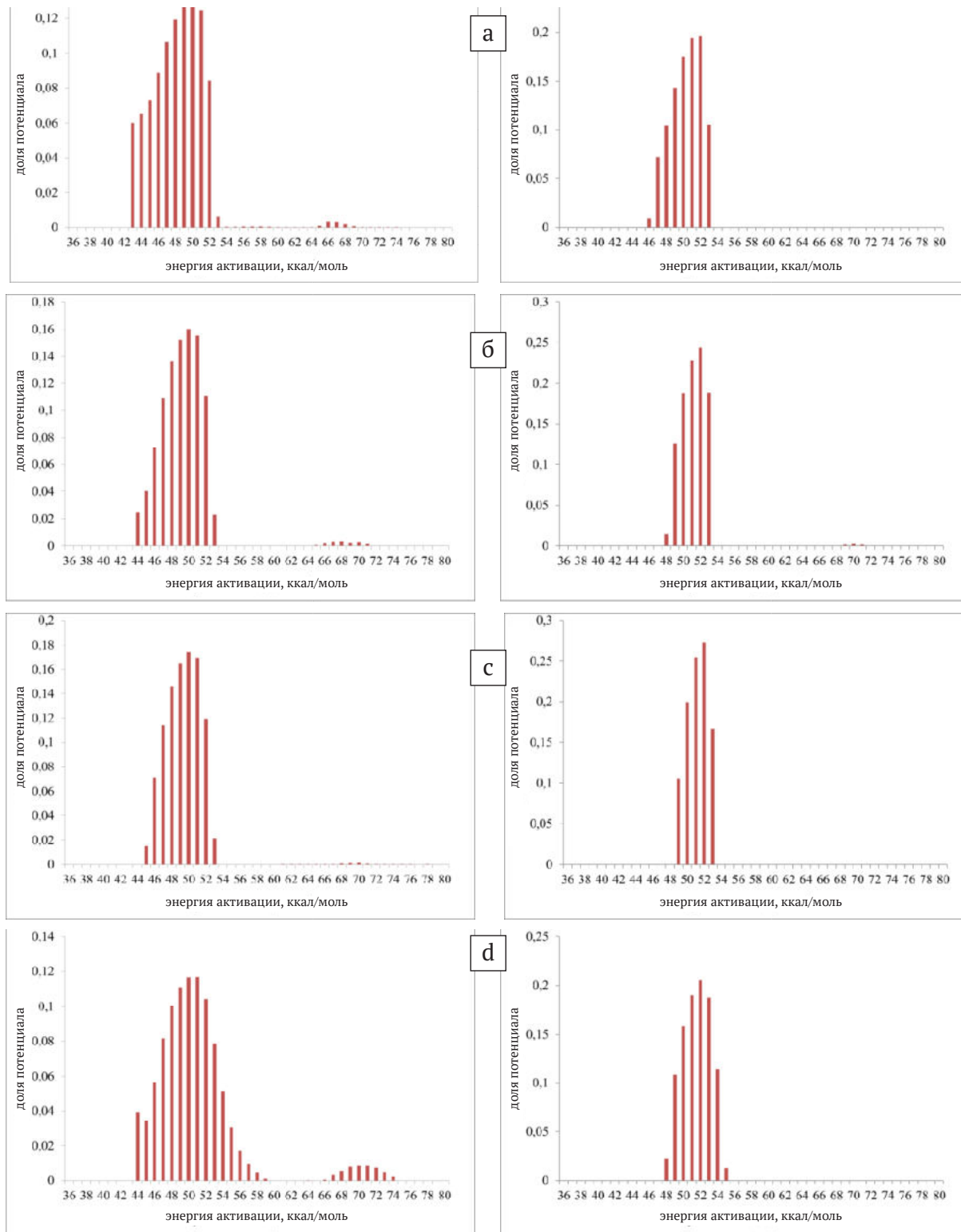


Рис. 3. Распределение начального потенциала образования *n*-бутана (левая колонка) и *n*-пентана (правая колонка) по шкале энергий активации при сухом ступенчатом пиролизе керогена до и после гидротермального воздействия: а — для исходного керогена, б — после 275 °С/24 ч, с — после 325 °С/24 ч, d — после 375 °С/24 ч

Fig. 3. Kinetic spectra for the formation of *n*-butane (left) and *n*-pentane (right) during dry stepwise pyrolysis of kerogen before and after hydrothermal treatment: a — for the initial kerogen, b — after 275 °C/24 hr, c — after 325 °C/24 hr, d — after 375 °C/24 hr

мум распределения энергий активации для незрелого и слабопреобразованного керогена приходится на 51–53 ккал/моль, а для самого зрелого образца остаточного керогена, выделенного из породы после гидротермальной обработки при 375 °С, фиксируется

максимум при 57–59 ккал/моль (табл. 1). Из представленных результатов следует вывод о том, что в условиях сухого ступенчатого пиролиза керогена доминантного сланца образование метана может быть связано как минимум с тремя химическими источниками



Таблица 1. Кинетические спектры метана, полученные при сухом пиролизе керогена исходного сланца и остаточного керогена после гидротермального воздействия. Частотный фактор 1×10^{14}

Table 1. Kinetic spectra of methane obtained from dry pyrolysis of kerogen of the initial shale and residual kerogen after hydrothermal treatment. Frequency factor 1×10^{14}

E _р , ккал/моль Kcal/mol	Исх. Init.	Температура автоклава, °C/время, ч / Autoclave temperature, °C/time, h											
		250/24	250/72	275/24	275/72	300/24	300/72	325/24	325/72	350/24	350/48	350/72	375/24
36	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
37	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
38	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
39	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
40	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
41	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
42	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
43	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
44	0.001	0.000	0.014	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
45	0.001	0.000	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.001
46	0.027	0.024	0.005	0.018	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.002	0.001	0.000	0.001
47	0.027	0.000	0.005	0.002	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.002	0.001	0.000	0.001
48	0.034	0.048	0.004	0.004	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001
49	0.042	0.035	0.037	0.043	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000
50	0.048	0.039	0.041	0.051	0.051	0.061	0.016	0.065	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000
51	0.052	0.041	0.044	0.056	0.060	0.072	0.042	0.045	0.016	0.006	0.000	0.006	0.000
52	0.054	0.043	0.046	0.059	0.065	0.079	0.047	0.049	0.030	0.007	0.000	0.008	0.000
53	0.056	0.045	0.049	0.061	0.068	0.082	0.052	0.053	0.034	0.040	0.000	0.009	0.000
54	0.059	0.053	0.055	0.063	0.070	0.080	0.061	0.061	0.045	0.052	0.051	0.008	0.000
55	0.063	0.062	0.064	0.065	0.072	0.076	0.073	0.071	0.059	0.068	0.057	0.072	0.067
56	0.066	0.069	0.071	0.067	0.074	0.073	0.084	0.079	0.071	0.082	0.072	0.076	0.060
57	0.069	0.075	0.076	0.068	0.075	0.070	0.091	0.085	0.080	0.092	0.083	0.074	0.070
58	0.070	0.077	0.079	0.068	0.075	0.068	0.095	0.088	0.085	0.097	0.089	0.070	0.077
59	0.067	0.075	0.077	0.065	0.072	0.064	0.092	0.086	0.085	0.096	0.090	0.067	0.080
60	0.059	0.066	0.069	0.058	0.064	0.056	0.081	0.075	0.080	0.087	0.086	0.068	0.080
61	0.048	0.052	0.056	0.048	0.053	0.045	0.064	0.058	0.072	0.072	0.077	0.070	0.078
62	0.037	0.039	0.044	0.038	0.042	0.035	0.047	0.043	0.064	0.058	0.069	0.073	0.076
63	0.029	0.028	0.035	0.031	0.033	0.027	0.035	0.030	0.058	0.047	0.062	0.059	0.074
64	0.023	0.022	0.029	0.026	0.027	0.021	0.026	0.022	0.054	0.040	0.058	0.077	0.072
65	0.018	0.018	0.024	0.022	0.023	0.018	0.020	0.017	0.050	0.034	0.052	0.077	0.068
66	0.013	0.017	0.019	0.020	0.020	0.015	0.016	0.013	0.042	0.029	0.044	0.071	0.059
67	0.009	0.017	0.015	0.018	0.016	0.013	0.013	0.011	0.029	0.024	0.035	0.054	0.046
68	0.004	0.018	0.011	0.016	0.013	0.012	0.011	0.009	0.014	0.019	0.026	0.034	0.034
69	0.006	0.018	0.008	0.015	0.011	0.010	0.009	0.007	0.003	0.015	0.018	0.017	0.025
70	0.006	0.016	0.009	0.012	0.009	0.009	0.011	0.008	0.005	0.012	0.013	0.006	0.017
71	0.006	0.002	0.008	0.006	0.005	0.008	0.008	0.007	0.006	0.009	0.008	0.001	0.011
72	0.003	0.000	0.004	0.000	0.000	0.004	0.004	0.005	0.005	0.005	0.005	0.001	0.002
73	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.004	0.000	0.000	0.001	0.000
74	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.003	0.000	0.000	0.001	0.000
75	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000
76	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
77	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
78	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
79	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
80	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

(химическими структурами) в составе керогена изучаемого доманикового сланца, а образование этана — с двумя. Роль химических источников этих газов с более высокими значениями энергии активации закономерно растёт при увеличении температуры гидротермального воздействия, предшествующего сухому ступенчатому пиролизу.

Распределение потенциалов генерации *n*-бутана и *n*-пентана по шкале энергий активации образования при сухом пиролизе (рис. 3 и табл. 2) с увеличением температуры гидротермального эксперимента

меняется незначительно, основной максимум их распределения неизменен. Вне зависимости от температуры гидротермального эксперимента и достигнутой в нём стадии термического преобразования ОБ максимум распределения потенциала образования *n*-бутана и *n*-пентана приходится на 51—52 ккал/моль (табл. 2). Данный результат свидетельствует в пользу наличия в доманиковом керогене только одного химического источника (структуры), отвечающего за образование при ступенчатом сухом пиролизе *n*-бутана и *n*-пентана.

Таблица 2. Кинетические спектры бутана, полученные при сухом пиролизе керогена исходного сланца и остаточного керогена после гидротермального воздействия. Частотный фактор 1×10^{14}
Table 2. Kinetic spectra of butane obtained from dry pyrolysis of kerogen of the initial shale and residual kerogen after hydrothermal treatment. Frequency factor 1×10^{14}

E _i , ккал/моль Kcal/mol	Исх. Init.	Температура автоклава, °C/время, ч / Autoclave temperature, °C/time, h											
		250/24*	250/72	275/24	275/72	300/24	300/72	325/24	325/72	350/24	350/48	350/72	375/24
36	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
37	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
38	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
39	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
40	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
41	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
42	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
43	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
44	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.003	0.000	0.000	0.000
45	0.030	0.035	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.000	0.000	0.000
46	0.066	0.041	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.007	0.001	0.004	0.000	0.000	0.000
47	0.078	0.052	0.039	0.038	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.000	0.000	0.059
48	0.098	0.078	0.070	0.080	0.000	0.000	0.000	0.044	0.000	0.002	0.000	0.000	0.061
49	0.120	0.107	0.108	0.124	0.021	0.036	0.000	0.130	0.000	0.102	0.043	0.000	0.089
50	0.136	0.128	0.136	0.157	0.163	0.194	0.066	0.172	0.093	0.165	0.146	0.128	0.111
51	0.145	0.141	0.153	0.177	0.210	0.250	0.200	0.198	0.199	0.192	0.177	0.185	0.123
52	0.148	0.147	0.161	0.185	0.232	0.271	0.228	0.208	0.226	0.204	0.193	0.206	0.130
53	0.123	0.134	0.150	0.157	0.213	0.216	0.223	0.175	0.219	0.185	0.185	0.200	0.125
54	0.044	0.091	0.110	0.064	0.126	0.021	0.169	0.062	0.163	0.113	0.143	0.155	0.103
55	0.000	0.029	0.052	0.000	0.003	0.000	0.089	0.000	0.081	0.013	0.081	0.090	0.071
56	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.018	0.000	0.008	0.000	0.026	0.031	0.043
57	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.001	0.000	0.000	0.023
58	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.011
59	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.003
60	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001
61	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000
62	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000
63	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
64	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
65	0.000	0.000	0.002	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000
66	0.003	0.002	0.003	0.002	0.004	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000
67	0.004	0.003	0.003	0.003	0.005	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002
68	0.003	0.003	0.003	0.003	0.004	0.003	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.006
69	0.001	0.004	0.003	0.003	0.003	0.003	0.001	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.008
70	0.000	0.003	0.003	0.003	0.003	0.004	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.010
71	0.000	0.002	0.002	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.010
72	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.008
73	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004
74	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
75	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
76	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
77	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
78	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
79	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
80	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Для понимания применимости и корректности полученных результатов была выполнена оценка разрешения метода определения распределения потенциала генерации углеводорода по шкале значений энергий активации. Оценка разрешения получаемых кинетических спектров важна, например, для ответа на вопрос, являются ли значимыми различия в кинетических спектрах метана, полученных при ступенчатом пиролизе остаточного керогена 275 °C/24 ч и 375 °C/24 ч. Из рис. 2 следует, что отличие упомянутых спектров состоит в резком снижении потенциала образования метана с энергией ак-

тивации в диапазоне 49–55 ккал/моль для образца 375 °C/24 ч.

Для оценки разрешения метода определения кинетического спектра по данным ступенчатого пиролиза с использованным в работе температурным шагом был принят условный результат ступенчатого пиролиза, когда некий продукт образуется только на одной из температурных ступеней либо в равных долях на двух смежных температурных ступенях (рис. 4). Обработка этих гипотетических результатов ступенчатого эксперимента приводит к следующим кинетическим спектрам (рис. 4).

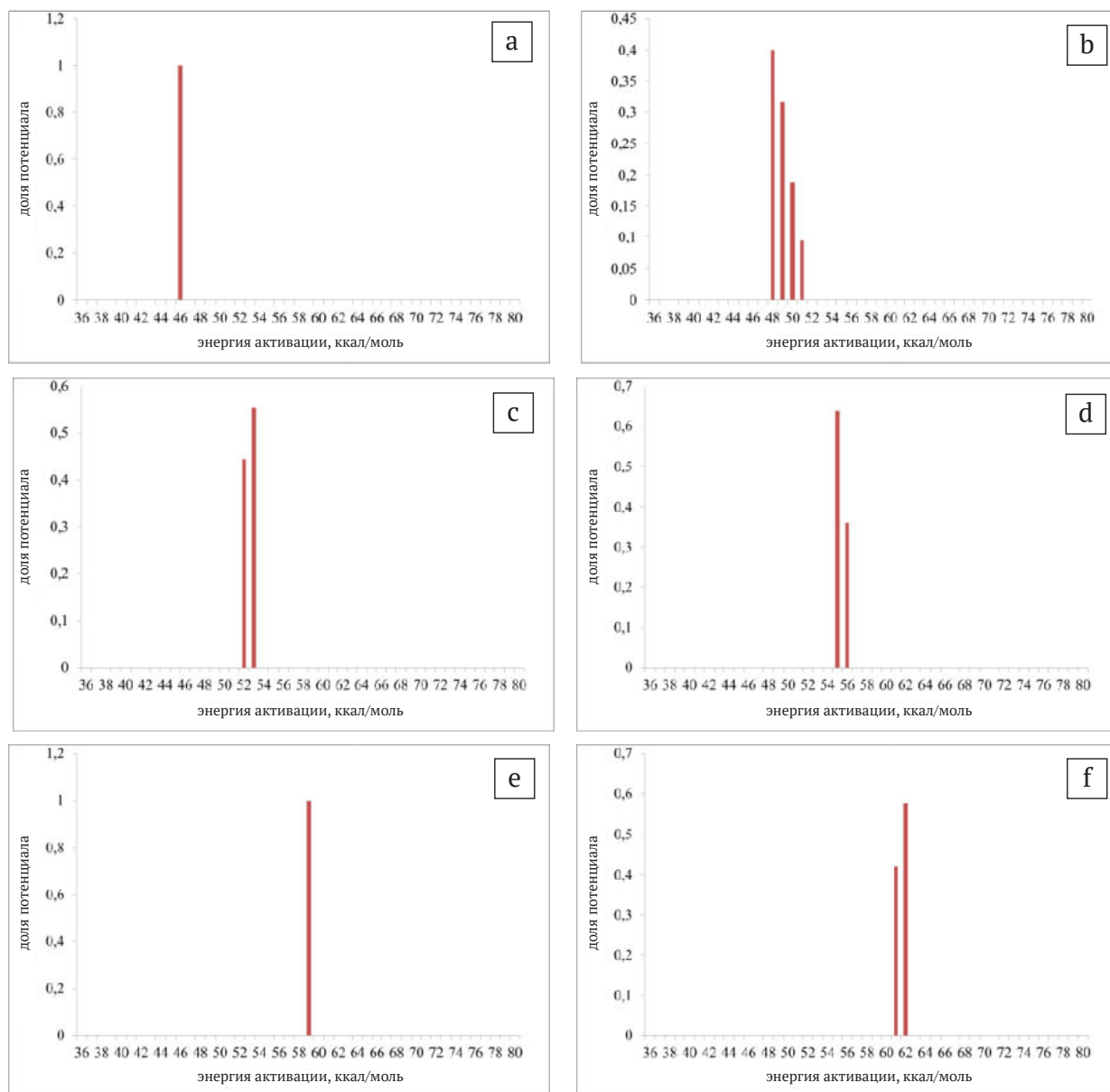


Рис. 4. Кинетические спектры условного, гипотетически образующегося компонента в следующих пропорциях на следующих температурных ступенях:

a – 100 % при 431 °C; b – 50 % при 431 °C и 50 % при 525 °C; c – 100 % при 525 °C; d – 50 % при 525 °C и 50 % при 614 °C; e – 100 % при 614 °C; f – 50 % при 614 °C и 50 % при 704 °C

Fig. 4. Kinetic spectra of a conventional component hypothetically formed in the following proportions at the following temperature steps:

a – 100 % formed at 431 °C; b – 50 % formed at 431 °C and 50 % formed at 525 °C; c – 100 % formed at 525 °C; d – 50 % formed at 525 °C and 50 % formed at 614 °C; e – 100 % formed at 614 °C; f – 50 % formed at 614 °C and 50 % formed at 704 °C

Сравнение кинетических спектров для гипотетического компонента, полностью образующегося при температуре 431 °C (рис. 4, а) или при 525 °C (рис. 4, с), показывает, что максимум распределения потенциала образования условного компонента в первом случае приходится на 46 ккал/моль, а во втором случае на 52–53 ккал/моль (рис. 4). Разница составляет 6–7 ккал/моль. Если условный продукт образовался при двух температурных ступенях – 431 и 525 °C – в равных долях (рис. 4, b), то максимум распределения потенциала его образования соответствует уже 48–51 (49) ккал/моль. Разница со случаями образования 100 % гипотетического компонента составляет 3–4 ккал/моль. Для более высоких температур пиролиза разница положений

рассчитанного максимума кинетического спектра сохраняется (рис. 4, а–f). Значит, представленные результаты расчёта для условного компонента позволяют оценить разрешение в определении распределения потенциала образования углеводорода по энергиям активации не хуже, чем 3–4 ккал/моль, что свидетельствует в пользу корректности сделанных на основе полученных экспериментальных данных выводов.

Заключение

Результаты ступенчатого пиролиза остаточного керогена, полученного после гидротермального воздействия на доманиковый сланец в автоклаве в при-

сутствии воды были использованы для расчёта распределения потенциала образования углеводородных газов состава C_1 — C_5 по шкале энергии активации. Установлено, что образование метана и этана при сухом ступенчатом пиролизе происходит за счёт структур-предшественников, набор которых в керогене претерпевает значительные изменения при гидротермальном воздействии на породу. Повышение температуры гидротермального эксперимента ведёт к исчерпанию структур, дающих метан и этан при значениях энергии активации 48—52 ккал/моль. В случае обоих этих газов для керогена, полученного при максимальной температуре гидротермальной обработки, значительно увеличивается доля потенциала, приходящегося на энергию активации 61—70 ккал/моль (метан) и 56—62 ккал/моль (этан).

Контрастно отличаются результаты изучения энергии активации образования *n*-бутана и *n*-пентана. Эти углеводороды принципиально не изменяют распределение энергии активации их образования в сухом пиролизе с ростом температуры гидротермального воздействия на сланец. Максимум распределения их углеводородного потенциала по энергиям активации приходится на 50—53 ккал/моль. Таким образом, представление результатов сухого ступенчатого пиролиза керогена в виде распределения потенциала образования углеводородных газов состава C_1 — C_5 по значениям энергии активации позволило показать полигенность пиролитических метана и этана и выраженную гомогенность *n*-бутана и *n*-пентана.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 23-27-00139 «Изучение образования газообразных углеводородов керогеном доманика при моделировании его термического преобразования в гидротермальном эксперименте и сухом пиролизе»).

Литература / References

- Астахов С. М. Кинетический спектр реакций преобразования органического вещества нефтегазоматеринских отложений // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2016. Т. 11. № 1. URL: http://www.ngtp.ru/rub/1/5_2016.pdf
- Astakhov S. M. Chemical kinetics of organic matter transformation of petroleum source rocks. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika*, 2016, V. 11, No. 1. URL: http://www.ngtp.ru/rub/1/5_2016.pdf (in Russian)
- Бушнев Д. А., Бурдельная Н. С., Ильченко А. А., Сенникова Я. Д. Образование углеводородных газов доманиковым сланцем при пиролизе в автоклаве в присутствии воды // Вестник геонаук. 2023а. № 10. С. 37—41. DOI: 10.19110/geov.2023.10.4
- Bushnev D. A., Burdel'naya N. S., Ilchenko A. A., Sennikova Ya. D. Formation of hydrocarbon gases in Domanik shale during hydrous pyrolysis. *Vestnik of geosciences*, 2023a, No. 10, pp. 37—41. (in Russian)
- Бушнев Д. А., Бурдельная Н. С. Моделирование процесса нефтеобразования углеродистым сланцем доманика // Нефтехимия. 2013. Т. 53. № 3. С. 163—170. DOI: 10.7868/S0028242113030027
- Bushnev D. A., Burdel'naya N. S. Modeling of Oil Generation by Domanik Carbonaceous Shale. *Pet. Chem.* 2013, V. 53, No. 3, pp. 145—151. DOI: 10.1134/S096554411303002X
- Бушнев Д. А., Бурдельная Н. С., Ильченко А. А., Сенникова Я. Д. Состав углеводородных газов сухого пиролиза керогена доманикового сланца после гидротермального эксперимента // Нефтехимия. 2023b. Т. 63. № 5. С. 671—678. DOI: 10.31857/S0028242123050052
- Bushnev D. A., Burdel'naya N. S., Ilchenko A. A., Sennikova Ya. D. Composition of hydrocarbon gases formed by dry pyrolysis of domanik shale kerogen after hydrothermal experiment. *Petrol. Chemistry*, 2023b, V. 63, No. 5. DOI: 10.1134/S0965544123080017.
- Бушнев Д. А., Бурдельная Н. С., Большакова М. А. Геохимия углеводородов — биомаркеров и изотопов углерода органического вещества доманиковых отложений Тимано-Печорского бассейна // Геохимия. 2023с. Т. 68. № 2. С. 139—148. DOI: 10.31857/S0016752523020036
- Bushnev D. A., Burdel'naya N. S., Bolshakova M. A. Geochemistry of Hydrocarbons-Biomarkers and Carbon Isotopes of Organic Matter in the Domanik Deposits of the Timan-Pechora Basin. *Geochemistry International*. 2023c, V. 61, No. 2, pp. 127—136. DOI: 10.1134/S0016702923020039
- Калмыков А. Г., Гафурова Д. Р., Тихонова М. С., Видищева О. Н., Иванова Д. А., Манько И. Э., Корост Д. В., Кудяев А. А., Бычков А. Ю., Калмыков Г. А. Влияние состава пород высокоуглеродистых формаций на процесс генерации нефти и газа (результаты лабораторного моделирования) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2021. № 1. С. 85—98.
- Kalmykov A. G., Gafurova D. R., Tikhonova M. S., Vidi-shcheva O. N., Ivanova D. A., Manko I. E., Korost D. V., Kudaev A. A., Bychkov A. Yu., Kalmykov G. A. Rock shale mineral composition influence on oil and gas generation process (results from laboratory experiments). *Moscow University Bulletin. Series 4. Geology*. 2021. No. 1 (1), pp. 85—98. <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2021-1-85-98> (in Russian).
- Меленевский В. Н., Конторович А. Э., Вуу — Лианг Хуанг, Ларичев А. И., Бульбак Т. А. Аквапиролиз органического вещества рифейского аргиллита // Геохимия. 2009. № 5. С. 504—512.
- Melenevsky V. N., Kontorovich A. E., Huang W.-L., Larichev A. I., Bul'bak T. A. Hydrothermal pyrolysis of organic matter in riphean mudstone. *Geochemistry International*. 2009, V. 47, No. 5, pp. 476—484.
- Рогозина Е. А. Газообразование при катагенезе органического вещества осадочных пород. Л.: Недра, 1983. 162 с.
- Rogozina E. A. Gas formation during catagenesis of organic matter of sedimentary rocks. Leningrad: Nedra, 1983, 162 p. (in Russian)
- Тиссо Б., Вельте Д. Образование и распространение нефти. М.: Мир, 1981. 504 с.
- Tissot B. P., Welte D. H. *Petroleum Formation and Occurrence*. 1984, 2nd Edition, Springer-Verlag, Berlin, 699 p.
- Behar F., Vandenbroucke M., Tang Y., Marquis F., Espitalie J. Thermal cracking of kerogen in open and closed systems: determination of kinetic parameters and stoichiometric coefficients for oil and gas generation // *Org. Geochem.* 1997. Vol. 26, No. 5/6. P. 321—339.
- Gai H., Tian H., Xiao X. Late gas generation potential for different types of shale source rocks: Implications from pyrolysis experiments // *International Journal of Coal Geology*. 2018. Vol. 193. P. 16—29. doi:10.1016/j.coal.2018.04.009.



- Leushina E., Mikhaylova P., Kozlova E., Polyakov V., Morozov N., Spasennykh M. The effect of organic matter maturity on kinetics and product distribution during kerogen thermal decomposition: the Bazhenov Formation case study // *J. Pet. Sci. Eng.* 2021. Vol. 204. 108751. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108751>.
- Lewan M. D. Evaluation of petroleum generation by hydrous pyrolysis experimentation // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences.* 1985. Vol. 315. No. 1531. P. 123–134.
- Lewan M. D., Ruble T. E. Comparison of petroleum generation kinetics by isothermal hydrous and nonisothermal open-system pyrolysis // *Org. Geochem.* 2002. Vol. 33. 1457–1475.
- Liao Y., Zheng Y., Pan Y., Sun Y., Geng A. A method to quantify C₁–C₅ hydrocarbon gases by kerogen primary cracking using pyrolysis gas chromatography // *Org. Geochem.* 2015. Vol. 79. P. 49–55. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2014.12.009>.
- Sweeney J. J., Burnham A. K. Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics // *AAPG Bulletin.* 1990. № 74 (10). P. 1559–1570. <https://doi.org/10.1306/OC9B251F-1710-11D7-8645000102C1865D>.
- Wang Q., Lu H., Greenwood P., Shen C., Liu J., Peng P. Gas evolution during kerogen pyrolysis of Estonian Kukersite shale in confined gold tube system // *Org. Geochem.* 2013. Vol. 65. P. 74–82. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2013.10.006>.

Поступила в редакцию / Received 21.07.2024



Результаты электронно-микроскопических исследований нижнепермских ооидных доломитов (Южный Тиман)

О. С. Ветошкина

Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар
vetoshkina@geo.komisc.ru

В работе представлены результаты исследований нижнепермских доломитов, содержащих ооиды, выходы которых обнаружены в северо-восточной части Восточно-Европейской платформы и приурочены к верхнему-среднему течению реки Вычегды (Южный Тиман, недалеко от устья р. Нем). Электронно-микроскопические исследования выявили сложное строение доломитов, обусловленное их гетерогенной природой. Выявлены ооиды, остатки микрофитофоссилий (микрофитоолиты), биоморфозы по разным фаунистическим остаткам. Результаты проведенных исследований указывают на разные способы образования доломитов. С одной стороны, в структуре ооидов (оолитов) были обнаружены следы бактериальных сообществ, указывающие на их биохемогенную природу. На поверхности и внутри доломитовых ооидов наблюдаются органические микрообразования в виде пленок (реликты бактериальных пленок?) и нитей, похожих на фоссилизированные остатки цианобактерий. Микробиота, изменяя среду, в процессе своей жизнедеятельности могла способствовать осаждению протодоломитовых фаз. С другой стороны, в структуре доломитов присутствуют минералы, свидетельствующие о многофазности образования пород.

Ключевые слова: карбонатные отложения, доломиты, ооиды, микрофитофоссилии

The results of electron microscopic studies of the Lower Permian ooid dolomites (South Timan)

O. S. Vetoshkina

Institute of geology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar

The article presents the results of studies of the Lower Permian dolomites containing ooids. They outcrop in the northeastern part of the East European Platform and are confined to the upper-middle reaches of the Vychegda River (South Timan, near the mouth of the Nem River). Electron microscopic studies have revealed the complex structure of the dolomites conditioned by their heterogeneous nature. We found ooids, remains of microphytophossils (microphytoliths), and biomorphoses from various faunal remains. The results of the conducted research can be interpreted in different ways. On the one hand, traces of bacterial communities were found in the structure of zooids (oolites) from the studied rocks, indicating their biochemogenic nature. In this case, the microbiota, by changing the environment, could contribute to the deposition of protodolomite phases in the course of its vital activity. On the other hand, the dolomites contain mineral phases testifying to the multiphase formation of rocks.

Keywords: carbonate deposits, dolomites, ooids, microphytophossils

Введение

Нижнепермские карбонатные отложения Южного Тимана являются распространенными и важными в практическом значении объектами, перспективными для исследования. Среди слагающих эти толщи пород существенную роль играют ооидные доломиты. Изучение их состава и строения может внести значительный вклад в понимание механизмов осаждения карбонатного породообразующего вещества, особенно в свете новых представлений о роли различных, в том числе биогенных, факторов. Вопреки ранним утверждениям о том, что все доломиты образовались одинаковым образом в результате замещения известняков, электронно-микроскопические исследования выявили морфологические признаки, показывающие различные механизмы их формирования.

Вопросы, связанные с изучением условий образования доломитов, широко освещены в литературе. В некоторых работах представлены схемы доломитизации, происходящей в результате взаимодействия растворов разного химического состава (Nader et al., 2007; Warren, 2000 и др.). Известно, что непосредственное осаждение упорядоченного, со стехиометрическим соотношением кальция и магния доломита невозможно при низкой температуре в осадочной обстановке, поскольку его кристаллизация в этих условиях затруднена чрезвычайно низкой скоростью роста кристаллов. На доломитизацию карбонатов влияют постседиментационные изменения, которые в основном контролируются химическими характеристиками вмещающей породы, составом поровых растворов и скоростью потока растворов в осадочной толще (Land, 1980). Однако в последнее время широко обсуждается роль биогенного фактора в процессе доломитообразования, в част-

Для цитирования: Ветошкина О. С. Результаты электронно-микроскопических исследований нижнепермских ооидных доломитов (Южный Тиман) // Вестник геонаук. 2024. 9(357). С. 12–20. DOI: 10.19110/geov.2024.9.2

For citation: Vetoshkina O. S. The results of electron microscopic studies of the Lower Permian ooid dolomites (South Timan). Vestnik of Geosciences, 2024, 9(357), pp. 12–20, doi: 10.19110/geov.2024.9.2



ности связанного с участием микроорганизмов (Кузнецов, Журавлева, 2022).

Карбонатные ооиды ранее рассматривались или как абиотические образования (оолиты), образующиеся хемогенным равномерным обрастанием зародыша карбонатом в подвижной среде в результате перемещения теплых вод, перенасыщенных CaCO_3 (Sumner, Grotzinger, 1993 и др.), или как результат жизнедеятельности бактерий или водорослей. Во втором случае ооиды образованы нитевидными зелеными и синезелеными водорослями, которые растут, создавая липкие маты, а по мере продолжающегося роста захватывают минеральные частицы и тем самым образуют вокруг ядра очень тонкие концентры различного генезиса. Экспериментально показано (Орлеанский и др., 2002), что образование древних ископаемых онколитов — это не литификация кокковых организмов фито-, зооприсхождения, а продукт жизнедеятельности нитчатых цианобактерий. Причем в этом процессе определяющую роль играют биологические особенности этих организмов, а именно способность к движению, росту по твердому субстрату (оплетать его), фототаксис (движение к свету), фотосинтез (Орлеанский и др., 2002). В случае с оолитами биогенный фактор образования вышел на первый план благодаря применению современных методов исследования с помощью электронной микроскопии. В обоих случаях обязательным условием, помимо наличия цианобактерий, является турбулентное состояние среды и насыщение (перенасыщение) воды по тем или иным веществам (карбонатам, фосфатам и т. д.). В большинстве случаев ооиды накапливаются в таких участках водоемов, где зерна более или менее непрерывно перекачиваются волнами или приливными течениями в период их роста. На карбонат-продукцию ооидов существенным образом влияют некоторые метаболические процессы (фотосинтез цианобактерий и восстановление сульфатов), осуществляемые гетеротрофными бактериями, которые могут нарушать динамическое равновесие, повышать щелочность воды и, следовательно, способствовать осаждению карбонатов (Antoshkina et al., 2020). В зависимости от величины щелочности создаваемой среды осаждаются либо карбонаты кальция, либо магниезиальные карбонаты в виде доломита и магнезита (Кузнецов, Журавлева, 2022). По мнению этих авторов, доломитизация обусловлена именно активной микробиальной деятельностью, которая сугубо локально определила высокую щелочность среды и осаждение в связи с этим магниезиальных карбонатов. Последние, скорее всего в диагенезе, кристаллизовались в виде доломита (Кузнецов, Журавлева, 2022).

Исследование состава и строения нижнепермских доломитов в районе Жежимпармы проводилось с целью выявления признаков, показывающих механизмы их формирования, а также помогающих восстановить детали обстановок в литогенезе и определить постседиментационные процессы, которые повлияли на изученные породы.

Фактический материал

Настоящее исследование направлено на изучение доломитов. В качестве объекта были выбраны нижнепермские доломиты, выходы которых расположены



Рис. 1. Карта исследуемой территории. Точками указаны участки отбора образцов

Fig. 1. Map of the studied area. The dots indicate the sampling sites

в северо-восточной части Восточно-Европейской платформы и приурочены к верхнему-среднему течению реки Вычегды (Южный Тиман, недалеко от устья р. Нем). Тектоническое строение района исследования предопределено расположением его в северо-восточной краевой части Восточно-Европейской платформы в зоне сочленения Волго-Уральской антеклизы, Мезенской синеклизы и Тиманского поднятия (Аэрофотогеологическая..., 2001). Литологический состав отложений в целом однообразен и выдержан по площади. Они представлены доломитами, доломитизированными известняками с включениями и прослоями ангидрита и гипса. В восточной части территории в разрезе преобладают доломиты с прослоями известняков, в верхах разреза появляются глины. В составе нижнепермских отложений выделены нерасчлененные артинский и кунгурский ярусы. Отложения в районе Жежимпармы представлены преимущественно мелководно-морскими и лагунными осадками (Аэрофотогеологическая..., 2001). Были отобраны образцы из двух участков в районе с. Усть-Нем (рис. 1). Внешний вид двух карбонатов сходный. Различить их можно лишь после минералого-химических исследований.

Первый участок расположен около с. Усть-Нем (рис. 1). Доломиты на одном участке слагают целый пласт, а на другом встречаются известняки. В основании этого разреза преобладают доломиты серые, светло-серые, микрозернистые, массивные, участками оолитовые, пористые, кавернозные. На востоке с. Усть-Нем, в бассейне р. Вычегды, двухметровая толща представлена похожими неуплотненными оолитовыми доломитами.

Методы

Вещественный состав карбонатных пород определялся в лаборатории химии минерального сырья ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по методике 8-компонентного карбонатного анализа. В процессе анализа породу разделяли на солянокислую вытяжку и нерастворимый

остаток (н. о.). Обработка проводилась по стандартной методике карбонатного анализа (5 % HCl с последующим нагреванием до закипания). Данные карбонатных анализов обрабатывали путем пересчета их на нормативные минералы: $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, CaCO_3 , MgCO_3 , FeCO_3 , MnCO_3 (Юдович, Кетрис, 2000).

Определение минерального состава и деталей структуры производилось посредством рентгенодифрактометра и сканирующего электронного микроскопа вместе с микронзондовым анализом (ThermoFischer Scientific Axia ChemiSEM с энергодисперсионной приставкой TrueSight, углеродистое напыление, ЦКП «Геонаука», ИГ ФИЦ Коми УрО РАН). Пробы представляли собой свежие сколы и полированные аншлифы.

Изотопный состав кислорода и углерода в карбонатных образцах определялся путем анализа газобразной CO_2 , полученной при взаимодействии с 100 % фосфорной кислотой при стандартных условиях температуры и давления. Анализ содержания стабильных изотопов углерода и кислорода ($\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$) был проведен на масс-спектрометре Delta V Advantage в ЦКП «Геонаука» ИГ ФИЦ Коми ИЦ УрО РАН. Изотопные соотношения выражены в значении дельта в ‰. Погрешность в значениях $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{13}\text{C}$ составляет примерно ± 0.1 ‰ и менее. Значения $\delta^{13}\text{C}$ приведены к международному стандарту PDB, а $\delta^{18}\text{O}$ — SMOW. Для приведения значений изотопного состава кислорода к стандарту PDB была использована формула пересчета [по: Фор, 1989].

Результаты исследований

По рентгенографическим данным преобладающим минералом в составе изученных пород является доломит. Иногда в небольшом количестве присутствует кальцит.

Содержание карбонатов в образцах достигает 99 % (см. табл. 1). Соотношение CaO , MgO и CO_2 тоже показывает, что основным породообразующим минералом в породах является доломит. Анализы выявили неоднородность доломитов. Согласно нормативному пересчету результатов химического анализа на долю доломита $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ приходится от 95.58 до 99.59 %, а кальцита CaCO_3 — от 0.27 до 3.86 %.

Отмечаются следовые количества Fe и Mn. Точечный состав пород, определенный при помощи микронзондового анализа (Ca — 22.4–36.0 %; Mg — 12.2–21.7 %), свидетельствует о присутствии некоторого количества кальцита. Установлено, что замещающие доломиты беднее Ca, Mn и Fe не обнаруживаются.

Изученные нами доломиты имеют похожие изотопные свойства (Ветошкина, 2019), а также минералогическое сходство с артинскими доломитовыми породами около с. Мыелдино (рис. 1). Карбонат в восьми репрезентативных образцах характеризуется узким диапазоном изотопных показателей (табл. 1). Величина $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$ варьирует от 5.3 до 6.5 ‰ PDB, а $\delta^{18}\text{O}_{\text{карб}}$ — от -6.0 до -2.7 ‰ PDB.

На основании электронно-микроскопических исследований выявлено сложное строение, обусловленное гетерогенной природой доломитов. Выявляются ооиды, биоморфозы по разным фаунистическим остаткам, микрофитофоссилии, углеродные пленки и нити, сохранившиеся в различных формах. Важными компонентами в отложениях являются доломитовые ооиды, представляющие собой обособленные образования сферической, эллипсоидной форм, размер которых варьирует от 0.5 до 2 мм (рис. 2). Ооиды состоят из микрокристаллического и радиально-воло-



Рис. 2. Нижнепермский ооидный доломит

Fig. 2. Lower Permian ooid dolomite

Табл. 1. Химические и изотопные данные образцов

Table 1. Chemical and isotopic data of samples

Номер образца Sample No.	Минеральный состав Mineral composition	CaO (%)	MgO (%)	MnO (%)	CO ₂ (%)	P ₂ O ₅ (%)	Н. о.	Fe ₂ O ₃	FeO	$\delta^{13}\text{C}$ (‰, PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰, SMOW)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰, PDB)
УН-1	Доломит / Dolomite	30.24	21.77	0.020	46.32	0.011	0.19	0.052	0.029	6.4 6.2	28.1 26.7	-2.7 -4.0
УН-2	Доломит / Dolomite	29.91	21.52	0.033	46.04	0.012	0.28	0.080	0.043	6.4 6.0	27.6 27.7	-3.2 -3.1
УН-4	Доломит, кальцит Dolomite, calcite	30.02	20.96	0.029	45.63	0.030	0.56	0.066	0.057	5.4 6.0	27.0 27.1	-3.8 -3.7
УН-7	Доломит, кальцит Dolomite, calcite	30.13	21.29	0.021	45.89	0.025	0.42	0.052	0.029	6.5 6.3	26.0 26.1	-4.7 -4.6
УН-8	Доломит, кальцит Dolomite, calcite	30.55	21.12	0.019	45.76	0.013	0.20	0.046	0.014	6.2	26.2	-4.5
УН-8a	Доломит, кальцит кварц Dolomite, calcite, quartz	29.57	21.84	0.020	46.29	0.023	0.14	0.042	0.029	6.2	26.7	-4.0
УНМ-1	Доломит / Dolomite	30.00	21.26	0.041	46.57	0.019	0.14	0.040	0.014	5.7	25.1	-5.6
УНМ-2	Доломит, кальцит, кварц Dolomite, calcite, quartz	29.79	21.51	0.039	46.20	0.014	0.50	0.036	0.014	5.3	24.7	-6.0

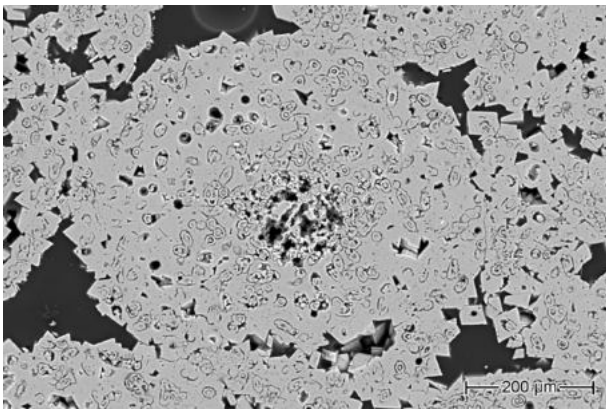


Рис. 3. Срез доломитового ооида
Fig. 3. A section of the dolomite ooid

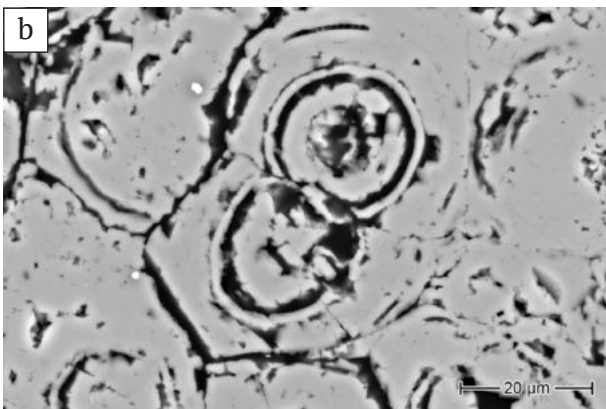
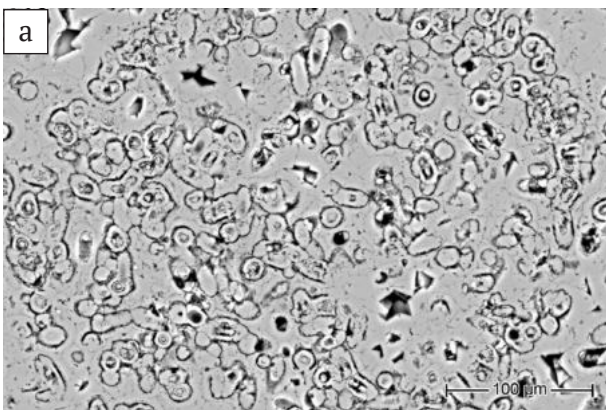


Рис. 4. Литифицированные остатки микрофитофоссилий (a), детализация (b)

Fig. 4. Lithified residues of microphytofossils (a), details (b)

нистого карбонатов, образующих концентрические слои (рис. 3).

В образцах встречаются литифицированные остатки микрофитофоссилий (микрофитоолитов). Ооиды включают скопления псевдоморфоз разного типа водорослеподобных образований (рис. 4, a, b). Видны мелкие округлые, иногда овальные фитофоссилии с тонкой оболочкой. Они встречаются и на поверхности, и внутри ооидов. Диаметр их варьирует от 10 до 30 мкм. При их доломитизации иногда сохраняются детали строения, проявляются реликты внутренней структуры.

Кроме микрофитоолитов были обнаружены остатки других организмов, в которых наблюдается замещение арагонита/кальцита. При достаточно продол-

жительном взаимодействии с поровыми водными растворами кальцит/арагонит окаменелостей превращался в стабильную модификацию — доломит. При этом происходила перекристаллизация, затухающая первичную структуру окаменелостей и приводящая к образованию мозаичных агрегатов. Фоссилии неопределимы. Присутствует хорошо упорядоченный неравномерно-зернистый доломит. Микроскопические исследования выявили различные типы доломита. Он встречается как в виде микрокристаллического замещающего карбоната, так и в виде цемента. Наблюдаются разные карбонатные частицы, от мелко- до крупнозернистых. Микрокристаллический доломит представлен микрозернистыми агрегатами, сложенными ксеноморфными, не всегда плотно прилегающими друг к другу кристаллами размером менее 2 мкм (рис. 5). Осаждение доломитов из поровых растворов в пустотах (цементация) приводило к формированию относительно крупных ксеноморфных зерен (рис. 6). В некоторых агрегатах остаются поры. Известно, что доломиты обычно имеют более высокую пористость по сравнению с известняками. Иногда наблюдаются пустотелые отпечатки окаменелостей, возникшие в результате растворения органического вещества. Доломит, заполняющий пустоты и поры, образовывал характерные кристаллические формы. Здесь он встречается в виде ан-

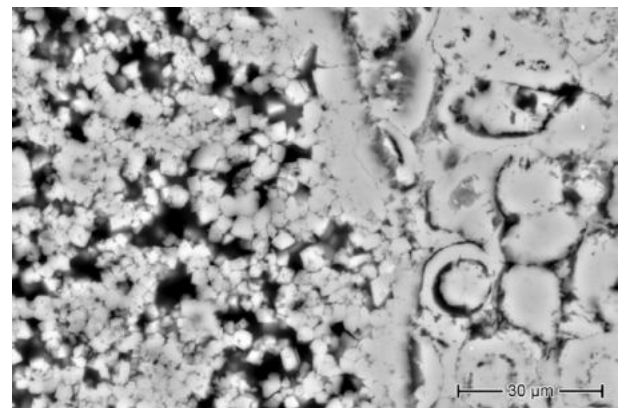


Рис. 5. Микрозернистые агрегаты доломита, замещающего фоссилии (на рисунке слева)

Fig. 5. Micrograin aggregates of dolomite replacing fossils (in the picture on the left)

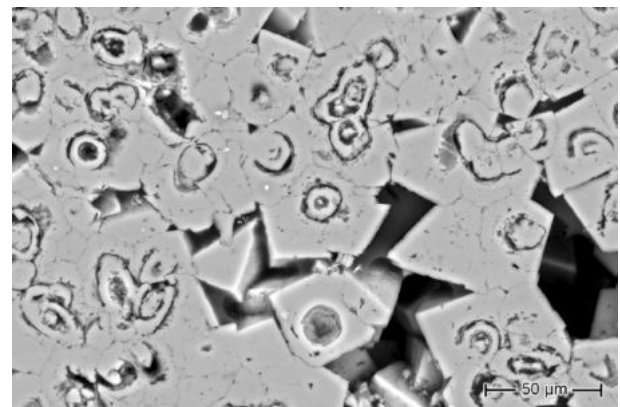


Рис. 6. Крупные ксеноморфные зерна доломита, сформированные при цементации

Fig. 6. Large xenomorphic dolomite grains formed during deposition cementation

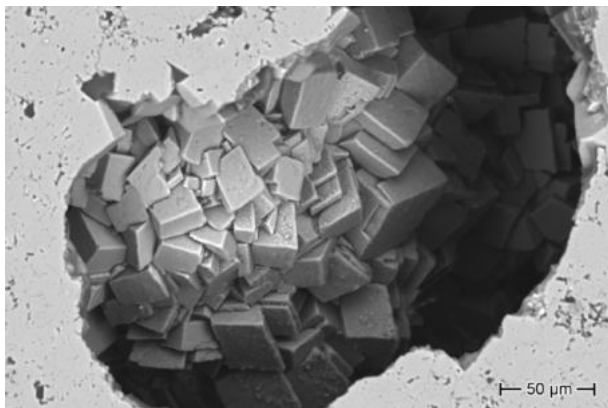


Рис. 7. Ромбоэдрические кристаллы доломита в порах
Fig. 7. Rhombohedral dolomite crystals in pores

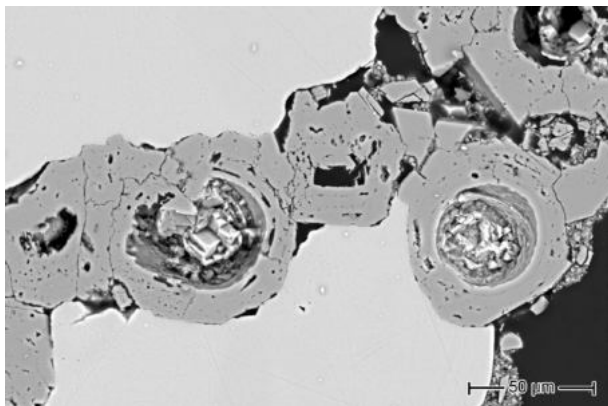
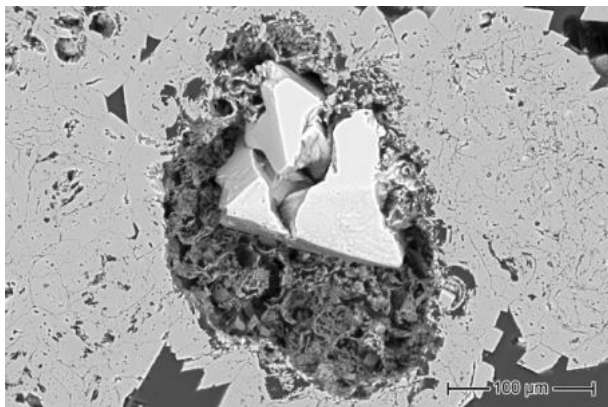
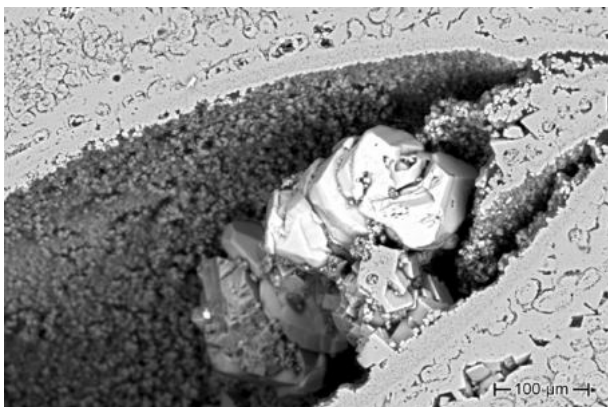


Рис. 8. Новообразованный кальцит (белое), заполняющий пустотное пространство
Fig. 8. Newly formed calcite (white) filling the void space

гедральных или ромбоэдрических кристаллов, размер которых варьирует от 5 мкм до 50 мкм (рис. 7).

Доломит не всегда был самым поздним аутигенным карбонатным минералом. Крупные пустоты в породах, пространства между зернами, полости в раковинах и скелетных остатках, а также трещины и полости растворения, обычно возникающие после литификации осадка, иногда заполнялись в несколько этапов, в результате поздней минерализации залечивались кальцитовыми агрегатами (рис. 8, а–с).

Замещение кальцита доломитом настолько очевидно для большинства исследователей, что упускается из виду процесс образования кальцита вслед за доломитом. Признаки процесса выделения позднего кальцита не всегда однозначны. Чтобы определить последовательность, нужно уделить внимание тонким деталям структуры кальцита. Наблюдаются заливообразные формы новообразованного кальцита, образующиеся за счет привноса вещества (рис. 8, с). Кальцитизация в катагенезе вела к заполнению пустотного пространства, изменяя свойства пород. Судя по структуре, агрегаты кальцита иногда подвергались растворению. По составу кальцитовая фаза неоднородна, в ней определяется зональность: содержание серы имеет тенденцию к увеличению к центру.

Часто на поверхности и внутри доломитовых ооидов наблюдаются углеродистые микрообразования в виде пленок и нитей, сохранившихся в различных формах (рис. 9, а, б). Мелкие углеродистые образования такого рода неразличимы в шлифах, но распознаются на сколах поверхностей в электронном микроскопе. Нити имеют однородное плотное внутреннее строение и различную конфигурацию. Для них характерно изгибание, ветвление (рис. 9, а). Толщина нитей достигает 20 мкм. Морфологически они вполне отвечают фоссилизированным остаткам цианобактерий (?) или нитчатым водорослям. На данном этапе мы рассматриваем их как цианобактерии, аналогичные описанным в работе (Ископаемые..., 2011), где они наблюдались с помощью SEM. Но это определение достаточно условное, требующее уточнения.

Кроме того, между слоями-концентрами обнаружены оболочки (рис. 9, б) органического материала (органические субстанции). Чаще всего это сложные образования неправильной формы, заполняющие полости. При большом увеличении в некоторых оболочках различаются отдельные шаровые структуры и цепочки мелких глобулярных тел (рис. 10). Отдельные пленки имеют вид морщинистых слоев или линз (рис. 11). По этим данным образования можно определить как реликты бактериальных пленок (внеклеточное полимерное вещество) (Кузнецов, Журавлева, 2022).

В доломитах присутствуют некарбонатные минералы (н. о. — 0.14–0.56 %). Наличие зерен кварца подтверждается рентгеноструктурным анализом. Среди примесей обычно встречаются глинистые минералы, полевые шпаты (альбит), мусковит, сфалерит, кристаллы NaCl. Наблюдаются шарообразные структуры небольшого размера, до 3 мкм, сложенные неидентифицированными алюмосиликатами.

Благодаря электронной микроскопии было установлено широкое развитие железо- и марганецсодержащей минерализации в карбонатной породе. Судя по микрондовым исследованиям, железо в породе

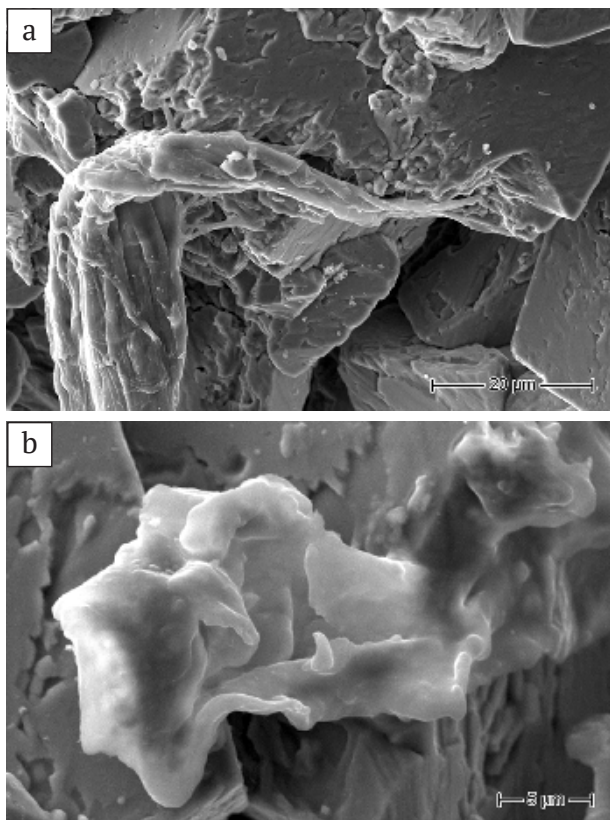


Рис. 9. Углеродные микрообразования в нижнепермских ооидах: а — нитевидные формы, похожие на цианобактерии; б — оболочки органического материала (органические субстанции, биопленки?)

Fig. 9. Carbon microformations in Lower Permianoids: a — shells of organic material (organic substances, biofilms?); b — filamentous forms similar to cyanobacteria

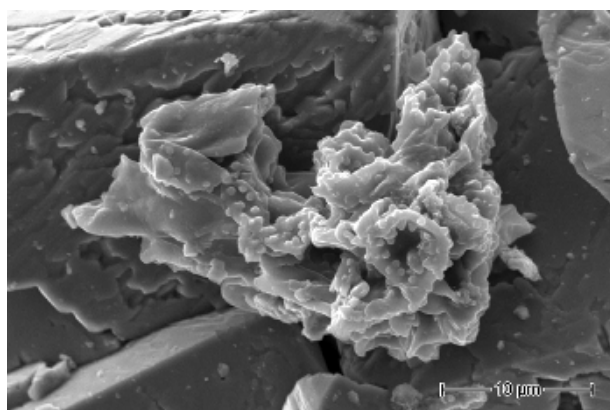


Рис. 10. Глобулярные тела в органических оболочках
Fig. 10. Globular bodies in organic shells

присутствует не в форме сульфидов. Эти образования содержат в основном Fe, Ca, Mn, Mg и Si. Анализ зерен показал следующий состав (%): Fe — от 45.1 до 56.7; Ca — от 4.9 до 9.0; Mn — от 2.6 до 4.1; Mg — от 2.0 до 4.5 и Si — от 1.8 до 3.4. Микроструктура железосодержащего материала представлена разными типами. Наблюдаются полые округлые и овальные образования диаметром 3—10 мкм (рис. 12). Они располагаются непосредственно на стенках разнообразных полостей. Их наружная поверхность имеет ажурное строение. По-видимому, полости были образованы в процессе

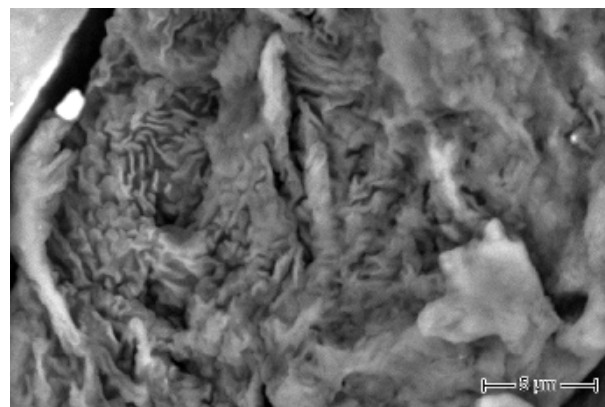


Рис. 11. Морщинистые органогенные образования
Fig. 11. Wrinkled organogenic formations

дегазации: в результате выделения метаболических газов возникали вздутия. Наряду с этими формами были обнаружены другие проявления железообогатенных фаз. Иногда видна структура, напоминающая губку (рис. 13). Другой тип минерализации связан с индивидуальными, содержащими Mn (оксигидраты Mn?). При больших увеличениях можно наблюдать, что эти образования встречаются в виде волокнистых выделений размером до 60 мкм (рис. 14).

При изучении особенностей строения образцов методом электронной микроскопии и микрозондового анализа было установлено широкое развитие

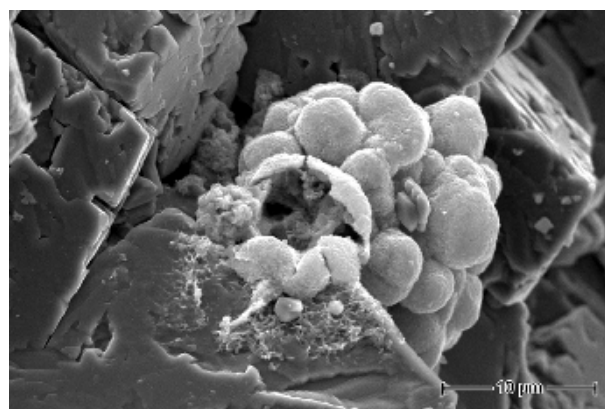


Рис. 12. Полые округлые оксигидраты железа
Fig. 12. Hollow rounded growths of ferrum oxyhydrates

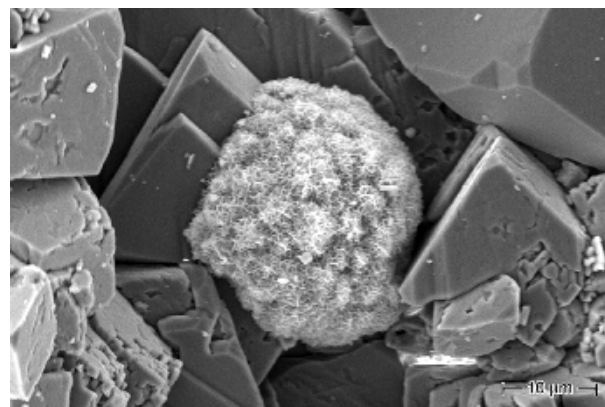


Рис. 13. Оксигидраты железа, напоминающие губку
Fig. 13. Ferrum oxyhydrates resembling a sponge

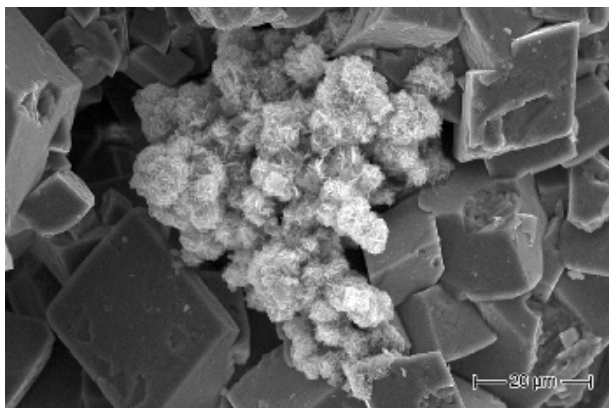


Рис. 14. Волокнистые оксигидраты марганца

Fig. 14. Fibrous Mn oxyhydrates

фосфатной минерализации. Характерным компонентом состава образцов является апатит, кристаллы которого обычно приурочены к порам, пустотам и полостям, оставшимся после растворения фоссилий (рис. 15). Иногда фосфаты заполняют промежутки в глинах, где происходило накопление и сохранность отмершего органического материала. По морфологии выделения фосфаты кальция не очень разнообразны. Апатит часто встречается в виде кристаллов, от призматических до игольчатых, размеры которых варьируют до 7 мкм в длину и до 2 мкм в ширину.

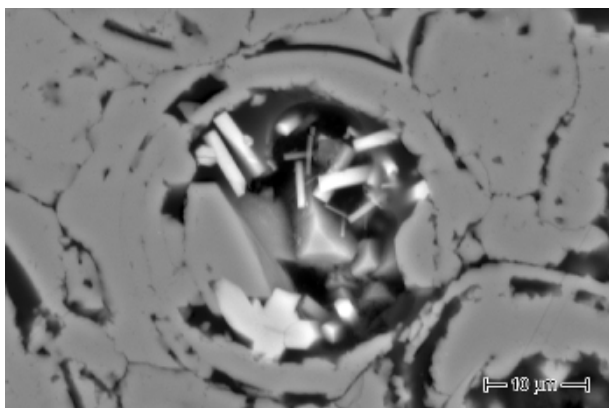


Рис. 15. Кристаллы фосфата кальция в порах

Fig. 15. Crystals of calcium phosphate in the pores

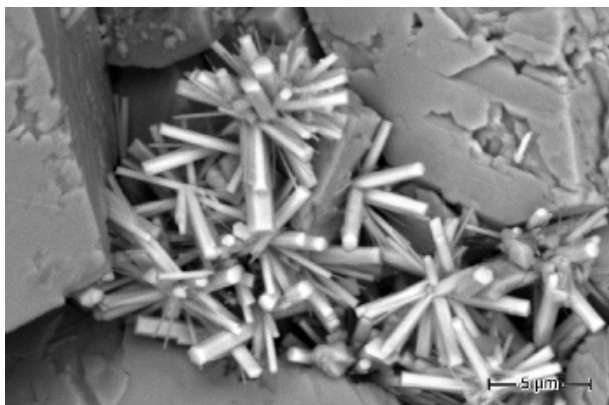


Рис. 16. Радиально-лучистые агрегаты фосфата кальция

Fig. 16. Radially radiant of calcium phosphate aggregates

Характерны радиально-лучистые (рис. 16) и шаровидные агрегаты. Кристаллы фосфата содержат в основном Ca, P, O и F. Содержание главных компонентов: Ca — от 28.3 до 42.5 %; P — от 6.0 до 14.9 %; фтора (F) — от 4.0 до 7.5 % (фторапатит).

Обсуждение результатов

По данным карбонатного анализа, изученные породы практически нацело сложены доломитовой фазой с небольшими следами содержания железа, марганца и фосфора. Судя по имеющимся данным, доломитизация в породах может быть обусловлена различными факторами на разных этапах формирования пород.

Так, например, данные анализа содержания изотопов углерода (до 6.5 ‰ PDB) и кислорода (до 2.7 ‰ PDB) показали, что формирование нижнепермских ооидных доломитов могло происходить в условиях соленых лагун (Кулешов, 2001). Отмечаются повышенные значения $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$ и пониженные величины $\delta^{18}\text{O}_{\text{карб}}$ по сравнению с морскими карбонатами. В то же время отклонения величин стабильных изотопов ($\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{13}\text{C}$) свидетельствуют и о влиянии диагенеза на изученные породы. В случае формирования в диагенезе доломита нередко имеется тенденция к утяжелению изотопного состава углерода [Фор, 1989].

В структуре ооидов (оолитов) из изученных пород были обнаружены следы бактериальных сообществ: реликты бактериальных пленок (гликокаликс?), минерализованные бактериоморфы, наличие которых может говорить о биохомогенной природе оолитов. При этом микробные пленки, представленные внеклеточным полимерным веществом, могли создать ту локальную биогеохимическую обстановку, которая способствовала выделению карбонатов (Кузнецов, Журавлева, 2022), в том числе и протодолмитов.

В строении изученных пород отдельных образцов была выявлена доломито-кальцитовая последовательность, согласно которой выпадение карбонатов из поровых растворов могло происходить в зоне смешения морских и метеорных вод, вероятно, из-за значительного падения уровня моря или существенной гумидизации климата. Эта последовательность могла возникнуть в результате воздействия поровых растворов, которые эволюционировали от состава со значительным компонентом морской воды к смешанному метеорно-морскому составу с последовательно уменьшающимся компонентом морской воды и, наконец, к метеорному составу. В то же время в других образцах в пустотах большого размера отмечается присутствие только доломита, что указывает на отсутствие значительных колебаний в соотношении морской и метеорной воды или на то, что компонент морской воды был достаточно высоким, чтобы сделать поровые воды постоянно перенасыщенными по отношению к доломиту. Это может быть связано с тем, что данные породы находились существенно ниже зеркала соприкосновения соленых и пресных вод.

Выявленные в поровом пространстве образования, содержащие железо и марганец, могут быть результатом жизнедеятельности микроорганизмов (Бактериальная..., 2002). Анализ электронно-микроскопических снимков особенностей морфологии этих



агрегатов показывает наличие в их строении скопленных хорошо выраженных микроглобул, которые могут свидетельствовать о колониальном образе жизни производивших их микроорганизмов (Лоуэнстам, 1984).

Обнаруженные в доломитах выделения фосфорита также могли быть инициированы деятельностью бактерий на стадии диагенеза, на что указывают особенности их строения и локализации. Формирование фосфата определялось, очевидно, повышенным содержанием в исходном осадке захороненного органического вещества. Французские исследователи Ж. Лук и Л. Прево выяснили условия, необходимые для синтеза фосфатных минералов в водной среде, и установили, что осаждение апатита и в морской, и в пресной воде происходит за счет органических фосфатсодержащих соединений в присутствии бактерий. Фосфатизация происходит там, где повышено содержание фосфора за счет разлагающейся органики и понижено содержание кислорода. Источником дополнительного фосфора в окружающей среде являются сами разлагающиеся организмы (Бактериальная..., 2002).

Заключение

Нижнепермские ооидные доломиты, выходы которых расположены в верхнем-среднем течении реки Вычегды (Южный Тиман), характеризуются сложным строением, обусловленным их гетерогенной природой. Исследования выявили морфологические признаки, показывающие различные механизмы их формирования. С одной стороны, в структуре ооидов (оолитов) из изученных пород были обнаружены следы бактериальных сообществ, минерализованные бактериоморфы, микрофитофоссилии (микрофитолиты), указывающие на их биохемогенную природу. На поверхности и внутри между концентрирами доломитовых ооидов наблюдаются оболочки органического материала (органические субстанции), которые можно определить как реликты бактериальных пленок (внеклеточное полимерное вещество). Микробиальные пленки могли создать ту локальную биогеохимическую обстановку, которая способствовала выделению карбонатов, в том числе и протодоломитов. С другой стороны, структура доломитов свидетельствует о многофазности образования пород.

В строении изученных пород отдельных образцов была выявлена доломито-кальцитовая последовательность. Выпадение позднего аутигенного кальцита из поровых растворов могло происходить в зоне смешения морских и метеорных вод, вероятно, из-за значительного падения уровня моря или существенной гумидизации климата.

Обнаруженные в доломитах выделения фосфата были инициированы деятельностью бактерий на стадии диагенеза, на что указывают особенности их строения и локализации в полостях, оставшихся после растворения фоссилий, где было повышено содержание фосфора за счет разлагающейся органики. Выявленные в поровом пространстве образования, содержащие железо и марганец, также могли быть результатом жизнедеятельности микроорганизмов. Анализ электронно-микроскопических снимков особенностей морфологии этих агрегатов показал наличие в их строении скопленных хорошо выраженных микроглобул, что сви-

детельствует о колониальном образе жизни производивших их микроорганизмов.

Автор выражает благодарность А. Н. Сандуле и С. А. Онищенко за ценные научные консультации и В. А. Радаеву за помощь в проведении электронно-микроскопических исследований и микрозондового анализа.

Работа выполнена в рамках темы НИР ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (ГР № 122040600013-9).

Литература / References

- Аэрофотогеологическая карта междуречья Вычегды и Камы масштаба 1: 200000. Серии Тиманская, Пермская. Листы Р-39-XXIV (Усть-Кулом), XXIX (Лопыдино), XXX (Верх. Лупья); Р-40-XX (Нижний Воч). Объяснительная записка. СПб.: Изд-во СПб. картфабрики ВСЕГЕИ, 2001. 130 с.*
- Aerial photogeological map of the Vychegda and Kama interfluvium at a scale of 1:200000. Timan, Perm series. Sheets R-39-XXIV (Ust-Kulom), XXIX (Lopydino), XXX (Upper Lup'ya); R-40-XX (Lower Voch). Explanatory note. St. Petersburg: Publishing house of VSEGEI map factory, 2001, 130 p. (in Russian)*
- Бактериальная палеонтология / С. С. Абызов и др.; под ред. А. Ю. Розанова. М.: ПИН РАН, 2002. 188 с.*
- Bacterial paleontology. S. S. Abyzov et al.; edited by A. Yu. Rozanov, Moscow: PIN RAS, 2002, 188 p. (in Russian)*
- Ветошкина О. С. Изотопы углерода и кислорода в нижнепермских карбонатах (бассейн р. Вычегды) / Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-Востока России: Материалы XVII Геологического съезда Республики Коми. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2019. Т. II. С. 198–199.*
- Vetoshkina O. S. Carbon and oxygen isotopes in Lower Permian carbonates (Vychegda River basin). Geology and mineral resources of the European North-East of Russia: Proceedings of the 17th Geological Congress of the Komi Republic. V. II, Syktvykar: IG Komi SC UB RAS, 2019, pp. 198–199. (in Russian)*
- Ископаемые бактерии и другие микроорганизмы в земных породах и астроматериалах / М. М. Астафьева и др.; под ред. А. Ю. Розанова, Г. Т. Ушатинской. М.: ПИН РАН, 2011. 172 с.*
- Fossil bacteria and other microorganisms in terrestrial rocks and astromaterials. M. M. Astafieva et al.; edited by A. Yu. Rozanov, G. T. Ushatinskaya. Moscow: PIN RAS, 2011, 172 p. (in Russian)*
- Кузнецов В. Г., Журавлева Л. М. Микробиальные карбонатные породы: состав, структуры, текстуры, механизмы и обстановки образования. Процессы и обстановки образования микробиолитов. Статья 2 // Изв. вузов. Геология и разведка. 2022. № 64 (4). С. 10–21.*
- Kuznetsov V. G., Zhuravleva L. M. Microbial carbonate rocks: composition, structures, textures, mechanisms and environments of formation. Processes and environments of microbiolite formation. Article 2. V. G. Kuznetsov, L. M. Zhuravleva. News of Universities. Geology and Exploration, 2022, No. 64 (4), pp. 10–21. (in Russian)*
- Кулешиов В. Н. Эволюция изотопных углекисло-водных систем в литогенезе. Сообщение 1. Седиментогенез и диагенез // Литология и полезн. ископ. 2001. № 5. С. 491–508.*



- Kuleshov V. N. Evolution of isotopic carbon dioxide-water systems in lithogenesis. Message 1. Sedimentogenesis and diagenesis. Lithology and useful fossils, 2001, No. 5, pp. 491–508. (in Russian)
- Лоуэнстам К. Процессы и продукты биоминерализации // Палеонтология: Труды 27-го Международного геологического конгресса. М.: Наука, 1984. Т. 2. Секция 2. С. 51–56.
- Lowenstam K. Processes and products of biomineralization. Paleontology: Proceedings of the 27th International Geological Congress. Section 2, Moscow: Nauka, 1984, V. 2, pp. 51–56. (in Russian)
- Орлеанский В. К., Герасименко Л. М., Пауль Р. К., Жегалло Е. А. Осцилляториевые цианобактерии — продуценты онколитов группы Osagia // Бактериальная палеонтология: Тез. докл. междунар. конф., 21–23 мая 2002 г. / ПИН РАН. М., 2002. С. 58.
- Orleanskiy V. K., Gerasimenko L. M., Paul R. K., Zhegallo E. A. Oscillatoriaceae Cyanobacteria-Producers of Osagia Group Oncolites. Bacterial Paleontology: Abstract of Reports of the Int. Conf., May 21–23, 2002, PIN RAS, Moscow, 2002, p. 58. (in Russian)
- Фор Г. Основы изотопной геологии. М.: Мир, 1989. 590 с.
- Fohr G. Fundamentals of Isotope Geology. Moscow: Mir, 1989, 590 p. (in Russian)
- Юдович Я. Э., Кетрис М. П. Основы литохимии. СПб.: Наука, 2000. 479 с.
- Yudovich Ya. E., Ketris M. P. Fundamentals of Lithochemistry. St. Petersburg: Nauka, 2000, 479 p. (in Russian)
- Antoshkina A. I. Microbially mediated organomineralization in Paleozoic carbonate ooids // A. I. Antoshkina, E. A. Zhegallo, S. I. Isaenko / Paleontological Journal. 2020, vol. 54, no. 8. pp. 17–26.
- Land L. S. The isotopic and trace element geochemistry of dolomite // Concepts and Models of Dolomitization. Ed. Zenger D. H., Dunham J. B., Ethington R. L. // Soc. Econ. Paleont. Mineral. Spec. Publs. 28. 1980. p. 87–110.
- Nader F. H., Swennen R., Ellam R. Field geometry, petrography and geochemistry of a dolomitisation front (Late Jurassic, central Lebanon). Sedimentology. 2007. 54. P. 1093–1119.
- Sumner D. Y. Numerical modeling of ooid size and the problem of Neoproterozoic giant ooids / D. Y. Sumner and, J. P. Grotzinger // J. Sediment. Petrol. 1993. vol. 63, no. 5. pp. 974–982.
- Warren J. K. Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations, Earth-Sci. Rev. 2000. 52. P. 1–81.

Поступила в редакцию / Received 22.07.2024



Арктический вектор геологических исследований Arctic vector of geological research

УДК 563.713:551.734 (234.851)

DOI: 10.19110/geov.2024.9.3

Новые данные о строматопороидеях эмсского возраста на Полярном Урале (р. Большая Уса)

Е. В. АнтроповаИнститут геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар
antropova@geo.komisc.ru

Приводятся результаты изучения строматопороидей нижнего девона Полярного Урала. Дополнены сведения по таксономическому составу эмсских строматопороидей этого района. Виды *Stellopora analoga* Bogoyavl., *S. similis* Bogoyavl. установлены здесь впервые. Комплекс строматопороидей в сочетании с данными по кораллам и конодонтам позволяет датировать изученный интервал разреза поздним эмсом. По литологическому составу и возрасту изученный разрез может быть сопоставлен с шервожской свитой нижнего девона.

Ключевые слова: строматопороидеи, Полярный Урал, нижний девон, эмсский ярус, амфиפורиды

New data on stromatoporoidea of the Emsian age in the Polar Urals (Bolshaya Usa River)

E. V. Antropova

Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar

The results of the study of stromatoporoidea of the Lower Devonian of the Polar Urals (Bolshaya Usa River) are presented. The data on the taxonomic composition of the Emsian stromatoporoidea of this area are supplemented. Species of *Stellopora analoga* Bogoyavl. and *S. similis* Bogoyavl. have been established here for the first time. The complex of stromatoporoidea in combination with data on other fossil remains allows dating the studied interval of the section as the Late Emsian. The lithological composition and age of the studied section can be compared with the Early Devonian Shervozhskaya Formation.

Keywords: stromatoporoidea, Polar Urals, Lower Devonian, Emsian, Amphiporida

Введение

Строматопороидеи — морские ископаемые организмы, являющиеся важной составляющей биоты севера Урала в девоне. Встречаются в карбонатных и терригенных породах единично или образуя скопления. Также они часто участвуют в образовании органогенных построек различного ранга (Антропова, 2007).

Стратиграфическое значение строматопороидей может восприниматься двояко: среди них нет очевидных видов-маркеров, однако таксономический состав строматопороидей с учетом их фациальной приуроченности дает корреляционные возможности на уровне свит и может служить дополнительным инструментом для стратиграфических построений.

Несмотря на повсеместное распространение строматопороидей на Полярном Урале, при изучении их редко выдерживалась непрерывная последовательность отбора образцов, вследствие чего картина развития строматопороидей в девоне на Полярном Урале выглядит фрагментарно. В этом случае каждая новая

находка строматопороидей имеет большое значение, поскольку дополняет картину общего распространения этой группы организмов.

О строматопороидеях эмсского возраста Севера Урала известно по сборам В. С. Цыганко с определениями О. В. Богоявленской. Из разреза на р. Лек-Елец (вучвожская свита) определены виды *Amphipora* aff. *intexa* Yavor., *Atelodictyon uralicum* Bogoyavl., *Columnoporella majesta* Bogoyavl.; из разреза р. Печоры (койвенская свита) — *Atelodictyon vogulicum* Bogoyavl.; р. Щугор (бийская свита) — *Stromatopora elegans* Riab.; р. М. Паток (койвенская свита) — *Clathrocoilona abeona* Yavor., *Parallelopora similana* Bogoyavl. (Першина и др., 1971; Богоявленская, 1998; Цыганко, 2011).

Цель работы — изучение таксономического состава и распространения строматопороидей в разрезе р. Большая Уса (Полярный Урал), анализ стратиграфической приуроченности и дополнение фаунистической характеристики нижнедевонских образований Полярного Урала.

Для цитирования: Антропова Е. В. Новые данные о строматопороидеях эмсского возраста на Полярном Урале (р. Большая Уса) // Вестник геонаук. 2024. 9(357). С. 21–27. DOI: 10.19110/geov.2024.9.3

For citation: Antropova E. V. New data on stromatoporoidea of the Emsian age in the Polar Urals (Bolshaya Usa River). Vestnik of Geosciences, 2024, 9(357), pp. 21–27, doi: 10.19110/geov.2024.9.3

Объект и методы исследований

Объектом исследования послужили строматопороидеи из разреза р. Большая Уса (Полярный Урал) — сборы сотрудников ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН А. Н. Плотницына и А. В. Журавлева (2017 г.).

В основу работы положены новые материалы и опубликованные ранее данные. Анализ интервалов распространения таксонов строматопороидей проводится по результатам как опубликованных, так и фондовых работ по Елецкой СФЗ Полярного Урала (Першина и др. 1971; Производство..., 1987*; Богоявленская, 1998; Цыганко, 2011; Государственная..., 2004).

При микроскопическом изучении строматопороидей применялись ориентированные шлифы тангенциального и радиального направлений. Серия шлифов необходима для точного определения основных элементов строения, пространственного взаимоотношения астрориз, горизонтальных и вертикальных элементов, их взаимодействия с вмещающими породами. Всего для уточнения литологического состава и микроскопического изучения органических остатков изготовлено 29 шлифов.

С целью получения микропалеонтологических препаратов карбонатные разности пород обработаны в 7–10 % растворе уксусной кислоты по стандартной методике. Химической дезинтеграции подвергнуто четыре пробы, определяемые конодонтовые элементы оказались в одной. Пробоподготовка на конодонты осуществлялась А. Н. Плотницыным, определение — А. В. Журавлевым.

Микроскопическое изучение и фотографирование шлифов производилось с помощью микроскопов Olympus-SZ61 с системой визуализации (цифровая окулярная USB-камера «Альтама-УНССД 5.0 Мпикс», программа для управления камерами и анализа изображений Altami Studio-2015), «Полам-215» с системой фото- и видеофиксации LOMO-Microsystems MCview (MC-20).

Коллекция строматопороидей хранится в Геологическом музее им. А. А. Чернова Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (№ 742), г. Сыктывкар.

Рис. 1. Схемы расположения района исследования (а) и обнажения на р. Большая Уса (Полярный Урал) (б) (по: Журавлев, Плотницын и др., 2018). Условные обозначения: 1 — разрывные нарушения; 2 — геологические границы и индексы местных стратонив; 3 — обнажение Bu1

Fig. 1. The location of the study area (a) and the outcrop on the Bolshaya Usa River, Polar Urals (b) (from: Zhuravlev, Plotitsyn et al., 2018). Legend: 1 — faults; 2 — geological boundaries and indices of formations; 3 — Bu1 outcrop

* Производство геологического доизучения и групповой геологической съёмки масштаба 1 : 50000 Каро-Елецкой площади. Т. I–V: Отчет по объекту / Комигеолфонд, 1987. Отв. исполн. Б. Я. Дембовский, В. А. Бабушкин, Н. Н. Герасимов и др.

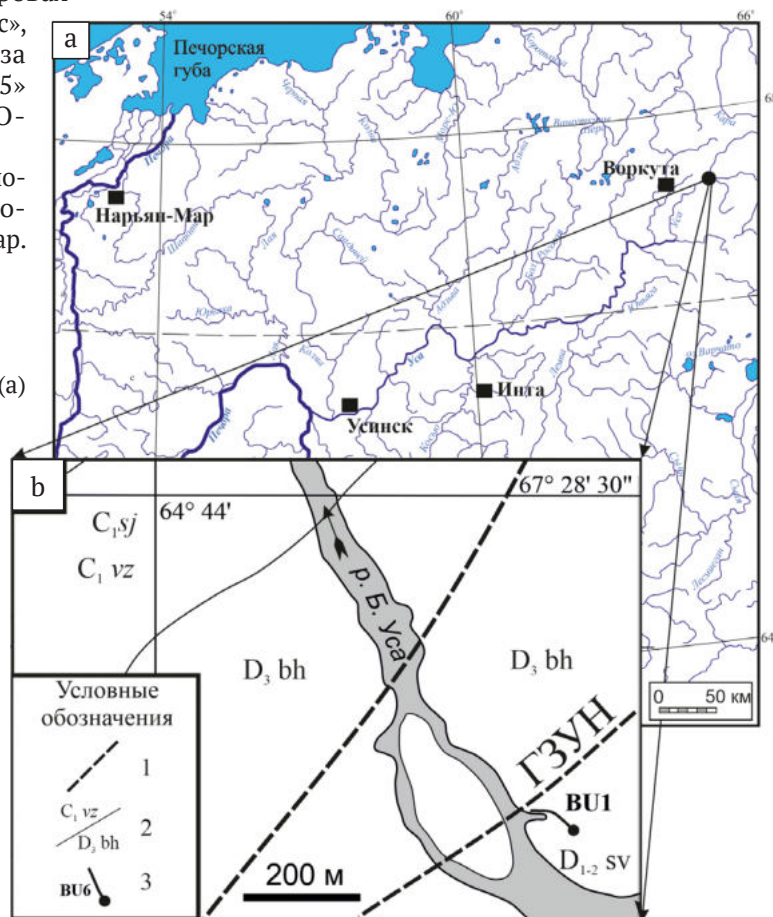
Характеристика обнажения

Обнажение находится в правом борту долины р. Большая Уса, на 1480 м выше слияния рек Малая Уса и Большая Уса, координаты: N 67°28'11.8", E 64°45'02.1" (рис. 1). Породы сильно затронуты тектоническими нарушениями, представлены светло-серыми, серыми, темно-серыми известняками, доломитизированными известняками, доломитами пелитоморфными, биотурбированными, органогенно-обломочными (рис. 2). Отмечаются уровни с черными аргиллитами и кремниевыми стяжениями. Мощность отложений, вскрывающихся в обнажении, составляет 65.5 м.

Породы содержат неравномерно распространенную по разрезу фауну строматопороидей, табулятоморфных кораллов (рис. 3, 2–4), ругоз (рис. 3, 4), остракод (рис. 3, 1), раковинный детрит и остатки цианобактерий (рис. 3, 5).

Пачка I. Известняки доломитизированные, темно-серые, неравномерно-кристаллические, с гнездами кальцита, местами пелитоморфные, узорчатые. Встречаются скопления строматопороидей диаметром 1–3.5 мм («амфипоровые луга»). Определены строматопороидеи: *Stellopora analoga* Vogoayvl., *S. similis* Vogoayvl. Мощность 2.65 м.

Пачка II. Известняковые градационные циклиты от известняков темно-серых детритовых до известняков серых, разнозернистых, пелитоморфных, волнисто-слоистых, с включениями глинистого известняка. Встречаются прослойки и скопления многочисленных раковин остракод, раковинный детрит. Определен



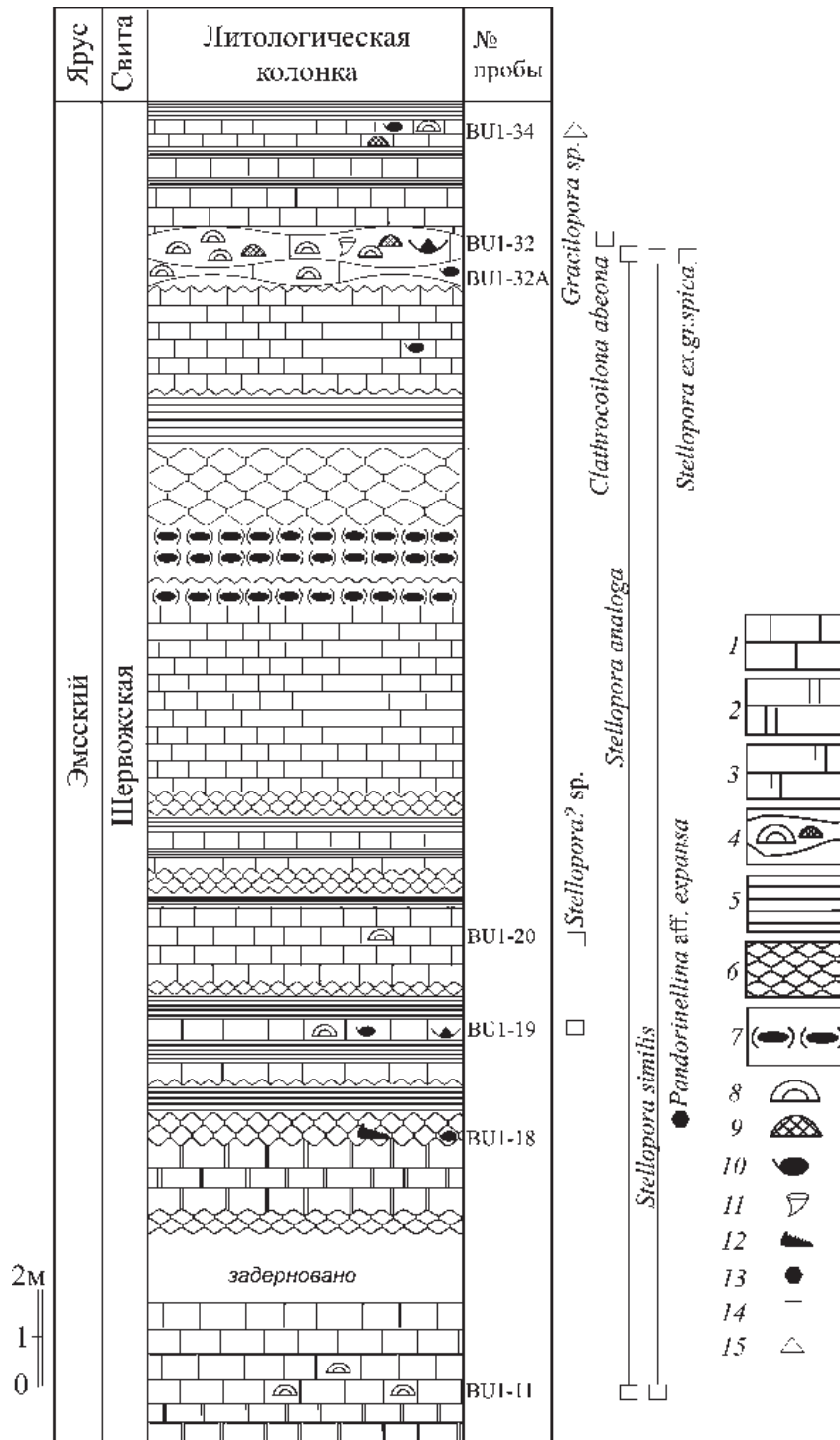


Рис. 2. Схематический разрез на р. Большая Уса (Полярный Урал) и распространение в нем определенной фауны. Литологическая колонка построена по полевым дневникам А. Н. Плотицына, А. В. Журавлева. Условные обозначения: 1 – известняк; 2 – доломит; 3 – доломитизированный известняк; 4 – биогенные кораллово-строматопоратые известняки; 5 – аргиллиты; 6 – биоморфные известняки и доломиты; 7 – кремниевые стяжения; 8 – строматопороидеи; 9 – табуляты; 10 – остракоды; 11 – ругозы; 12 – конодонты; 13 – конодонты; 14 – строматопороидеи; 15 – кораллы

Fig. 2. Section on the Bolshaya Usa River (Polar Urals) and the distribution of certain fauna in it. The lithological log is based on the field diaries of A. N. Plotitsyn and A. V. Zhuravlev. Legend:

1 – limestone; 2 – dolomite; 3 – dolomitized limestone; 4 – biogenic coral-stromatoporate limestone; 5 – mudstone; 6 – biomorphic limestone and dolomite; 7 – siliciclastics; 8 – stromatoporoidea; 9 – tabulates; 10 – ostracods; 11 – rugose; 12 – conodonts; Distribution of taxa: 13 – conodonts; 14 – stromatoporoidea; 15 – corals

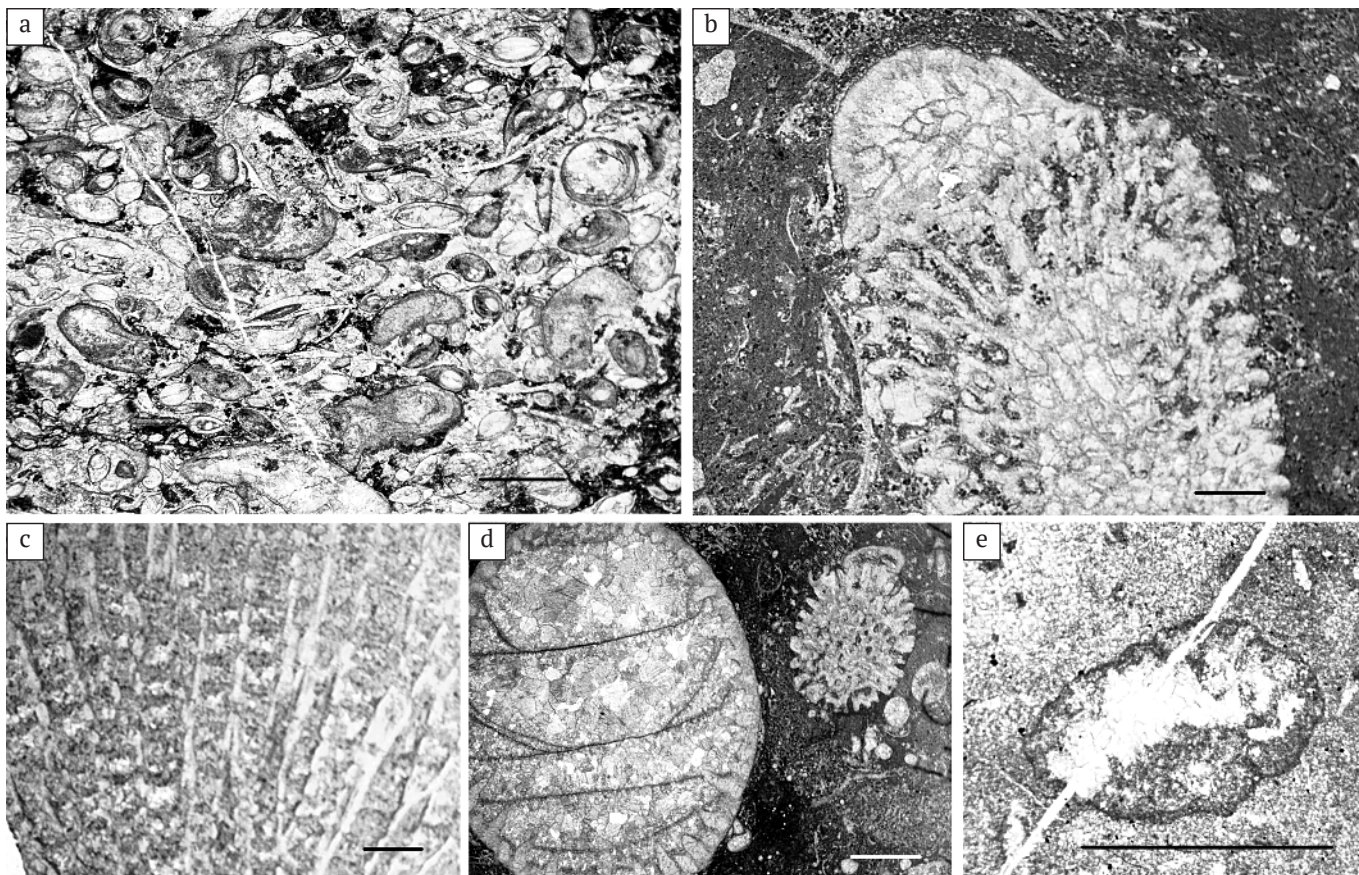


Рис. 3. Фауна: а — остракодовый известняк, обр. BU1-37; б — табулятоморфный коралл *Gracilopora* sp., обр. BU1-34; в — табулятоморфный коралл, обр. BU1-32-2; д — ругоза и табулятоморфный коралл *Gracilopora* sp., обр. BU1-34; е — цианобактерия, обр. BU1-7. Шкала 2 мм

Fig. 3. Fauna: а — ostracod limestone, sp. BU1-37; б — tabulate coral *Gracilopora* sp., sp. BU1-34; в — tabulate coral, sp. BU1-32-2; д — rugose and tabulate coral *Gracilopora* sp., sp. BU1-34; е — cyanobacterium, obs. BU1-7. Scale 2 mm

конодонтовый элемент *Pandorinellina* aff. *expansa* Uyeno et Mason. Мощность 3.05 м.

Пачка III. Чередование аргиллитов глинистых, известковистых, местами ожелезненных и известняков светло-серых, серых, местами до темно-серых, микрокристаллических, с тонким органическим детритом. В шлифах встречаются скопления раковин остракод, детрита. Фрагменты цилиндрических строматопороидей сильно дислоцированы, плохой сохранности, определены как *Stellopora?* sp. Мощность 5.25 м.

Пачка VI. Известняки серые, темно-серые, черные, микрокристаллические, волнисто-слоистые, массивные, мелко-, среднетритовые. Мощность 3.1 м.

Пачка V. Известняки кремнистые, волнистые, мелкозернистые, массивные, со стяжениями кремней и следами ожелезнения, с пятнистым распределением органического детрита. Мощность 1.25 м.

Пачка VI. Известняки доломитизированные, серые, микрокристаллические, микритовые, тонкодетритовые. Мощность 1.20 м.

Пачка VII. Переслаивание известняков темно-серых, микрокристаллических, тонкодетритовых, узорчатых, пелитоморфных, глинистых и известковистых аргиллитов. Распределение детрита неравномерное, пятнистое, встречаются прослои и скопления раковин остракод. Мощность 3.3 м.

Пачка VIII. Известняки доломитизированные, темно-серые, микрозернистые, биотурбированные, с многочисленными строматопроидеями, единичными табулятоморфными кораллами, ругозами, органическим детритом. Строматопороидеи *Clathrocoilona abeona* Yavor. шаровидного вида и цилиндрические амфипориды *Stellopora analoga* Vogoyavl., *S. similis* Bogoyavl., *S. ex. gr. spica* Vogoyavl. Мощность 0.8 м.

Пачка IX. Неравномерное чередование известняков темно-серых, микрокристаллических, волнисто-слоистых, кремнистых, остракодовых, с неравномерным содержанием органического детрита, с известковистыми аргиллитами или глинистой составляющей. Одиночные кораллы *Gracilopora* sp. до 1 см в диаметре. Мощность 1.95 м.

Комплекс строматопороидей

По внешнему строению встречены две разновидности строматопороидей — цилиндрические (обломки до 0.5 см в диаметре) и шаровидные ценостеумы (до 7 см в поперечнике). Всего определено пять видов строматопороидей, относящихся к двум родам — *Clathrocoilona* и *Stellopora* (рис. 4).

Шаровидные ценостеумы принадлежат виду *Clathrocoilona abeona* Yavor., который широко известен из эмских отложений Уральского палеобассейна (ко-

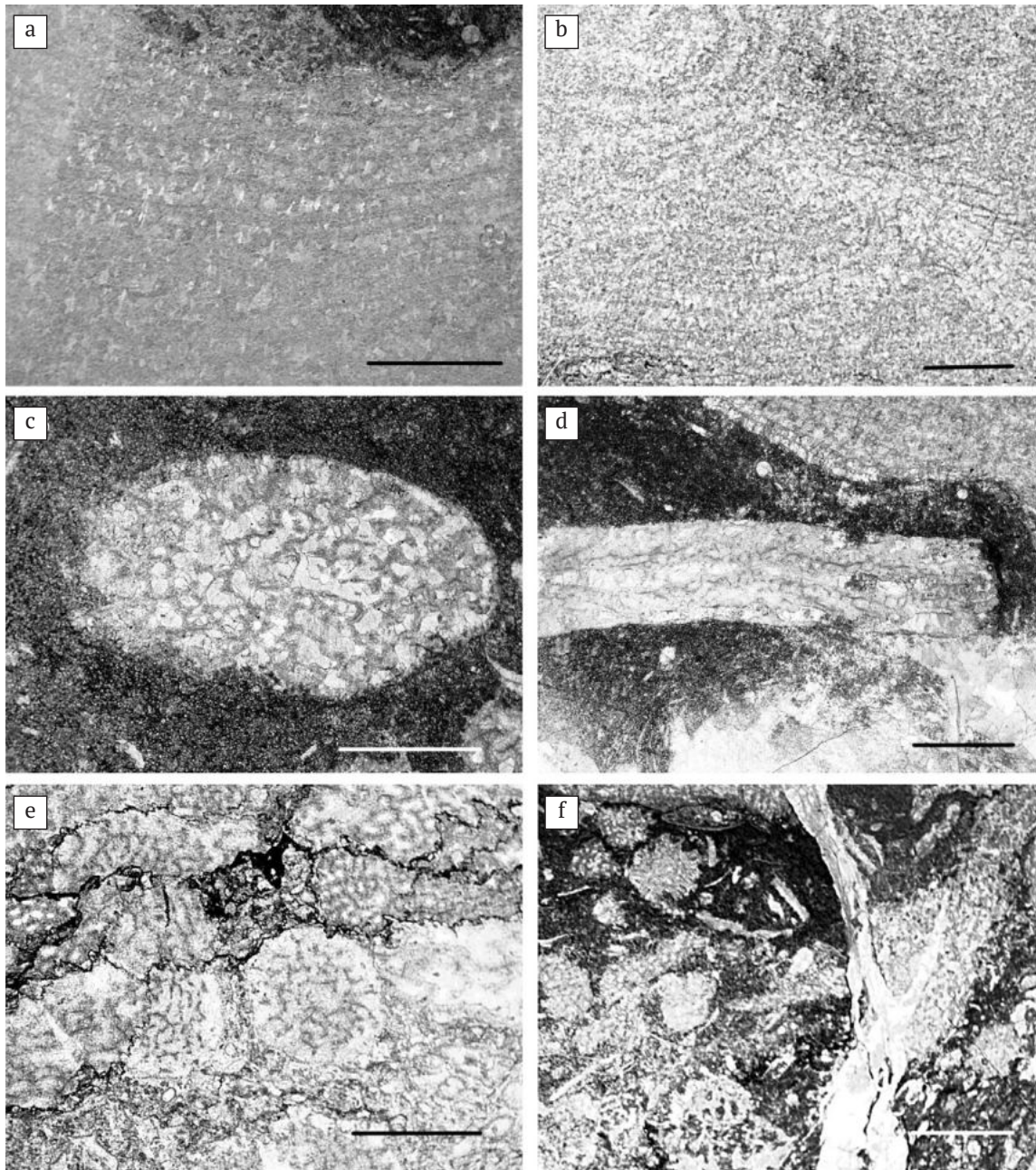


Рис. 4. Строматопороидеи из обнажения по р. Большая Уса: а, б — *Clathrocoilona abeona* Yavor., обр. BU1-32а; с — *Stellopora* ex gr. *spica* Bogoyavl. обр. BU1-32а; д — *Stellopora analoga* Bogoyavl. обр. BU1-32а; е — *Stellopora similis* Bogoyavl., обр. BU1-11; ф — сообщество «амфиорового луга», обр. BU1-32а. Шкала 2 мм

Fig. 4. Stromatoporoidea from an outcrop along the Bolshaya Usa River: а–б — *Stellopora abeona* Yavor., sp. BU1-32а; с — *Stellopora* ex gr. *spica* Bogoyavl. sp. BU1-32а; д — *Stellopora analoga* Bogoyavl. sp. BU1-32а; е — *Stellopora similis* Bogoyavl., sp. BU1-11; ф — Amphipora's community, sp. BU1-32а. The scale 2 mm

нодонтовые зоны *gronbergi*, *inversus*, *serotinus*) (Богоявленская, Лобанов 1993; Богоявленская, 2005). Учитывая распространенность вида по всему Уральскому палеобассейну, включая Северный и Полярный Урал, достаточно четкую стратиграфическую приуроченность, О. В. Богоявленская предложила выделить лону *Clathrocoilona abeona* в объеме койвенского и бийского горизонтов (Богоявленская, 1998, 2007).

Также в изученном обнажении на данном этапе исследования выявлено два уровня амфиоровых лугов (пробы 11, 32А) (рис. 3, 5, 6). В ископаемом состоянии амфиоровому лугу соответствуют темно-серые, часто битуминозные биоморфные каркасные известняки

с большим количеством субцилиндрических, от 0.5 до 6.5 мм в диаметре, обломков ценостеумов строматопороидей в иловом матрице. Сообщество амфиорового луга представлено видами строматопороидей *Stellopora analoga* Bogoyavl., *S. similis* Bogoyavl., *S. ex gr. spica* Bogoyavl.

Распространение *S. analoga* Bogoyavl. охватывает конодонтовые зоны *gronbergi*, *inversus*, *serotinus*. Появление *S. similis* Bogoyavl. фиксируется по данным исследователей не особенно четко и установлено условно в верхней части конодонтовой зоны *serotinus* (Богоявленская, 2007).

Кроме того, в средней части обнажения в сильно-дислоцированных толщах чередующихся прослоек

известняков и аргиллитов обнаружены обрывки плохой сохранности недиагностируемых субцилиндрических ценостеумов *Stellopora?* sp.

Обсуждение результатов

Стратиграфический анализ органических остатков указывает на раннедевонский возраст отложений. Строматопороидеи *Stellopora analoga* Bogoyavl., *S. similis* Bogoyavl., *Clathrocoilona abeona* (Yavor.) известны из койвенского горизонта (конодонтовая зона serotinus) Среднего Урала (Богоявленская, 1993, 1998, 2005). Представители рода табулятоморфных кораллов рода *Gracilopora*, обнаруженные в верхах разреза, были описаны из эмского яруса нижнего девона восточного склона Среднего и Северного Урала (Янет, 1972). Конодонтовые элементы получены с четырех уровней и имеют плохую сохранность. Определен единственный экземпляр *Pandorinellina* aff. *expansa* Uyeno et Mason, характерный для эмского яруса.

В указанном районе исследований эмскому ярусу соответствует вучвожская, шервожская и частично бийская свиты. По литологическому анализу пород уровни доломитизированных известняков с широким распространением амфиפורовых лугов могут относиться к верхам вучвожской свиты или к шервожской свите.

В известняках верхней части вучвожской свиты появляются прослой серого доломитизированного известняка, более чем наполовину сложенного ценостеумами строматопороидей и колониями табулят (Производство..., 1987*). Венчают разрез вучвожской свиты темно-серые доломитовые известняки с прослоями амфиפורид *Amphipora* aff. *intexa* (Цыганко, 2011). Распространение *Amphipora intexa* Yavor. соответствует раннеэмскому времени (Хромых, 2010). Отмечены также строматопороидеи *Atelodictyon uralicum* Bogoyavl. (Цыганко, 2011), которые характерны для верхов нижнего эмса на Среднем Урале (Богоявленская, Лобанов, 1993). Мощность свиты 95 м.

Отложения шервожской свиты по литологическим особенностям делятся на две подсвиты. Нижняя подсвита карбонатная, для нее характерно чередование темно-серых биоморфных и биокластических известняков, переслаивающихся с углисто-глинистыми сланцами (Государственная..., 2004). Породы содержат многочисленные остатки строматопороидей *Stellopora spica* Bogoyavl. и следующих кораллов: *Favosites goldfussi* Orb., *F. bijensis* Sok., *Thamnopora aliena* Yan., *Pachyfavosites tumulosus* Yanet, *Crassialveolites crassiformis* Sok., *Stringophyllum* cf. *isactis* (Frech.), *Caliopora* cf. *battersbyi* Mil.-Edw. et Haim., *Dedrostella rhenana* (Frech.), *Neospongyphyllum longiseptatum* Bulv., брахиоподы *Zdimir pseudobaschkiricus* (Tschern.) брахиоподы *Zdimir pseudobaschkiricus* (Государственная..., 2004). Этот комплекс указывает на интервал койвенского и бийского горизонтов. Мощность нижнешервожской подсвиты составляет 140–150 м.

Стратиграфическое распространение единственного указанного здесь вида строматопороидей *Stellopora spica* Bogoyavl. сопоставляется с верхней частью конодонтовой зоны serotinus и зоны ratulus, что соответствует верхам эмса и пограничным отложениям эмса и эйфеля (Богоявленская, 1978; 2005).

Необходимо отметить, что в карбонатных толщах эмского яруса отмечены многочисленные прослой с амфиפורидами (Чернов, 1962; Першина, 1962; Першина и др., 1971; Производство..., 1987*; Цыганко, 2011). По данным предыдущих исследований (Производство..., 1987*; Государственная..., 2004; Цыганко, 2011), из вучвожской свиты выделены представители рода *Amphipora*, из шервожской — рода *Stellopora*. Определенный нами комплекс располагается стратиграфически выше распространения *Amphipora intexa* Yavor. и ниже *Stellopora spica* Bogoyavl., являющегося пограничным видом эмса-эйфеля.

Так как отложения эмса на Полярном Урале преобразованы многочисленными тектоническими нарушениями, доломитизацией, это негативно сказывается на сохранности ископаемых органических остатков и затрудняет детальное стратиграфическое расчленение разрезов. На крыльях Лек-Елецкой антиклинали вучвожская и шервожская свита не расчленены (Чернов, 1962; Государственная..., 2004), а в стратотипических разрезах охарактеризованы только определениями табулятоморфных кораллов и остракод. Поэтому отложения нижнего девона Полярного Урала требуют дальнейшего палеонтолого-стратиграфического изучения для расширения фаунистической характеристики стратиграфических подразделений.

Заключение

Стратиграфический анализ строматопороидей, кораллов и конодонтов из обнажения на р. Большая Уса (Полярный Урал) свидетельствует о раннедевонском возрасте вмещающих их отложений. Нахождение в комплексе строматопороидей таких видов, как *Stellopora analoga* Bogoyavl., *S. similis* Bogoyavl., *Clathrocoilona abeona* (Yavor.), и конодонтов *Pandorinellina* aff. *expansa* Uyeno et Mason позволяют определить возраст формирования этой толщи как позднеэмский и предположительно отнести вмещающие строматопороидей породы к шервожской свите. Комплекс строматопороидей рода *Stellopora* в составе «амфиפורовых лугов» установлен на севере Урала впервые и дополняет фаунистическую характеристику раннедевонских отложений. Так как виды *Stellopora analoga* Bogoyavl., *S. similis* Bogoyavl. широко распространены в пределах Урало-Монгольского пояса, их находки позволяют также исследовать пути распространения фауны в девоне.

Автор выражает благодарность рецензентам за детальное изучение материала и конструктивные замечания, которые позволили улучшить статью и найти новые направления дальнейших исследований.

Работа выполнена в рамках темы НИР государственного задания ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН № 122040600008-5.

Литература / References

- Антропова Е. В. Строматопороидеи верхнего ордовика и силура западного склона Приполярного Урала: морфология, биостратиграфия, новые виды. Сыктывкар: Геопринт, 2007. 36 с.
- Antropova E. V. Stromatoporoidea of the Upper Ordovician and Silurian of the western slope of the Subpolar Urals:



- morphology, biostratigraphy, new species. Syktyvkar, Geoprint, 2007, 36 с. (in Russian)
- Богоявленская О. В.* Новые виды строматопороидей из амфиоровых известняков среднего девона восточного склона Урала (Ивдельский, Североуральский районы) // *Материалы по палеонтологии Урала*. Свердловск, 1970. С. 69–76.
- Vogoyavlenskaya O. V. New species of stromatoporoids from amphiropic limestones of the Middle Devonian of the eastern slope of the Urals (Ivdelsky, Severouralsky regions). *Materials on paleontology of the Urals*. Sverdlovsk, 1970, pp. 69–76. (in Russian)
- Богоявленская О. В.* Строматопораты нижнего и среднего девона Урала // *Граница нижнего и среднего девона на Урале и ее палеонтологическое обоснование. Часть II: Фораминиферы, строматопораты, табуляты, ругозы, пентамериды и атрипиды*. Свердловск, 1978. С. 36–47.
- Vogoyavlenskaya O. V. Stromatoporata of the Lower and Middle Devonian of the Urals / The boundary of the Lower and Middle Devonian in the Urals and its paleontological substantiation. Part II: Foraminifera, stromatoporates, tabulates, rugose, pentamerids and atripids. Sverdlovsk, 1978, pp.36–47. (in Russian)
- Богоявленская О. В.* Опыт зонального расчленения среднедевонских и франских отложений по строматопороидеям // *Известия Уральского государственного горного университета*. 1998. № 8. С. 18–24.
- Vogoyavlenskaya O. V. Experience of zonal partitioning of Middle Devonian and Frasnian sediments by stromatoporoids. *Proceedings of the Ural State Mining University, Ekaterinburg*, 1998, No. 8, pp.18–24. (in Russian)
- Богоявленская О. В.* Девонские строматопораты (морфология, систематика, стратиграфическое и палеогеографическое распространение) // *Литосфера*. 2007. № 1. С. 109–122.
- Vogoyavlenskaya O. V. Devonian stromatoporites (morphology, systematics, stratigraphic and paleogeographic distribution) // *Lithosphere*, 2007, No. 1, pp. 109–122. (in Russian)
- Богоявленская О. В., Лихачева Е. В.* Строматопораты и девонская стратиграфия // *Известия Уральского государственного горного университета*. Серия: Геология и геофизика. 2002. Вып. 15. Р. 26–28.
- Vogoyavlenskaya O. V., Likhacheva E. V. Stromatoporites and Devonian stratigraphy. *Proceedings of the Ural State Mining University. Series Geology and Geophysics*, 2002, 15, pp. 26–28. (in Russian)
- Богоявленская О. В., Лобанов Е. Ю.* Строматопораты и гелиолитоидеи Уральского палеобассейна // *Известия Уральского горного института*. Серия: Геология и геофизика. 1993. Вып. 2. С.53–62.
- Vogoyavlenskaya O. V., Lobanov E. Yu. Stromatoporites and heliolithoids of the Ural paleobasin. *Proceedings of the Ural Mining Institute. Series: Geology and Geophysics*, 1993, 2, pp.53–62. (in Russian)
- Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200000. Издание второе. Серия Полярно-Уральская. Лист Q-41-XI (Елецкий).* Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2004. 217 с.
- State geological map of the Russian Federation at a scale of 1:200000. Second edition. Polar-Ural Series. Sheet Q-41-XI (Eletsy). Explanatory note. St. Petersburg: VSEGEI, 2004, 217 p. (in Russian)
- Журавлев А. В., Плотыцын А. Н., Вевель Я. А., Ерофеевский А. В.* Пограничные отложения девона и карбона на Воркутинском поперечном поднятии (р. Большая Уса) // *Ученые записки Казанского университета*. Серия: Естественные науки. 2018. Т. 160, кн. 3. С. 467–483.
- Zhuravlev A. V., Plotitsyn A. N., Vewel Y. A., Erofeevsky A. V. Boundary deposits of the Devonian and Carboniferous on the Vorkuta transverse uplift (Bolshaya Usa River). *Scientific Notes of Kazan University. Series: Natural Sciences*, 2018, V. 160, 3, pp. 467–483. (in Russian)
- Першина А. И.* Силурийские и девонские отложения гряды Чернышева. Л.: Из-во АН СССР, 1962. 122 с.
- Pershina A. I. Silurian and Devonian sediments of the Chernyshev Ridge. Leningrad: AS USSR, 1962, 122 p. (in Russian)
- Першина А. И., Цыганко В. С., Щербаков Э. С., Боринцева Н. А.* Биостратиграфия силурийских и девонских отложений Печорского Урала. Л.: Наука, 1971. 130 с. (Тр. ИГ Коми ФАН АН СССР).
- Pershina A. I., Tsyganko V. S. et al. Biostratigraphy of Silurian and Devonian sediments of the Pechora Urals. Leningrad: Nauka, 1971, 130 p. (Proc. IG Komi Branch USSR AS). (in Russian)
- Хромых В. Г., Беляев С. Ю.* Девонские рифы восточного склона Полярного Урала // *Литосфера*. 2010. № 2. С. 25–34.
- Khromykh V. G., Belyaev S. Yu. Devonian reefs of the eastern slope of the Polar Urals. *Lithosphere*, 2010, No. 2, pp. 25–34 (in Russian)
- Цыганко В. С.* Девонские ругозы севера Урала. Л.: Наука, 1981. 220 с.
- Tsyganko V. S. Devonian rugoses of the Ural North. Leningrad: Nauka, 1981, 220 p. (in Russian)
- Цыганко В. С.* Девон западного склона Севера Урала и Пай-Хоя (стратиграфия, принципы расчленения, корреляция). Екатеринбург: УрО РАН, 2011. 358 с.
- Tsyganko V. S. Devonian of the western slope of the North Urals and Pai-Khoy (stratigraphy, principles of dissection, correlation). Yekaterinburg: UB RAS, 2011, 358 p. (in Russian)
- Чернов Г. А.* Девонские отложения восточной части Болшеземельской тундры. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1962. 118 с.
- Chernov G. A. Devonian sediments of the eastern part of the Bolshezemelskaya tundra. Moscow – Leningrad: USSR AS, 1962, 118 p. (in Russian)
- Янет В. Ф.* Подкласс Tabulata // *Кишечнополостные и брахиоподы живецких отложений восточного склона Урала*. М.: Недра, 1972. С. 48–98.
- Yanet V. F. Subclass Tabulata. *Intestinal Spiders and Brachiopods of the Zhizhian sediments of the eastern slope of the Urals*. Moscow: Nedra, 1972, pp. 48–98. (in Russian)

Поступила в редакцию / Received 15.07.2024



Минералого-технологическая оценка отходов ЦОФ «Кузбасская» (Кемеровская область)

Т. А. Чикишева^{1,2,3}, А. Г. Комарова^{2,3}, Н. Ю. Турецкая^{1,3}

¹ Институт земной коры СО РАН, Иркутск; chikishevatyana@mail.ru

² Иркутский государственный университет, Иркутск

³ НПК «Спирит», Иркутск

В статье представлены результаты изучения вещественного состава отходов углеобогащательной фабрики «Кузбасская». Установлено, что в состав исходного сырья входят такие токсичные элементы, как мышьяк, хром, ртуть, селен, бериллий и ванадий. Из ценных элементов-примесей в пробе отмечены серебро, лантан, молибден, скандий, селен, свинец и иттрий. Показатель зольности исходного топлива составил 22.4 %, что свидетельствует о присутствии несгораемых фаз, представленных неорганическим веществом. Оптико-минералогическим анализом установлено, что основная масса пробы сложена углём (82.51 %), кроме того, содержатся карбонаты, полевые шпаты, кварц, глинистые минералы, а также магнетит и гидроксиды железа. В единичных зёрнах визуализируются сульфиды, монацит, рутил, циркон и слюды.

Ключевые слова: отходы угледобычи, угольные шламы, комплексная переработка минерального сырья, минералого-технологическая оценка сырья, Кузнецкий угольный бассейн

Mineralogical and technological assessment of waste from the Kuzbasskaya Central Processing Plant (Kemerovo region)

T. A. Chikisheva^{1,2,3}, A. G. Komarova^{2,3}, N. Yu. Turetskaya^{1,3}

¹ Institute of the Earth Crust SB RAS, Irkutsk

² Irkutsk State University, Irkutsk

³ Research and production company «Spirit», Irkutsk

The article deals with the results of the material composition studying of the Kuzbasskaya coal preparation plant waste. Such toxic elements as arsenic, chromium, mercury, selenium, beryllium and vanadium are included into the composition of this material. The valuable impurity elements are silver, lanthanum, molybdenum, scandium, selenium, lead and yttrium. The ash content of the original fuel was 22.4 %, which indicated the presence of non-combustible phases represented by inorganic matter. The optical and mineralogical analysis determined that this waste was composed of coal (82.51 %), in addition, it contained carbonates, feldspars, quartz, clay minerals, as well as magnetite and iron hydroxides. Sulfides, monazite, rutile, zircon and micas were visualized in single grains.

Keywords: coal mining waste, coal sludge, complex processing of mineral raw materials, mineralogical and technological assessment of raw materials, Kuznetsk coal basin

Введение

Проблема комплексной и безотходной переработки отходов угледобычи на сегодняшний день является актуальной задачей, требующей незамедлительного решения. Для этого требуется внедрение новых технологических решений с получением ряда продуктов, пригодных для различных отраслей промышленности (Чикишева и др., 2023). По сути, можно говорить о создании новой отрасли для вовлечения во вторичный передел накопленных за многие годы техногенных отходов, что соотносится с целями, принципами и приоритетами «Стратегии развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года»*.

Помимо решения остростоящего вопроса снижения негативного воздействия накопленных отходов на

окружающую среду, внедрение соответствующих технологий должно повысить конкурентоспособность угольной промышленности и способствовать развитию регионов угледобычи (ГОСТ 9414.3-93; Ожогина и др., 2018; Сосновский, Сачков, 2021; Турецкая, Чикишева, 2023; Ali Ucar et al., 2023; Debjani et al., 2022; Jay et al., 2021; Menshikova et al., 2022; Nguen Cong Thang, Nguen Van Tuan, 2021; Yoginder, Paul, 2014).

Одним из главных угледобывающих субъектов РФ является Кузбасс, где высокие темпы переработки неизбежно влекут за собой формирование огромных масс горнопромышленных отходов (О состоянии..., 2021). Для вовлечения в переработку отходов угледобывающих предприятий распоряжением Правительства РФ утверждена комплексная научно-техническая программа полного инновационного цикла «Чистый уголь — Зеленый Кузбасс»**, участником которой стал Институт

* Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года: Распоряжение Правительства РФ № 84-р от 25.11.2018. URL: government.ru

** Комплексная научно-техническая программа: Распоряжение Правительства РФ № 1144-р от 11.05.2022. URL: pravo.gov.ru

Для цитирования: Чикишева Т. А., Комарова А. Г., Турецкая Н. Ю. Минералого-технологическая оценка отходов ЦОФ «Кузбасская» (Кемеровская область) // Вестник геонаук. 2024. 9(357). С. 28–34. DOI: 10.19110/geov.2024.9.4

For citation: Chikisheva T. A., Komarova A. G., Turetskaya N. Yu. Mineralogical and technological assessment of waste from the Kuzbasskaya Central Processing Plant (Kemerovo region). Vestnik of Geosciences, 2024, 9(357), pp. 28–34, doi: 10.19110/geov.2024.9.4



земной коры СО РАН. С момента старта программы и по настоящее время в институте ведется научно-исследовательская работа по теме «Переработка хвостов угольных обогатительных фабрик с целью получения товарного угольного концентрата». Эту задачу невозможно решить без детального изучения вещественного состава отходов угледобычи с применением современных методов минералогического анализа.

Материалы и методы

Определение зольности топлива выполнено методом ускоренного озоления; определение химического состава исходной пробы — методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой.

Минеральный состав пробы и содержание каждого минерала в пробе были определены с помощью методов оптико-минералогического анализа по методическим рекомендациям НСОММИ (Оптико-минералогический..., 2012) с применением бинокулярного стереомикроскопа «Микромед МС-2-ZOOM 2CR». Рентгенографический анализ выполнялся на дифрактометре ДРОН-3.0 в ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН (аналитик М. Н. Рубцова).

Изучение микрокомпонентов угля в шлифах и аншлифах выполнялось по межгосударственным стандартам (ГОСТ 9414.2-93, ГОСТ 9414.3-93, ГОСТ 9414.1-94).

Определение несгораемых фаз в углях проводилось с применением сканирующего электронного микроскопа MIRA3 LMN TESCAN в «Центре коллективного пользования изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН в режиме обратнорассеянных электронов (аналитик А. Г. Чуешова).

Результаты и обсуждение

В результате определения химического состава проб установлено, что в исходном сырье содержатся следующие элементы-примеси: мышьяк (менее 0.0005 %), хром (0.0010 %), магний (0.145 %), ртуть (ме-

нее 0.0005 %), сера (0.202 %), селен (менее 0.0005 %), бериллий (менее 0.0002 %) и ванадий (0.0024 %), относящиеся к токсичным компонентам (Крылов, 2017). Из ценных элементов-примесей в пробе отмечены серебро, лантан, молибден, скандий, селен, свинец и иттрий. Массовые доли перечисленных компонентов составляют тысячные доли процентов или находятся на пределе чувствительности.

Гранулометрическим анализом установлено, что 51.96 % от исходного сырья имеет крупность менее 20 мкм с показателем зольности сухого топлива (A^d) 25.4 % (рис. 1). Выход материала более 2 мм составляет 10.01 % с показателем A^d 35 %. Показатель A^d в классе крупности от 0.02 до 0.04 мм составляет 20.5 % с выходом 9.13 %. В классе крупности от 1 до 2 мм показатель A^d равен 22.3 %. Показатель A^d в материале от 0.071 до 1 мм варьирует от 18.8 до 8 %.

Анализ полученных данных показал, что присутствие такого большого количества тонкодисперсного шлама повлияет на вязкость пульпы и сегрегационные способности более крупных зерен. Повышенный показатель зольности в материале более 2 мм свидетельствует о том, что в данном сырье присутствует несгораемая фаза, представленная неорганическим веществом. Практический интерес по всем своим показателям представляет материал, находящийся в диапазоне крупности от 2 до 0.02 мм, показатель A^d в данном диапазоне составляет 15.07 %.

Оптико-минералогический анализ показал, что основная масса пробы сложена углём — 82.51 %. В меньшем количестве в материале пробы присутствуют карбонаты, полевые шпаты, кварц и глинистые минералы. В десятых долях процента отмечены гидроксиды железа, а в сотых долях — магнетит. В единичных зёрнах визуализируются сульфиды, монацит, рутил, циркон и слюды.

Анализ распределения угля по классам крупности показал, что в материал крупностью менее 0.020 мм распределяется 46.92 % угля (рис.2), в материал крупностью от 0.5 до 0.020 мм — 35.52 %, крупностью более 0.5 мм — 17.56 % угля.



Рис. 1. Гранулометрический анализ исходного сырья с показателями зольности сухого топлива в классах крупности
Fig. 1. Granulometric analysis of the raw material with indicators of ash content by size classes



Рис. 2. Распределение угля по классам крупности

Fig. 2. Coal distribution by size classes

Микроскопическое исследование углей в проходящем свете

В ходе изучения шлифов, изготовленных из образцов пород, вмещающих уголь, было установлено, что они представлены среднезернистыми граувакковыми песчаниками и аргиллитами.

Обломочная часть песчаников в основном сложена обломками осадочных пород, в меньшем количестве — мономинеральными зёрнами кварца и полевых шпатов. Структура псаммитовая среднезернистая,

цемент контурный, глинисто-серицитовый. Аргиллиты состоят преимущественно из каолинита и гидрослюд. Структура пелитовая, текстура сланцеватая, слабо выраженная в субпараллельной ориентировке единичных зёрен слюды.

Изучаемые породы и их обломки обогащены органическим веществом и могут быть отнесены к каустобиолитам гумусового типа. При их изучении в проходящем свете наблюдаются разные соотношения угольных и минеральных компонентов. Угольные компоненты имеют полосчатые

(рис. 3), штриховатые и линзовидно-штриховатые формы (Столбова, 2013). Цвет мацералов угля в основном чёрный, реже коричневый и тёмно-коричневый, что свидетельствует о высокой степени фюзенизации.

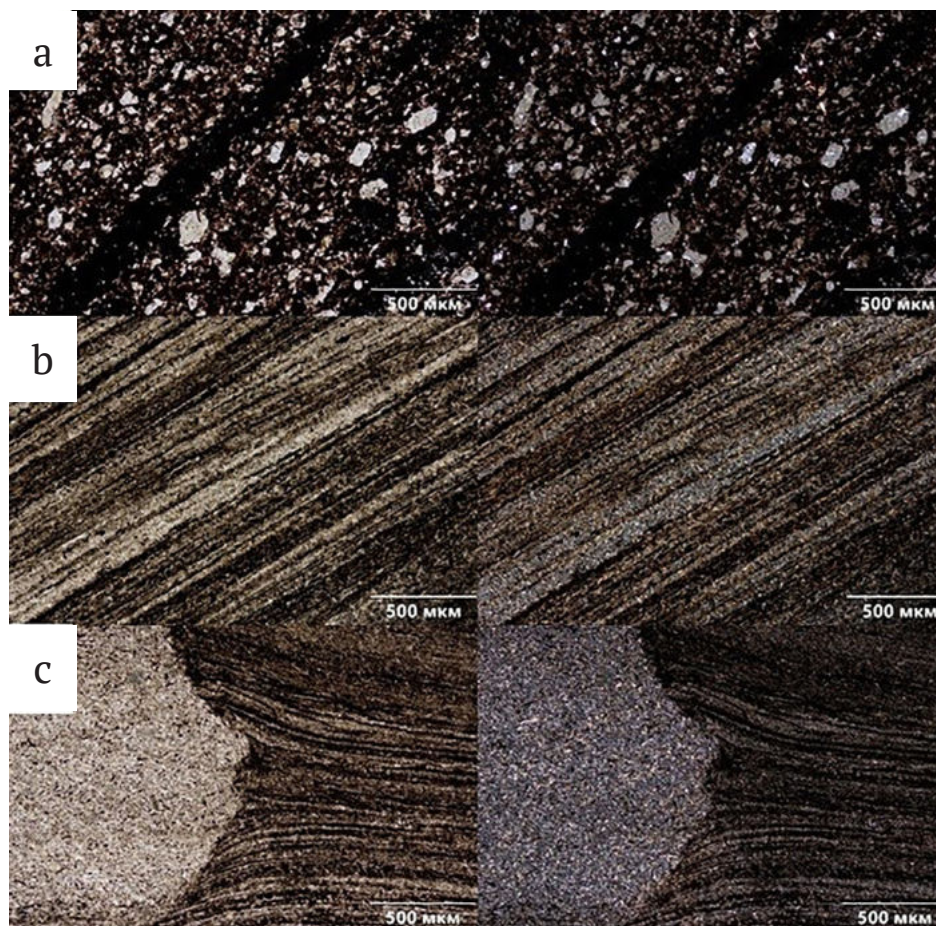


Рис. 3. Микрофотографии каустобиолита с различными формами угольных компонентов: а — полосчатой, б — штриховатой, с — линзовидно-штриховатой

Прозрачный шлиф, слева — анализатор выключен, справа — включен

Fig. 3. Micrographs of caustobioolith with different forms of carbon components: a — striped, b — linear, c — lenticular and linear.

Transparent section, on the left — the analyzer is off, on the right — on



Микроскопическое исследование углей в отраженном свете

Микроскопически по визуальным признакам было выделено три группы мацералов — витринит (телинит, коллинит), липтинит (спорнит), инертинит (фюзенит и склеротинит), а также минеральные составляющие. Мацералы имеют разную степень сохранности

клеточной структуры (рис. 4). Бесструктурные мацералы образуют скопления и слагают полосы, структурные различия рассеяны в коллините.

Минеральными составляющими минеритов выступают глинистые минералы, сульфиды железа, карбонаты, оксиды кремния и прочие минеральные включения. Сульфиды железа проявлены в виде выделений неправильной формы, фрамбоидов и прожилков.

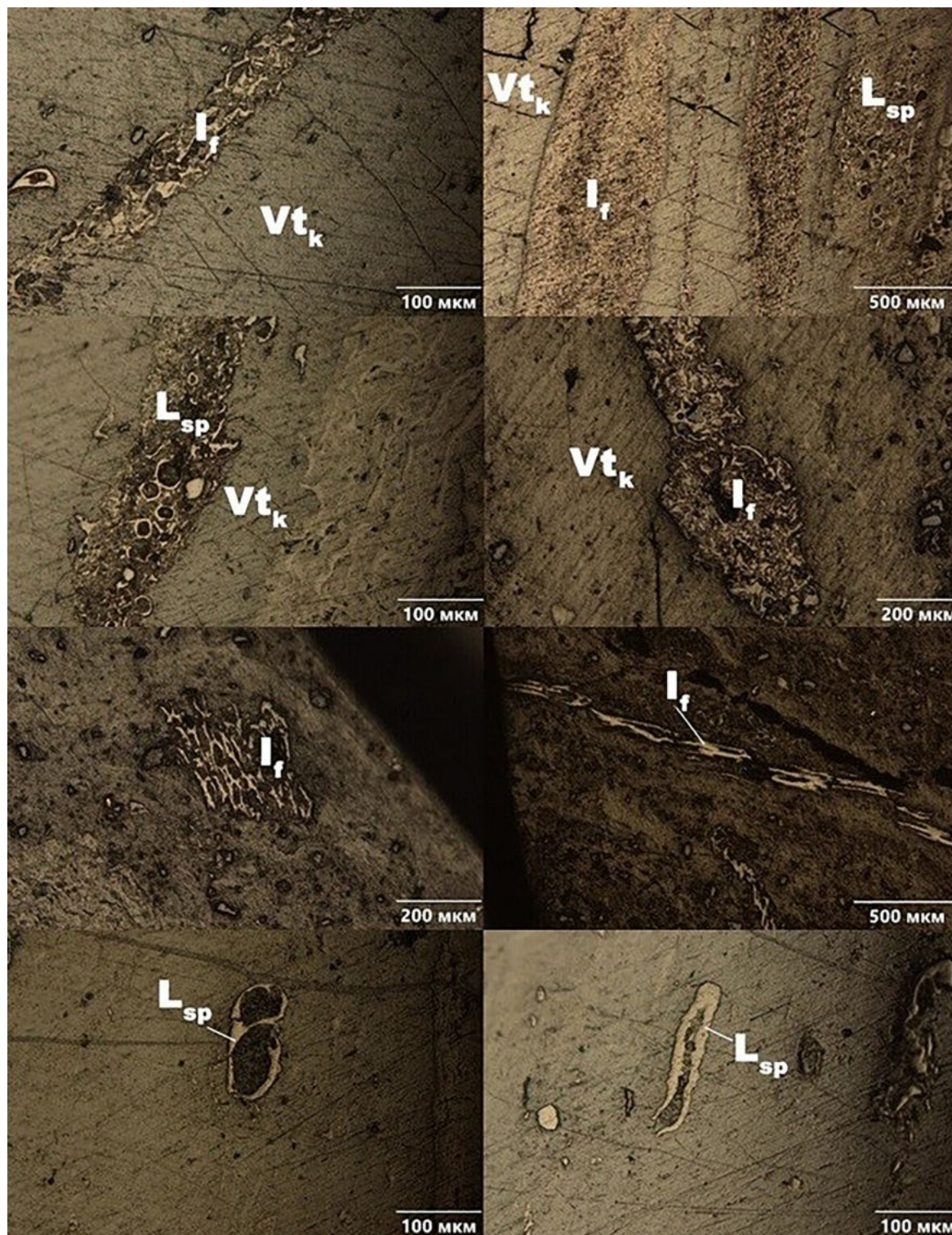


Рис. 4. Микрофотографии фрагмента аншлиф-брикета: Vt_k — коллинит, I_f — фюзенит, L_{sp} — споринит, L_{kt} — кутиноит. Отраженный свет, анализатор выключен

Fig. 4. Microphotographs of a polished briquette fragment: Vt_k — collinite, I_f — fusinite, L_{sp} — sporinite, L_{kt} — cutinite. Reflected light, the analyzer is off

Изучение методом сканирующей электронной микроскопии

При исследовании аншлифов с помощью сканирующего электронного микроскопа установлено, что изучаемые образцы представляют собой полифазные агрегаты, состоящие из минералов и угля. Среди минеральных составляющих в таких агрегатах отмечаются кварц, каолинит, сидерит, апатит, пирит и рутил. На изображениях общего вида образцов в обратнорассеянных электронах (рис. 5) чётко прослеживается переслаивание чистого или слабозагрязнённого угля с его полифазными агрегатами.

Каолинит заполняет клеточные полости, встречается в виде линз, прослоек, тонкодисперсных частиц (рис. 6, а), а также выступает цементирующим веществом во вмещающей уголь породе. Кроме того, в пробе отмечаются микропереслаивания угля и минеральных агрегатов, содержащих каолинит и апатит (рис. 6, b–d).

Апатит часто ассоциирует с каолинитом (см. рис. 6) и представлен выделениями неправильной формы. Рутил и сидерит визуализируются в виде редких включений неправильной формы.

Заключение

Материал пробы отходов ЦОФ «Кузбасская» по своему составу относится к техногенному минеральному сырью первой группы, то есть сходному по составу и свойствам с природным (Ожогина, Котова, Якушина). Основная масса пробы сложена углём (82.51 %), большая часть которого распределяется в крупность менее 20 мкм (46.92 %). Изучаемые породы и их обломки обогащены органическим веществом и могут быть отнесены к каустобиолитам гумусового типа. Микроскопически они представляют собой полифазные агрегаты с разными количественными соотношениями мацералов угля и минеральных компонентов. Угольные компоненты имеют полосчатые, штриховатые и линзовидно-штриховатые формы. Минеральные составляющие агрегатов представлены каолинитом, глинистыми минералами, сульфидами железа, карбонатами, силикатами, минералами кремнезема и другими неорганическими соединениями, которые повышают зольность энергетического сырья. Изучаемые отходы также могут представлять интерес как источник редких и редкоземельных элементов.

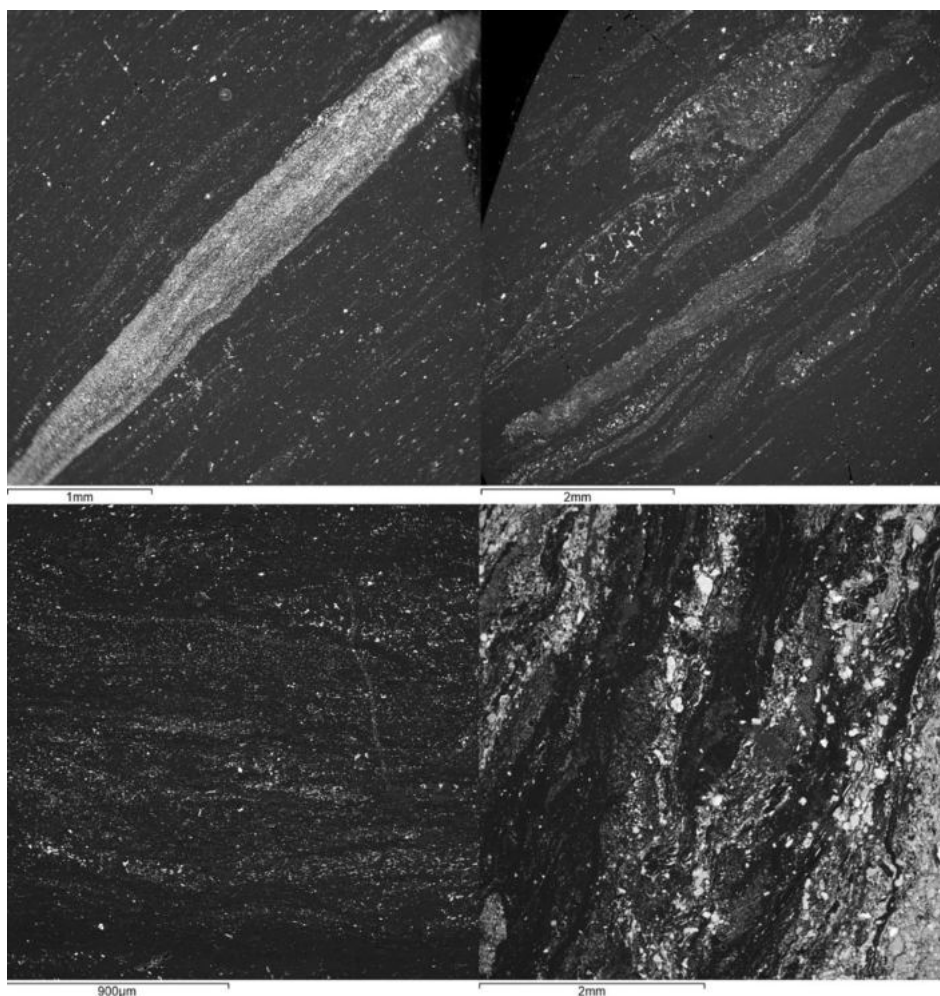


Рис. 5. Переслаивание угля с полифазными агрегатами: микрофотографии фрагментов аншлиф-брикета. Изображения в обратнорассеянных электронах

Fig. 5. Alternation of coal with polyphase aggregates: microphotographs of a polished briquette fragment. Backscattered electron images

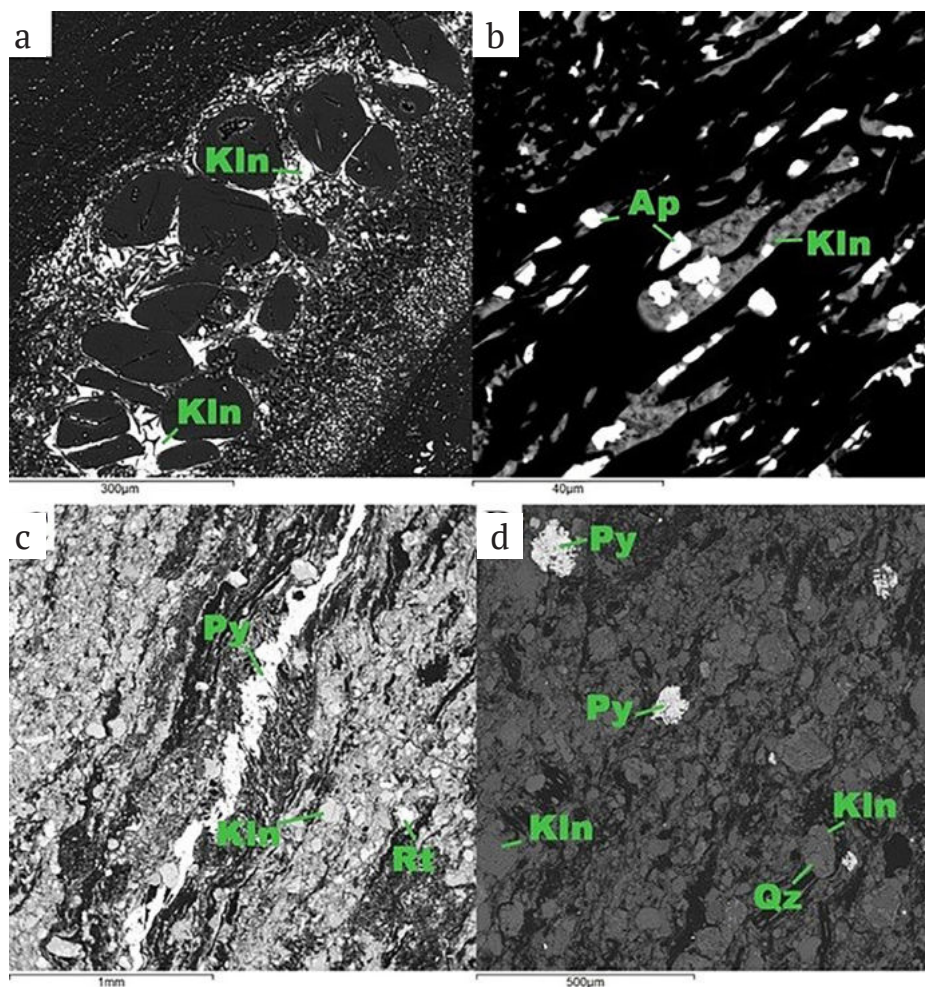


Рис. 6. Микрофотографии фрагментов аншлиф-брикета: а — каолинит, заполняющий клеточные полости, б—д — микропереслаивание угля и полифазных минеральных агрегатов. Kln — каолинит; Py — пирит; Rt — рутил. Ap — апатит, Qz — кварц. Изображения в обратнорассеянных электронах

Fig. 6. Microphotographs of a polished briquette fragment: а — kaolinite filling cellvoids, б—d — microalternation of coal and polyphase mineral aggregates. Kln — kaolinite, Py — pyrite, Rt — rutile, Ap — apatite, Qz — quartz. Backscattered electron images

Таким образом, можно сделать вывод, что на данном этапе отходы ЦОФ «Кузбасская» могут быть вовлечены в повторную переработку как энергетическое сырьё для получения угольного концентрата. Оставшийся после извлечения угля материал рекомендуется рассмотреть в качестве сырья для строительных отраслей промышленности и как источник редких и редкоземельных элементов после дополнительного изучения и при условии экономической целесообразности.

Работы выполнены в рамках комплексного научно-технического проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России № 075-15-2022-1192 «Переработка хвостов угольных обогатительных фабрик с целью получения товарного угольного концентрата» при поддержке комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи твердых полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения». Утвержденной Распоряжением Правительства РФ № 1144-р от 11.05.2022.

Литература/ References

- ГОСТ 9414.2-93 (ИСО 7404-2-85). Уголь каменный и антрацит. Методы петрографического анализа: Межгосударственный стандарт. Часть 2. Метод подготовки образцов угля. М.: Изд-во стандартов, 1995. 18 с.
 GOST 9414.2-93 (ISO 7404-2-85). Hard coal and anthracite. Methods of petrographic analysis: Interstate standard. Part 2. Method of preparation of coal samples. Moscow: Publishing house of standards, 1995, 18 p. (in Russian)
- ГОСТ 9414.3-93 (ИСО 7404-3-84). Уголь каменный и антрацит. Методы петрографического анализа: Межгосударственный стандарт. Часть 3. Методы определения групп мацералов. М.: Изд-во стандартов, 1995. 12 с.
 GOST 9414.3-93 (ISO 7404-3-84). Hard coal and anthracite. Methods of petrographic analysis: Interstate standard. Part 3. Methods for determination of maceral groups. Moscow: Publishing house of standards, 1995, 12 p. (in Russian)
- ГОСТ 9414.1-94 (ИСО 7404-1-84). Уголь каменный и антрацит. Методы петрографического анализа: Межгосударственный стандарт. Часть 1. Словарь терминов. М.: Изд-во стандартов, 1995. 23 с.
 GOST 9414.1-94 (ISO 7404-1-84). Hard coal and anthracite. Methods of petrographic analysis: Interstate stan-

- standard. Part 1. Glossary of terms. Moscow: Publishing house of standards, 1995, 23 p. (in Russian)
- Крылов Д. А. Негативное влияние элементов-примесей от угольных ТЭС на окружающую среду и здоровье людей // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 12. С. 77—87. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-0-77-87
- Krylov D. A. Negative impact of impurity elements from coal-fired thermal power plants on the environment and human health. Mining information and analytical bulletin, 2017, No. 12, pp. 77—87. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-0-77-87 (in Russian)
- Ожогоина Е. Г., Шадрунова И. В., Чекушина Т. В. Роль минералогических исследований в решении экологических проблем горнопромышленных районов // Горный журнал. 2017. № 11. С. 105—110. DOI: 10.17580/gzh.2017.11.20
- Ozhogina E. G., Shadrunova I. V., Chekushina T. V. The role of mineralogical studies in solving environmental problems of mining areas. Mining Journal, 2017, No. 11, pp. 105—110. DOI: 10.17580/gzh.2017.11.20. (in Russian)
- Ожогоина Е. Г., Котова О. Б., Якушина О. А. Горнопромышленные отходы: минералогические особенности // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2018. № 6. С. 43—49. DOI: 10.19110/2221-1381-2018-6-43-49
- Ozhogina E. G., Kotova O. B., Yakushina O. A. Mining waste: mineralogical features. Vestnik of the Institute of Geology Komi SC UB RAS, 2018, No. 6, pp. 43—49. DOI: 10.19110/2221-1381-2018-6-43-49. (in Russian)
- Оптико-минералогический анализ шлиховых и дробленых проб: Методические рекомендации № 162 / Научный совет по методам минералогических исследований (НСОММИ). М.: ВИМС, 2012. 23с.
- Optical and mineralogical analysis of concentrate and crushed samples: Methodological recommendations No. 162. Scientific Council on Methods of Mineralogical Research (NSOMMI). Moscow: VIMS, 2012, 23 p. (in Russian)
- О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2021 году: Гос. доклад / Гл. ред. Д. Д. Тетенькин, Е. И. Петров. URL: Уголь (data-geo.ru) (дата обращения: 4.03.2024).
- On the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2021: state report. Eds. D. D. Tetenkin, E. I. Petrov. Coal (data-geo.ru) (date of access: 4.03.2024). (in Russian)
- Столбова Н. Ф., Исаева Е. Р. Петрология углей: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. 77 с.
- Stolbova N. F., Isaeva E. R. Petrology of coals: a tutorial. Tomsk: Publishing house of Tomsk Polytechnic University, 2013, 77 p. (in Russian)
- Сосновский С. А., Сачков В. И. Комплексная переработка техногенного углесодержащего сырья // Проблемы комплексной и экологически безопасной переработки природного и техногенного минерального сырья (Плаксинские чтения — 2021) СГКГМИ (ГТУ). Владикавказ, 2021. С. 498—501.
- Sosnovsky S. A., Sachkov V. I. Complex processing of technogenic coal-containing raw materials. "Problems of complex and environmentally safe processing of natural and technogenic mineral raw materials (Plaksin readings — 2021", STU, Vladikavkaz, 2021, pp. 498—501. (in Russian)
- Турецкая Н. Ю., Чикишева Т. А. Перспективы получения товарного продукта из отходов флотации угольных фабрик // Уголь. 2023. № 9. С. 95—99. DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2023-9-95-99>
- Turetskaya N. Yu., Chikisheva T. A. Prospects for obtaining a commercial product from flotation waste of coal factories. Coal, 2023, No. 9, pp. 95—99. DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2023-9-95-99> (in Russian)
- Чикишева Т. А., Комарова А. Г., Прокопьев С. А., Прокопьев Е. С., Алексеева О. Л. Минералого-технологическая оценка отходов углеобогатительной фабрики «Краснобродская-Коксовая» // Технологическая минералогия в оценке качества минерального сырья природного и техногенного происхождения: Сб. ст. по материалам докл. XV Росс. семинара по технолог. минералогии / Под ред. В. В. Щипцова, Е. Н. Световой; Институт геологии КарНЦ РАН. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2023. С. 43—46. DOI: 10.17076/TM15_57
- Chikisheva T. A., Komarova A. G., Prokopyev S. A., Prokopyev E. S., Alekseeva O. L. Mineralogical and technological assessment of waste from the Krasnobrodskaya-Koksovaya coal processing plant. Technological mineralogy in assessing the quality of mineral raw materials of natural and technogenic origin: collection of articles based on the materials of the reports of the XV Russian seminar on technological mineralogy. Eds. V. V. Shchiptsov, E. N. Svetova. Petrozavodsk: Karelian RC RAS, 2023, pp. 43—46. DOI: 10.17076/TM15_57 (in Russian)
- Ali Ucar, Oktay Sahbaz, Nezahat Ediz, Ismail Goktay Ediz An investigation into the enrichment of coal wastes of Western Lignite Company (WLC) by physical and physico-chemical methods // Madencilik — Mining, 2023, V. 62 (1), pp. 7—15. <https://doi.org/10.30797/madencilik.1111260>
- Debjani N., Bidyut D., Rashmi S., Santosh S., Ajinkya M., Pratik Swarup D. Effect of grinding behavior on liberation of coal macerals // ISIJ International, 2022, V. 62, No. 1, pp. 99—103, <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2021-209>
- Jay N. Meegoda, Li-ming HU, Nabil M. A. AL-Joulani Solid waste and ecological issues of coal to energy // Journal of Hazardous, Toxic and Radioactive Waste, April 2021, pp.99—107. DOI: 10.1061/(ASCE)HZ.1944-8376.0000071
- Menshikova E., Blinov S., Belkin P., Ilaltdinov I., Volkova M. Dumps of the Kizel coal basin as a potential source of rare and rare-earth elements // Science and Global Challenges of the 21st Century, 2022, LNNS 342, pp. 352—361, https://www.researchgate.net/deref/https%3A%2F%2Fdoi.org%2F10.1007%2F978-3-030-89477-1_35
- Nguyen Cong Thang, Nguyen Van Tuan The potential use of waste rock from coal mining for the application as recycled aggregate in concrete // Proceedings of the International Conference on Innovations for Sustainable and Responsible Mining, 2021, V. 1, pp. 550—561. DOI: 10.1007/978-3-030-60839-2_29
- Yoginder P. Chugh, Paul T. Behum Coal waste management practices in the USA: an overview // International Journal of Coal science and technology, 2014, 1 (2), pp. 163—176. DOI:10.1007/s40789-014-0023-4



Применение нейронных сетей для распознавания хитиной зооид на изображениях

Р. Р. Якупов¹, К. Б. Гусманова²

¹ Институт геологии УФИЦ РАН, Уфа; jakupov@ufaras.ru

² Уфимский университет науки и технологий, Уфа; kamilla@ufagen.ru

Палеонтологическое определение микрофауны с помощью автоматизированного распознавания изображений представляет собой инновационное приложение существующих программных методов анализа и классификации на основе технологий компьютерного зрения и машинного обучения. Разработка программного обеспечения, способного распознавать хитиной зооиды на снимках, упростит и ускорит обработку больших массивов данных по микрофоссилиям. Использование нейронных сетей для анализа изображений возможно и для других групп органических остатков.

Хитиной зооиды имеют ряд преимуществ, позволяющих поэтапно оценить применимость технологии автоматизированного распознавания изображений для биостратиграфических задач по сравнению с другими группами микрофоссилий. Искусственная палеонтологическая классификация хитиной зооиды построена на четких морфологических признаках и поддается формализации. На первом этапе решения задач распознавания проводилось построение функции классификации, прогнозирующей, к какому классу принадлежит ископаемое по входному вектору признаков: «хитиной зооиды» либо «нехитиной зооиды». Разработанная модель алгоритма распознавания хитиной зооиды показала высокую степень точности (более 98 %).

Ключевые слова: хитиной зооиды, распознавание изображений, нейронные сети, машинное обучение, палеонтология

Application of neural networks for chitinozoans recognition in images

R. R. Yakupov¹, K. B. Gusmanova²

¹ Institute of Geology UFRC RAS, Ufa

² Ufa University of Science and Technology, Ufa

Paleontological identification of microfauna using automated image recognition represents an innovative practical application of existing software methods for analysis and classification based on computer vision and machine learning technologies. The development of software capable of recognition of Chitinozoans in images will simplify and speed up the processing of large amounts of microfossil data. The use of neural networks for image analysis is also possible for other groups of paleoorganisms.

Chitinozoans have a number of advantages that allow a step-by-step assessment of the applicability of automated image recognition technology for biostratigraphic problems compared to other groups of microfossils. The artificial paleontological classification of Chitinozoa is based on clear morphological characteristics and can be formalized. At the first stage of solving recognition problems, a classification function was constructed that predicts class, the fossil belongs to, based on the input feature vector – either “chitinozoa” or “non-chitinozoa”. The developed model of the Chitinozoans recognition algorithm showed a high degree of accuracy (more than 98 %).

Keywords: chitinozoan, image recognition, neural networks, machine learning, paleontology

Введение

Хитиной зооиды — вымершая группа микроорганизмов неизвестного систематического положения, используется для определения возраста вмещающих осадочных отложений. Они представляют собой мелкие органостенные микрофоссилии от 40 до 1500 мкм с радиальной симметрией. В биостратиграфии ордовикских и силурийских морских отложений хитиной зооиды используют наравне с конодонтами и граптолитами.

Исследование микрофоссилий начинается с дезинтеграции породы и выделения нерастворимого органического остатка. Из полученного остатка достаются единичные микрофоссилии, в дальнейшем проводится их изучение с помощью световой и электронной микроскопии. В результате накапливается большое количество фотографий, требующих индивидуальной

обработки в графических редакторах и последующего анализа. Совместно с хитиной зооидами встречаются и другие группы микро- и макрофоссилий. Требуется ручной отбор нужного материала для фотографирования, определение и палеонтологическое описание везикул (единичных организмов) хитиной зооиды на основе полученных изображений микропроблематики.

Несмотря на то, что хитиной зооиды являются признанной группой для определения возраста отложений силура и ордовика, они считаются проблематичными — неизвестна их точная биологическая принадлежность к царству животных или растений (Paris, Nolvak, 1999). Искусственная биологическая классификация хитиной зооиды построена на морфологических признаках — строении пробки/оперкулума, форме везикулы и морфологии стенки (Paris, 2006). Несомненным плюсом для использования хитиной зооиды в качестве модельной груп-

Для цитирования: Якупов Р. Р., Гусманова К. Б. Применение нейронных сетей для распознавания хитиной зооиды на изображениях // Вестник геонаук. 2024. 9(357). С. 35–39. DOI: 10.19110/geov.2024.9.5

For citation: Yakupov R. R., Gusmanova K. B. Application of neural networks for chitinozoans recognition in images. Vestnik of Geosciences, 2024, 9(357), pp. 35–39, doi: 10.19110/geov.2024.9.5

пы органики на данный момент является их классификационная иерархия, где виды объединяются в 56 родов, которые относятся всего к трем семействам и объединяются в два отряда (Paris, Nolvak, 1999). Возможно последовательное решение задачи определения изображений от семейства и подсемейства к роду и виду — при видовом описании палеонтологи следуют данному алгоритму. Еще одним аргументом в пользу использования хитинозой является то, что даже поврежденные и частично разрушенные везикулы из-за радиальной симметрии могут виртуально достраиваться до полной формы, если сохранилась некоторая часть или фрагменты везикулы по оси симметрии. Для конодонтов, граптолитов и других важных для био-стратиграфии ордовика и силура групп, не имеющих такой особенности, подобный подход (достраивание формы) невозможен. Решение данной проблемы является нетривиальной задачей и требует отдельного этапа работ.

Современные программные и технические возможности позволяют нейронной сети анализировать и классифицировать изображения в разных областях человеческой деятельности, например в медицине (Гусев, 2017; Gardner et al., 2023), в литологии (Журавлев, Груздев, 2024). Опубликованы работы по распознаванию изображений палеонтологических объектов: фораминифер (Gorur et al., 2023), радиолярий (Ruikar, Agrawal, 2019), спор и пыльцы (White, 2020) и раковинной фауны (Marmo et al., 2006). Автоматизация подготовки, обработки и распознавания изображений палеонтологических объектов способствует существенному сокращению рутинных ручных этапов обработки информации. Увеличение производительности труда критически важно на фоне востребованности узких профильных специалистов-палеонтологов, а инновационные подходы открывают новые горизонты для изучения прошлого Земли и применения новейших методов в фундаментальных науках.

Цель данной работы заключается в создании системы для автоматизации процесса классификации хитинозой на основе их морфологических признаков.

Материалы и методы

Разработка программного обеспечения, способного автоматизировать процесс распознавания хитинозой на изображениях, проходила в несколько этапов. На первом этапе набирался обучающий и тестовый набор данных, включающий 2955 СЭМ-изображений (СЭМ — сканирующий электронный микроскоп) хитинозой. Дополнительно было подготовлено 3484 фотографии других микрофоссилий. В ходе эксперимента было выяснено, что изображений для проверки и обучения нейронной сети недостаточно из-за сильного дисбаланса классов (недостаточно изображений в каждой категории и их количество отличается в два-три раза). Набор данных, необходимый для обучения нейронной сети, расширили, используя существующие изображения, для чего в часть изображений были внесены изменения: некоторые были повернуты на определенный угол, часть изображений кадрировалась по случайным параметрам. Созданные новые изображения вошли в ту же базу данных. Вышеописанные действия называются «аугментацией данных». Набор данных дополнили также изображениями из других источников, до 5000 в каждой категории.

После объединения данных были удалены изображения, содержащие ложные признаки, в частности, среди изображений хитинозой присутствовали фотографии с белым фоном, которые модель приняла за признак, так как у «нехитинозой» белого фона не было. Были убраны рамки, линейки и другие элементы, мешающие распознаванию. Все изображения были приведены к градациям серого и лишены цветовой информации (рис. 1).

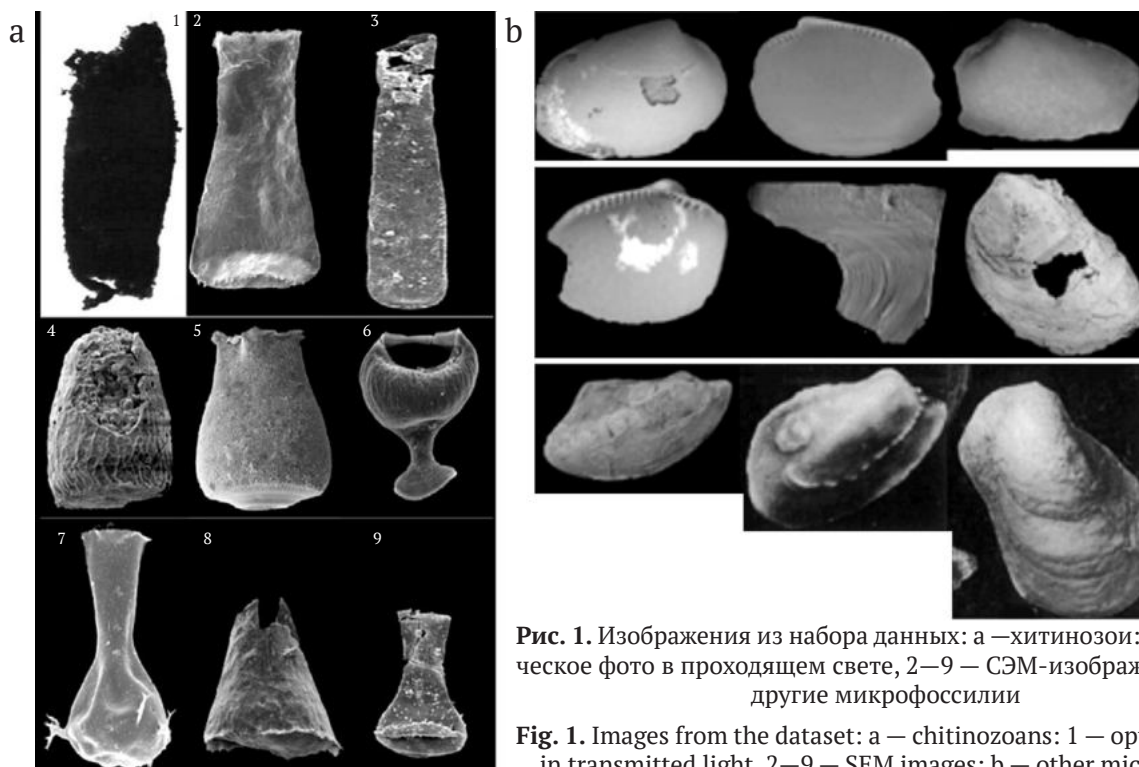


Рис. 1. Изображения из набора данных: а — хитинозои: 1 — оптическое фото в проходящем свете, 2–9 — СЭМ-изображения; б — другие микрофоссилии

Fig. 1. Images from the dataset: a — chitinozoans: 1 — optical photo in transmitted light, 2–9 — SEM images; b — other microfossils



Математическая постановка задачи выражалась в решении задачи бинарной классификации и построении функции классификации, предсказывающей, к какому классу принадлежит изображение ископаемого по входному вектору признаков — «хитинозоа» либо «нехитинозоа».

Для системы распознавания изображений была выбрана архитектура свёрточной нейронной сети (CNN) (рис. 2).

Выбор свёрточной нейронной сети для распознавания изображений обусловлен её способностью эффективно обрабатывать визуальные данные и сравнительно высокой точностью в классификации изображений (Tan, Quoc, 2021).

Была выбрана модель EfficientNetV2B0, так как она принадлежит к семейству EfficientNetV2, улучшающему исходную серию EfficientNet. EfficientNetV2 — семейство более мелких и быстрых нейронных сетей для распознавания изображений. По сравнению с Effi-

cientNet и более поздними разработками, EfficientNetV2 обучается до 11 раз быстрее, будучи при этом в 6.8 раза меньше (Tan, Quoc, 2021).

Stem-блок — начальная часть модели, включающая несколько сверток и активирований, оптимизированных для быстрого извлечения признаков (рис. 3).

Сетевые стадии включают последовательность блоков MBConv и Fused-MBConv. Каждый блок состоит из свёрточного слоя, за которым следует активация, и завершается блок нейронной сети слоем пакетной нормализации.

В отличие от обычных MBConv, Fused-MBConv-блоки совмещают свёртки и нормализацию в одном шаге, что помогает увеличить эффективность модели.

В конце сети используется глобальное усреднение для снижения размерности признаков перед передачей в окончательный полносвязный слой для предсказания классов.

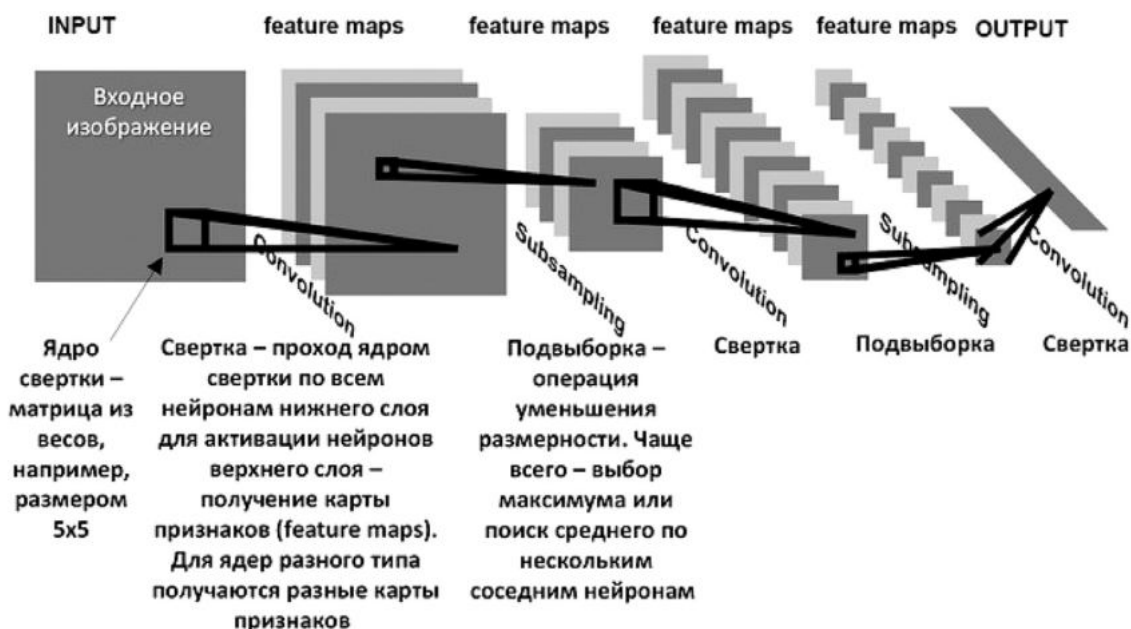


Рис. 2. Архитектура свёрточной нейросети в общем виде (LeCun et al., 1995)

Fig. 2. General architecture of a convolutional neural network (LeCun et al., 1995)

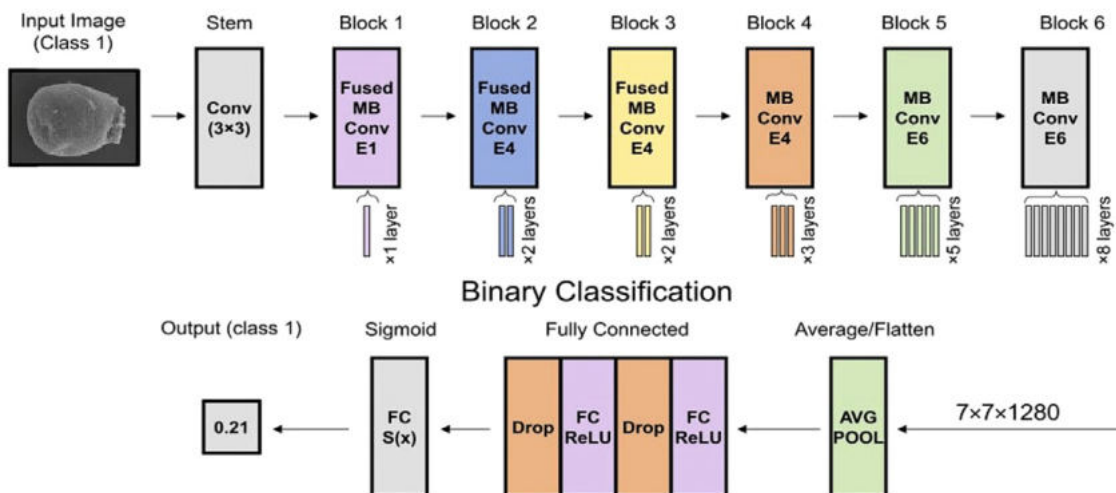


Рис. 3. Архитектура нейронной сети EfficientNetV2B0

Fig. 3. Architecture of the neural network EfficientNetV2B0

Таблица 1. Конфигурация EfficientNetV2B0

Table 1. EfficientNetV2B0 configuration

Этап // Stage	Блоки / Blocks	К. выхода / Outputs
Stem	Conv3x3	32
Стадия 1 / Stage 1	Fused-MBConv	16
Стадия 2 / Stage 2	Fused-MBConv	32
Стадия 3 / Stage 3	Fused-MBConv	48
Стадия 4 / Stage 4	MBConv	96
Стадия 5 / Stage 4	MBConv	112
Стадия 6 / Stage 6	MBConv	192
Классификация / Classification	Conv1x1, Global Pooling, FC	1280

Таблица 2. Отчет классификации оценочных данных

Table 2. Validation data classification report

Название класса Name of class	Количество изображений в классе Number of images in class	Распознано верно Recognized correctly	Распознано неверно Recognized incorrectly	Точность Accuracy
Хитинозои Chitinozoans	737	729	8	99 %
Нехитинозои Non-chitinozoans	876	862	14	98.4 %

Таблица 3. Точность распознавания по классам на тестовом наборе данных

Table 3. Recognition accuracy by classes on the test data set

Название класса / Name of class	Количество изображений в классе Number of images in class	Точность / Accuracy
Хитинозои / Chitinozoans	239	98.9 %
Нехитинозои / Non-chitinozoans	294	98.4 %

Для реализации обучения и распознавания использовались: IDE Visual Studio Code 1.90.2, язык программирования Python 3.11.6, платформа Kaggle Code. Исходные размеры используемых изображений не являются важными для распознавания, так как перед подачей на вход нейросети они приводятся к единому размеру. Количество извлекаемых характеристик или признаков соответствует количеству выходных фильтров каждого блока модели. В данной модели их от 16 до 1280 (табл. 1)

По результатам обработки и классификации изображений из проверочных и оценочных данных была проведена оценка эффективности (табл. 2).

По отчету о классификации данных можно сделать вывод, что модель чуть хуже классифицирует хитинозои по сравнению с нехитинозоями. Это может указывать на то, что класс изображений хитинозой визуально менее разнообразен, чем класс нехитинозой, но так как в каждом классе достаточно большое количество изображений, ошибка очень мала, а точность модели составляет 98 %.

На конечном этапе проводилась оценка точности работы системы с использованием тестового набора данных, не участвовавших в обучении нейронной сети (табл. 3).

Высокая точность достигается благодаря большому количеству параметров модели нейронной сети и достаточному количеству изображений для обучения — 4826.

Ошибочные определения хитинозой как нехитинозой связаны с ограничением самих нейросетей и зависимостью от выбора обучающих данных (рис. 4).

Данные изображения хитинозой (на рис. 4) не были определены как хитинозои, так как на них при-

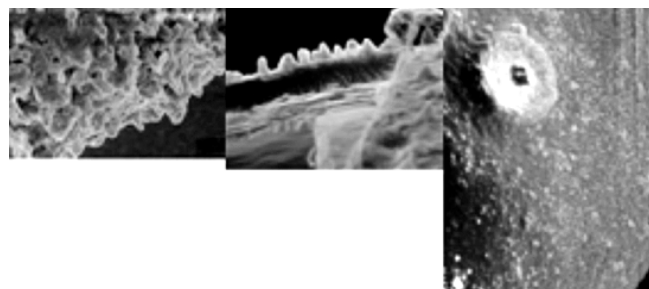


Рис. 4. Хитинозои, определенные как нехитинозои

Fig. 4. Chitinozoans defined as non-chitinozoans

сутствует только часть исходного изображения. Из-за ограничений нейронной сети в формате входных данных она работает с изображениями строго размером 224 на 224 пикселя. Изображения меньшего размера дополняются цветами соседних пикселей, которые на большинстве изображений представлены чёрным или серым. Изображения большего размера обрезаются, из-за чего нейронная сеть ошибочно относит их к другому классу. Данная проблема может быть решена путём уменьшения разрешения исходного изображения.

Выводы

Современные нейронные сети применяются для распознавания изображений в разных областях фундаментальных и прикладных наук (Гусев, 2017; Журавлев, Груздев, 2024; Gorur et al., 2023; Marmo et al., 2006; Ruikar, Agrawal, 2019; White, 2020) и впервые были использованы для распознавания изображений хитинозой.



Создание инновационного решения, которое интегрирует передовые методы компьютерного зрения и машинного обучения для автоматизированного распознавания изображений микрофоссилий на примере хитинозой, на первом этапе показало хорошие результаты. Эффективность разработанных методов была подтверждена на тестовом наборе данных. Тестирование показало высокую точность алгоритма распознавания, равную 98 %.

Продолжение работ по созданию системы анализа изображений и определения хитинозой включает следующие этапы.

После решения задачи определения объекта и отнесения его к классу хитинозой потребуются отнесение изображений выбранных хитинозой к одному из трех семейств. Следующим этапом будет отнесение изображения к подсемейству, а затем и к роду. Финальный этап применения нейросетей предполагает автоматизированное определение изображения до вида и решение задачи анализа изображений неполных (поврежденных, деформированных) везикул хитинозой. Для данных преобразований потребуются применение не только сверточной сети (CNN), но и генеративно-сопоставительной сети (GAN) для воссоздания отсутствующих фрагментов везикулы.

Авторы выражают глубокую признательность Г. Р. Шахматовой за разработку методики и ценные замечания к статье.

Публикация выполнена по государственной программе FMRS-2022-0010 «Фундаментальные исследования. Основные события фанерозоя: палеонтология, стратиграфия, корреляция».

Литература/ References

- Гусев А. В. Перспективы нейронных сетей и глубокого машинного обучения в создании решений для здравоохранения // Искусственный интеллект в здравоохранении. 2017. № 3. С. 92—105. URL: https://www.researchgate.net/publication/337923586_Perspektivy_nejronnyh_setej_i_glubokogo_masinnogo_obucenia_v_sozdanii_resej_dla_zdravoohranenia
- Gusev A. V. Prospects of neural networks and deep machine learning in creating solutions for healthcare. Artificial Intelligence in healthcare. 2017, No. 3, pp. 92—105. (in Russian)
- Журавлев А. В., Груздев Д. А. Анализ изображений шлифов карбонатных обломочных пород с помощью систем

на основе искусственного интеллекта // Вестник геонаук. 2024. 6 (354). С. 28—31. DOI: 10.19110/geov.2024.6.3

Zhuravlev A. V., Gruzdev D. A. Analysis of images of thin sections of carbonate clastic rocks using artificial intelligence-based systems. Vestnik of Geosciences, 2024, 6 (354), pp. 28—31. DOI: 10.19110/geov.2024.6.3 (in Russian)

EfficientNetV2. URL: <https://github.com/google/automl/tree/master/efficientnetv2> (дата обращения: 11.08.2024)

Gardner K., Joshi R., Kashem M., Pham T., Lu Q., Li W. Label free identification of different cancer cells using deep learning-based image analysis // AIP Publishing 2023, Volume 1, Issue 2 <https://doi.org/10.1063/5.0141730>

Gorur K., Ozer C. K., Ozer I., Karaca A. C., Cetin O., Kocak I. Species-Level Microfossil Prediction for Globotruncana genus Using Machine Learning Models // Arabian Journal for Science and Engineering (2023) 48: P. 1315—1332. <https://doi.org/10.1007/s13369-022-06822-5>

LeCun Y., Jackel L., Bottou L., Brunot A., Cortes C., Denker J., Drucker H., Guyon I., Müller U., Sackinger E., Simard P., Vapnik V. Comparison of Learning Algorithms for Handwritten Digit Recognition // International Conference on Artificial Neural Networks, 1995. P. 53—60.

Marmo R., Amodio S., Cantoni V. 2006 Microfossils shape classification using a set of width values // 18th International Conference on Pattern Recognition, 2006. ICPR 2006 Volume: 1 DOI: 10.1109/ICPR.2006.797

Paris F. (2006). Chitinozoans: A fascinating and mysterious microfossil-group. Technical-card and direction for use. 81 p. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2462.7682>.

Paris F., & Nölvak, J. (1999). Biological interpretation and paleobiodiversity of a cryptic fossil group: The “chitinozoan animal”. Geobios, 32, P. 315—324.

Ruikar T., Agrawal V. L. A Review: Classification of Fossilized Radiolarian image using computational Intelligence Techniques // Journal of Emerging Technologies and Innovative Research February 2019, Volume 6, Issue 2 P. 345—349

Tan M., Quoc V. Le EfficientNetV2: Smaller Models and Faster Training / Proceedings of the 38 th International Conference on Machine Learning, PMLR 139, 2021. — URL: <https://arxiv.org/pdf/2104.00298>

White A., Deep learning in deep time // PNAS — 2020 117 (47) P. 29268—29270: <https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.2020870117>

Поступила в редакцию / Received 16.08.2024

Встреча обогатителей в научной столице Кольского Заполярья (Плаксинские чтения — 2024)

Meeting of ore enrichment specialists in the scientific capital of the Kola Polar region (Plaksin Readings — 2024)

The traditional “Plaksin Readings” conference was held on September 23-27, 2024 in the city of Apatity. The conference brought together representatives of academic and industry science, large mining and processing companies and companies that, meeting the modern needs of Russia in the development of strategic resources, demonstrated a high level of knowledge and professionalism of scientists. The event kept its invariable status of the International Conference, showing attention and respect to representatives of foreign science from China, Myanmar, Uzbekistan, Kazakhstan, Kyrgyzstan. It is significant that the conference was held in the year of the 300th anniversary of the Russian Academy of Sciences.

Научный совет Российской академии наук по проблемам обогащения полезных ископаемых, Институт проблем комплексного освоения недр РАН, Горный институт Кольского научного центра РАН провели Международную конференцию «**Инновационные процессы обогащения и глубокой переработки редкометаллического и горнохимического сырья и комплексных руд цветных и черных металлов**» (Плаксинские чтения — 2024).

В работе конференции участвовали 175 представителей из 59 организаций, в том числе 22 академи-

ческих и отраслевых институтов и 10 вузов, 27 крупных горно-обогатительных компаний. В пленарном заседании и работе секций приняли участие 2 академика и 3 члена-корреспондента РАН, 28 докторов и 33 кандидата наук.

Отличительной чертой пленарных лекций прошедшей конференции является растущее внимание ученых к проблемам глубокой переработки редкометаллических руд, горно-химического сырья, комплексных руд цветных и черных металлов. Наряду с решениями, позволяющими получать высокотехнологичные материалы и металлы, были представлены вопросы совершенствования технологий обогащения полезных ископаемых. Одновременно с анализом состояния и развития минерально-сырьевой базы Кольского полуострова анонсирован интенсивно стартующий Африкандский проект освоения месторождения стратегического минерального сырья. Практически все пленарные лекции раскрывают инновационные решения, предлагаемые современной наукой, для дальнейшего тесного сотрудничества ученых и горно-обогатительных предприятий.

После пленарных лекций работа конференции проходила в рамках пяти секций.

1. «*Современные технологические решения в процессах переработки минерального сырья*». В 8 докладах затронуты вопросы моделирования процессов разрушения горных пород, использования в переработке руд экстремальных физических условий и наукоемких и высокотехнологичных методов сепарации, расширения ресурсной базы за счет вовлечения в переработку хвостов обогащения.



Участники международной конференции «Плаксинские чтения — 2024»

Participants of the international conference “Plaksin Readings — 2024”



2. «Технологическая минералогия, рудоподготовка, тонкое и сверхтонкое измельчение минерального сырья» (18 докладов). Работы направлены на развитие методов исследования рудного сырья, способов обесшламливания получаемых минеральных концентратов, проработку методических рекомендаций для оценки свойств измельченных материалов при выборе оптимальных режимов сепарации. Внедряются многофункциональные приборы и технологии испытаний, заимствованные из смежных областей, и их разумное сочетание с традиционными методами минералогического анализа, новыми эффективными способами разупрочнения минералов в руде.

3. На секции «Флотация, гравитация, магнитная и электромагнитная сепарация» заслушано 35 докладов. Традиционно большая часть докладов посвящена поиску новых решений при выборе реагентов и реагентных режимов флотации. Большое внимание уделяется исследованию свойств поверхности материалов, условий протекания процессов на межфазных границах. Предложены новые технологические решения при переработке апатитовых, редкометалльных, медно-никелевых, медно-порфириновых, калийных и других руд для извлечения ценных компонентов (в том числе стратегических металлов).

4. «Комплексная переработка минерального сырья, гидрометаллургические процессы» (20 докладов). Работы посвящены вопросам вовлечения в переработку труднообогатимых руд, промпродуктов и концентратов на основе применения комбинированных технологий, включающих гидрометаллургическую переработку руд и концентратов, изыскание альтернативных источников сырья и технологий.

Следует особо отметить инновационные технологии и оборудование: опытно-промышленную установку для гидро- и электрохлоринации; переработку золотосодержащего сырья тиосульфатными растворителями; процессы органомодификации сапонитов для получения эффективных сорбентов благородных металлов; производство перспективных материалов для критических технологий путем выщелачивания эвдиалитового концентрата. Интерес у участников конференции вызвал обзорный доклад о возможностях применения водорода в технологиях обогащения и металлургии железосодержащего сырья.

5. На секции «Экологические и экономические аспекты процессов переработки техногенного сырья» было заслушано 26 докладов. Рассмотрен широкий спектр проблем, связанных с деятельностью горно-обогатительных предприятий с точки зрения мониторинга, предупреждения, возникновения и снижения экологических и экономических рисков, определяющих условия развития этих предприятий и территорий, на которых они расположены.

Значительная часть докладов была представлена молодыми учеными, что подтверждает преемственность и высокий уровень научных школ в области обогащения полезных ископаемых. По результатам конкурса в рамках конференции шесть молодых ученых награждены за наиболее интересные теоретические



Одна из аналитических лабораторий научно-исследовательского центра (ФИЦ КНЦ РАН)

One of the analytical laboratories of the research center (FRC KSC RAS)

и экспериментальные результаты в области переработки минерального сырья.

В соответствии с поручением Президента РФ В. В. Путина № ПР-1130 от 28.06.2022, постановлением Правительства и Президиума РАН от 11 апреля 2023 г. № 70 по развитию минерально-сырьевой базы, в том числе остродефицитных металлов для высокотехнологической промышленности **конференция посчитала целесообразным:**

- объединить исследования РАН, отраслевых институтов, вузов, инжиниринговых компаний по разработке экологически безопасных технологий извлечения стратегических металлов из комплексных руд сложного вещественного состава, выделения ценного сырья из гидроминеральных и техногенных источников;
- разработать и обеспечить промышленное производство высокоэффективных отечественных флотореагентов, экстрагентов и сорбентов для их применения в технологиях обогащения и селективного извлечения редких, редкоземельных и критических металлов;
- особое внимание уделить развитию синтеза, производства и применения отечественных реагентов различных классов, в том числе с комплексобразующими группировками класса азотсодержащих производных моно- и дикарбоновых кислот, алкилтиокарбаматов при обогащении редких и стратегических металлов, модифицированного поливинилкапролактама, а также флокулянтов и коагулянтов;
- обеспечить создание нового отечественного оборудования для предконцентрации, дезинтеграции и обогащения;
- разработать достоверные методы анализа и экспресс-анализа нетрадиционных форм нахождения редких, редкоземельных и критических металлов и современные методики *in situ* изучения процессов сорбции реагентов, структурно-химических преобразований минералов в условиях физико-химических методов извлечения, растворения и экстракции ценных компонентов;
- обратиться к Минпромторгу с предложением организации работы по аналитическому исследованию потребности России в редких и редкоземельных металлах, прогнозу их производства и разработке программы развития отечественного производства РЗМ;

- рассматривать эффективность переработки и монетизацию горнопромышленных отходов как фактор устойчивого развития горно-металлургических компаний и снижения экологических рисков;

- усилить координацию и консолидацию исследований по разработке технологических процессов комплексного промышленного использования гидроминерального сырья для извлечения ценных компонентов;

- расширить применение методов моделирования и искусственного интеллекта для совершенствования технологии обогащения, а также для оценки запасов редких металлов в рудном и техногенном сырье;

- интенсифицировать исследования по природосберегающим технологиям использования уникальных минеральных ресурсов Арктической зоны РФ;

- развивать научные и прикладные исследования в области горной экологии при переработке рудного и техногенного сырья, в том числе по заказам предприятий;

- возобновить работу конгресса обогатителей стран СНГ и проводить его 1 раз в два года;

- провести в 2025 году Международную конференцию «Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья» (Плаксинские чтения — 2025) на площадке Уральского государственного горного университета.



Опытно-промышленная обогатительная установка на территории Научно-исследовательского центра в Апатитах

Experimental industrial enrichment plant on the territory of the Research center in Apatity

Материалы конференции опубликованы в сборнике *Инновационные процессы обогащения и глубокой переработки редкометаллического и горнохимического сырья и комплексных руд цветных и черных металлов: Материалы Международной конференции. Апатиты: Изд-во ФИЦ КНЦ РАН. 565 с. DOI: 10.37614/978-5-91137-523-2.*

д. г.-м. н. О. Б. Котова

Памяти Владимира Степановича Цыганко (13.02.1938—28.09.2024)

In the memory of Vladimir Stepanovich Tsyganko (13.02.1938—28.09.2024)

On September 28, Vladimir Stepanovich Tsyganko, a veteran of the Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, an outstanding specialist in the field of paleontology and stratigraphy of the Paleozoic of the Urals and European Northeast of Russia, passed away at the age of 86 after a long illness. Vladimir Stepanovich's scientific activity focused on Devonian stratigraphy and rugose corals of the Timan-North Ural and Paj-Khoi regions. He published about 300 scientific works and described a number of new coral taxa (one order, two families, one subfamily, nine genera and 25 species). The results of his stratigraphic studies are widely used in the practice of geological mapping and geological exploration, and are also reflected in the unified and correlation stratigraphic schemes of the Russian plate and the Urals. His passing is a great loss to the scientific community, but his legacy will live on through his work and research.

С глубоким прискорбием сообщаем, что 28 сентября на 87-м году жизни после продолжительной болезни скончался ветеран Института геологии, доктор геолого-минералогических наук Владимир Степанович Цыганко — выдающийся специалист в области пале-



онтологии и стратиграфии палеозоя Урала и Европейского Северо-Востока России, почетный член Всероссийского палеонтологического общества.

Владимир Степанович родился 13 февраля 1938 года в г. Гуляйполе. В 1962 году он успешно окончил геологический факультет Киевского государственного университета и уже в августе этого года по распределению прибыл в Институт геологии Коми филиала



Дождливое поле на р. Щугор, 1963 г.

During the rainy field work on the Shchugor River, 1963



На р. Лядгей-Яха. Рядом лаборант Л. Морохина и рабочий Лёня, 1974 г.

On the Lyadghey-Yaha River. Laboratory assistant L. Morokhina and worker Lyonya near Vladimir, 1974

Академии наук СССР в Сыктывкаре, где трудился вплоть до выхода на пенсию в феврале 2018 года. За время своей научной карьеры Владимир Степанович прошел большой путь от старшего лаборанта до ведущего научного сотрудника. С 1991 по 2008 год он возглавлял лабораторию стратиграфии.

В 1974 году в Ленинградском горном институте В. С. Цыганко защитил кандидатскую диссертацию, посвященную девонским тетракораллам западного склона севера Урала и Пай-Хоя. В 2011 году получил звание доктора геол.-мин. наук, представив диссертацию «Девон западного склона севера Урала и Пай-Хоя (стратиграфия, принципы расчленения, корреляция)» в Институте геологии Коми НЦ УрО РАН.

За свою долгую карьеру Владимир Степанович опубликовал около 300 научных трудов, которые внесли значительный вклад в развитие стратиграфии и палеонтологии девона западного склона Урала и Пай-Хоя. Он проделал огромную работу по изучению строения всего комплекса девонских отложений региона, что привело к уточнению объёмов и границ целого ряда местных и региональных стратиграфических подразделений. Им было выделено и описано 17 новых свит и горизонтов. Результаты исследований В. С. Цыганко широко используются в практике геолого-съёмочных и геолого-разведочных работ, а также отражены в унифицированных и корреляционных стратиграфических схемах Русской плиты и Урала. Владимир Степанович впервые произвел систематическое изучение и монографическое описание 117 видов кораллов ругоз из разрезов девона Тимана и севера Урала, в том числе установил целый ряд новых таксонов (один отряд, два

семейства, одно подсемейство, девять родов и 25 видов).

В. С. Цыганко принимал активное участие в проведении и организации научных мероприятий. Он был инициатором всесоюзных, всероссийских и международных стратиграфических совещаний, конференций и полевых экскурсий в Республике Коми. Под его руководством были проведены глубокие исследования по темам Института геологии и программам Президиума РАН. В процессе своей научной деятельности Владимир Степанович принимал активное участие в подготовке геологических кадров в качестве руководителя аспирантов и студентов на стадии выполнения выпускных квалификационных работ.



На выездном заседании Президиума АН СССР. Слева направо: академики Н. П. Юшкин и Б. С. Соколов, д. г.-м. н. М. В. Фишман, д. г.-м. н. В. А. Дедеев, к. г.-м. н. В. С. Цыганко. Свердловск, 1987 г.

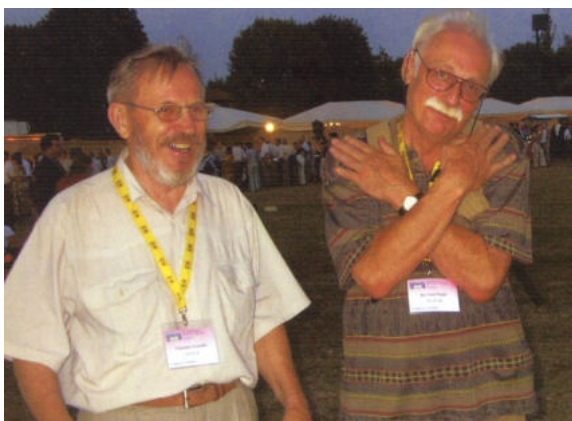
At the session of the Presidium of the Academy of Sciences of the USSR. From left to right: Academicians N. P. Yushkin and B. S. Sokolov, D. Sc. I. V. Fishman, D. Sc. V. A. Dedeev, Cond. Sc V. S. Tsyganko. Sverdlovsk, 1987



Сплав по реке Пижма, Средний Тиман, 1997 г.
Rafting on the Pizhma River, Middle Timan, 1997



Рабочие моменты с аспирантом В. Ю. Лукиным, 1998 г.
Working moments with postgraduate student V. Yu. Lukin, 1998



В. С. Цыганко и профессор П. Бултинк на геологическом конгрессе во Флоренции. Италия, 2004 г.
V. S. Tsyganko and Prof. P. Bultynck at the Geological Congress in Florence. Italy, 2004

Редакторы издательства:
О. В. Габова, К. В. Ордин (английский)

Компьютерная верстка
А. Ю. Перетягина

Свид. о рег. средства массовой информации ПИ № ФС77-75435 от 19.04.2019, выданное Роскомнадзором. Отпечатано: 31.10.2024. Формат бумаги 60 × 84 1/8. Печать RISO. Усл. п. л. 6.5. Тираж 140. Заказ 1231. Учредитель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук» (ФИЦ Коми НЦ УрО РАН). Редакция, издательство, типография: издательско-информационный отдел Института геологии имени академика Н. П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук» (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН).

Адрес: 167982, Республика Коми, Сыктывкар, Первомайская, 54. Тел.: (8212) 24-51-60. Эл. почта: vestnik@geo.komisc.ru
На обложке использованы фото П. Безносова, А. Перетягина, Н. Уляшевой, А. Иевлева, Н. Сокириной



Владимир Степанович празднует 80-летний юбилей, 2018 г.

Vladimir Stepanovich celebrates his 80th birthday, 2018

Заслуги Владимира Степановича были отмечены почётными грамотами Российской академии наук (1974, 2016) и профсоюза РАН (1988), почётной грамотой Республики Коми (1998). Он был награждён медалью «100 лет профсоюзам России» (2005), почётной грамотой Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Коми (2008), медалью «Ветеран КНЦ» (2008). Кроме того, Владимир Степанович получил благодарственное письмо от Главы Республики Коми (2013), почётную грамоту Уральского отделения РАН (2013) и благодарность от КНЦ УрО РАН (2014). Ему были присвоены звания «Заслуженный работник Республики Коми» (2008), «Почётный разведчик недр» (2014), «Почетный ветеран УрО РАН» (2017) и «Почетный деятель науки Республики Коми» (2018).

Уход В. С. Цыганко — большая потеря для научного сообщества, но наследие Владимира Степановича будет продолжать жить в его трудах. Научные достижения В. С. Цыганко служат примером преданности своему делу и стремления к постоянному развитию в своей области. Его работы продолжают вдохновлять молодых учёных и исследователей, напоминая о важности непрерывного обучения и самосовершенствования.

к. г.-м. н. А. Н. Плотыцын