



# *Vestnik of Geosciences* **Вестник геонаук**

Декабрь  
December  
2023,  
№ 12 (348)

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  
В. А. Каширцев, Новосибирск, Россия  
М. Комак, Любляна, Словения  
С. В. Кривовичев, Санкт-Петербург, Россия  
С. К. Кузнецов, Сыктывкар, 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  
В. Н. Пучков, Екатеринбург, Россия  
Д. Ю. Пушаровский, Москва, Россия  
А. М. Пыстин, Сыктывкар, Россия  
Ш. Сан, Мянъян, Китай  
К. М. Соджа, Гамильтон, Нью-Йорк, США  
О. В. Удоратина, Сыктывкар, Россия  
М. А. Федонкин, Москва, Россия  
А. Г. Шеломенцев, Владивосток, 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. Voytekhevsky, Apatity, Russia  
A. D. Gvishiani, Moscow, Russia  
V. A. Zhemchugova, Moscow, Russia  
A. V. Zhuravlev, Syktyvkar, Russia  
V. A. Kashirtcev, Novosibirsk, Russia  
M. Komac, Ljubljana, Slovenia  
S. V. Krivovichev, St. Petersburg, Russia  
S. K. Kuznetsov, Syktyvkar, 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  
V. N. Puchkov, Yekaterinburg, 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, Vladivostok, 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 (2022) — 0.324



## 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 (2022) — 0.324

[geo.komisc.ru/vestnik](http://geo.komisc.ru/vestnik)

## Содержание

## Content

### Научные статьи

### Scientific articles

Формации каменноугольно-нижнепермских карбонатных отложений бассейна верхней Печоры (Северный Урал) А. Н. Сандула .....4	Formations of the Carboniferous-Lower Permian carbonate deposits of the Upper Pechora basin (Northern Urals) A. N. Sandula.....4
Строматолиты в верхневизейских отложениях разреза «Пача-Ласта» (р. Илыч, Северный Урал) А. Н. Шадрин, Р. М. Иванова, Е. С. Пономаренко .....16	Stromatolites in the Upper Visean sediments of the Pacha-Lasta section (Ilych River, Northern Urals) A. N. Shadrin, R. M. Ivanova, E. S. Ponomarenko.....16
Строматолиты из нового местонахождения на Среднем Тимане: их морфологические и структурные особенности Е. В. Антропова .....24	A new location of stromatolites in the Middle Timan: their morphological and structural features E. V. Antropova .....24
Позднедевонская плюмовая Цилемская дайка (Средний Тиман): обоснование геодинамической природы и возраста А. С. Шуйский, К. В. Куликова, О. В. Удоратина, В. А. Лебедев.....30	Late Devonian plume Tsilemsky dyke (Middle Timan): composition and K-Ar age A. S. Shuisky, K. V. Kulikova, O. V. Udoratina, V. A. Lebedev .....30
Об относительной роли сил динамического давления и вязких напряжений в тектонически активных переходных зонах Земли С. В. Гаврилов, А. Л. Харитонов .....37	Relative role of dynamic pressure forces and viscous stresses in tectonically active transition zones of the Earth S. V. Gavrilov, A. L. Kharitonov .....37
Окисление керогена горючих сланцев перманганатом калия в щелочной среде Н. С. Бурдельная, Я. Д. Сенникова, Д. А. Бушнев .....45	Oxidation of oil shale kerogen by potassium permanganate in alkaline environment N. S. Burdelnaya, Ya. D. Sennikova, D. A. Bushnev.....45

### Хроника, события, факты. История науки

### Chronicle, events, facts. History of Science

XVIII Геологический съезд Республики Коми «Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-Востока России» (10–12 апреля 2024 г.) .....55	The 18th Geological Congress of the Komi Republic Geology and Mineral Resources of the European North-East of Russia (April 10–12, 2024) .....55
Российская научная конференция «Геохимия и петрография угля, горючих сланцев и битуминозных пород» (2–5 октября 2023 г.) .....56	Russian scientific conference “Geochemistry and petrography of coal, oil shales and bituminous rocks” (October 2–5, 2023) .....56
Указатель материалов, опубликованных в Вестнике геонаук в 2023 г. ....57	Index of publications in Vestnik of Geosciences in 2023.....57

Правила  
оформления  
статей



Vestnik  
article  
Formatting





# С НОВЫМ, 2024 ГОДОМ!



*ДОРОГИЕ КОЛЛЕГИ И ДРУЗЬЯ!*

*Мне доставляет огромное удовольствие поздравить всех вас – преданных друзей и читателей нашего журнала «Вестник геонаук» с Новым, 2024 годом. Словами поздравления и благодарности я обращаюсь к нашим авторитетным членам редакционного совета, талантливым авторам, безупречно объективным рецензентам, дружному коллективу редакции.*

*Всем желаю удачного года, здоровья, новых успехов, исполнения задуманных планов! Мы продолжим нашу работу с ещё большим вдохновением!*

*Главный редактор журнала «Вестник геонаук»  
академик А. М. Асхабов*

*DEAR COLLEAGUES AND FRIENDS!*

*I am greatly pleased to congratulate all of you – devout friends and readers of our Vestnik of Geosciences journal, on New Year 2024. My words of congratulations and gratitude are addressed to our authoritative members of the editorial board, talented authors, perfectly impartial reviewers, and friendly editorial staff.*

*I wish everyone a successful year, health, new successes, and fulfillment of your plans. We will continue our work with even greater inspiration!*

*Chief Editor at Vestnik of Geosciences  
Academician A. M. Askhabov*







## Обзорная статья / Review article

УДК 551.263.036(282.042—282.247.11):551.735.1/551.736.1

DOI: 10.19110/geov.2023.12.1

**Формации каменноугольно-нижнепермских карбонатных отложений бассейна верхней Печоры (Северный Урал)****А. Н. Сандула**

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

В работе представлены результаты формационного анализа визейско-ассельских карбонатных отложений, развитых в бассейне верхней Печоры\*. Обобщена история накопления каменноугольно-нижнепермских отложений Северного Урала и приводится сопоставление с другими разновозрастными отложениями, распространенными в более северных районах западного склона Урала. Рассмотрена история палеогеодинамического развития Печорского Урала\*\* в пределах территорий бассейнов верхней Печоры, нижнего и среднего течения р. Щугор, южной части гряды Чернышева. На основании полученных результатов сделан вывод о существовании на протяжении визейско-ассельского времени Верхнепечорского палеобассейна, геологическое развитие которого происходило в течение трех этапов, отвечающих времени формирования трёх трансгрессивно-регрессивных циклов: визейско-серпуховского, башкирско-московского, позднекаменноугольно-раннепермского. Выделенные в составе верхневизейско-ассельских отложений бассейна верхней Печоры литологические комплексы относятся к формациям из семейства платамовых и калейдовых, которые в визейско-ассельском разрезе образуют троекратное чередование.

**Ключевые слова:** геологические формации, карбонатные отложения, нижний карбон – нижняя пермь, Северный Урал.

**Formations of the Carboniferous-Lower Permian carbonate deposits of the Upper Pechora basin (Northern Urals)****A. N. Sandula**

Institute of Geology, FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar

The Upper Pechora basin is part of the northeastern margin of the European Platform. In the Paleozoic, it was located within the carbonate shelf of the passive continental margin. According to A. I. Eliseev, Visean terrigenous-carbonate (platomovy type) and Upper Visean-Lower Artinskian carbonate (kaleydivy type) formations occupy the upper part of the final sedimentation cycle of the formations row. According to new data, the history of the geological development of the Upper Pechora basin of the Late Visean-Asselian period has significant differences. Four types can be distinguished in the structure of sediments according to the composition of rocks: siliceous-clay-limestone, limestone, dolomite-limestone, siliceous-limestone. They were formed during three stages respective to the time of formation of three transgressive-regressive cycles: the Visean-Serpukhovian, Bashkirian-Moscovian, Upper Carboniferous-Lower Permian. The studied deposits are divided into lithological complexes: siliceous-clay-carbonate of open sea (Tulian), siliceous-carbonate of open sea (Aleksinian-Early Mikhailovian, Bashkirian-Early Moscovian, Kasimovian-Middle Gzhelian), carbonate of shallow-shallow (Late Mikhailovian-Protvinian, Moscovian), and also the Late Gzhelian-Asselian shallow-depression (siliceous-limestone, limestone, clay-limestone). Lithological complexes, formed in open-sea conditions, belong to formations from the platomovy type and in shallow-shallow conditions – to formations from the kaleydivy type (by Eliseev, 2008).

**Keywords:** geological formations, carbonate deposits, Lower Carboniferous – Lower Permian, Northern Urals.

**Введение**

Учение о геологических формациях является продуктивным при реконструкциях современных и древних тектонических структур, истории их становления

и динамики развития, а также успешно применяется при геологической интерпретации сейсмических трансектов платформенных областей и их континент-

\* Бассейн верхней Печоры — территория западного склона Северного Урала, ограниченная бассейном р. Уньи на юге и бассейном среднего и нижнего течений р. Илыч на севере.

\*\* Печорский Урал — территория западного склона Северного и Приполярного Урала, расположенная в бассейне р. Печоры и ее притоков от р. Уньи на юге до р. Усы на севере.





тальных окраин (Хераскова, 2020). Примером удачного применения методов формационного анализа являются результаты, полученные А. И. Елисеевым (Елисеев, 1978, 2008 и др.). Ему удалось выявить закономерности строения палеозойских пассивных континентальных окраин (северо-восточное ограничение Европейской платформы, западное ограничение Североамериканского континента и др.). В пределах пассивных континентальных окраин выделяются две структурно-формационные зоны, отвечающие шельфу и батимальной части бассейна. На шельфе образовывался формационный ряд, в котором наблюдалось неоднократное повторение триады формаций из семейств фалаховых (терригенных олигомиктовых), платамовых (терригенно-карбонатных, открытоморских) и калейдовых (карбонатных, закрытоморских); в батии — ряд, в котором формации из семейства палиноровых (известняково-алевролитово-глинистые, рифтогенные) сменяются толеровыми (кремнисто-глинисто-сланцевыми или черносланцевыми пассивной (зрелой) океанической стадии) и флишевыми (терригенной и карбонатно-терригенной коллизионными).

Формации каменноугольно-нижнепермских карбонатных отложений западного склона Печорского Урала завершают формационный ряд Елецкой структурно-формационной зоны северо-восточного ограничения Европейской платформы (шельф пассивной окраины) (рис. 1, б): визейская терригенно-карбонатная (платамовая) формация, образованная на рампе после глубокой ранневизейской регрессии; верхневизейско-нижнеартинская карбонатная (калейдовая) формация мелководного шельфа, на всем протяжении которого располагались отмельные и депрессионные области (Елисеев, 1978). Согласно представлениям А. И. Елисеева, эти формации образуют трансгрессивную последовательность на визейско-нижнеартинском этапе, предшествующем формированию Предуральского краевого прогиба.

Нужно заметить, что данные построения более справедливы для северной части Елецкой СФЗ, так как основная доля фактического материала А. И. Елисеевым была получена именно в этом районе. В ходе изучения каменноугольно-нижнепермских карбонатных отложений на Печорском Урале в бассейне верхней Печоры автором выявлены существенные их отличия от более северных районов Урала. Представление установленных отличий состава породных ассоциаций, обстановок осадконакопления и палеогеодинамических условий и является целью данной работы.

### **Фактический материал**

В основу данной статьи положены результаты исследований каменноугольно-нижнепермских карбонатных отложений, проведенных автором начиная с 2002 г. Основной фактический материал был получен во время полевых работ в бассейне верхней Печоры по берегам рек Унья, М. Печора, Илыч (рис. 1, а). Также были собраны дополнительные данные в разрезах среднего и нижнего течения р. Шугор и на гряде Чернышёва (реки Изъя, Кыньбужья, Шарью). Кроме того, были привлечены материалы из коллекции А. И. Елисеева (полевые описания, петрографические шлифы).

### **Стадиально-парагенетический метод формационного анализа**

Для исследований были использованы принципы стадиально-парагенетического метода формационного анализа. Этот метод был предложен А. И. Елисеевым и основан на опыте многолетних исследований (Елисеев, 2008 и др.). В его основу были положены представления о формациях как о парагенезе пород (Шатский, 1965; Херасков, 1967), составными частями которых являются элементарные породные ассоциации и градации (Хворова, 1963). В чистом виде данный метод не укладывается ни в одно из существующих направлений, но учитывает аспекты разных направлений в учении о формациях — парагенетического, стадиально-тектонического и в некоторой степени генетического.

Основные определения стадиально-парагенетического метода формационного анализа (Елисеев, 2008):

*осадочная формация* — это парагенез пород или, чаще, ассоциаций пород, отличающийся своим составом и строением от смежных парагенезов и являющийся вещественным выражением определенной стадии развития крупной палеотектонической зоны;

*ассоциация породная* — литологический комплекс или сочетание горных пород, характеризующееся их определенным набором, особенностями сочетания, стратификацией и в некоторых случаях латеральными изменениями;

*градиация* — часть формации (тип разрезов), отличающаяся от других составом породных ассоциаций, характером строения, а также мощностью отложений.

*субформация\** — градиация или латеральный ряд градиаций, разделяющие формацию на части в вертикальном разрезе.

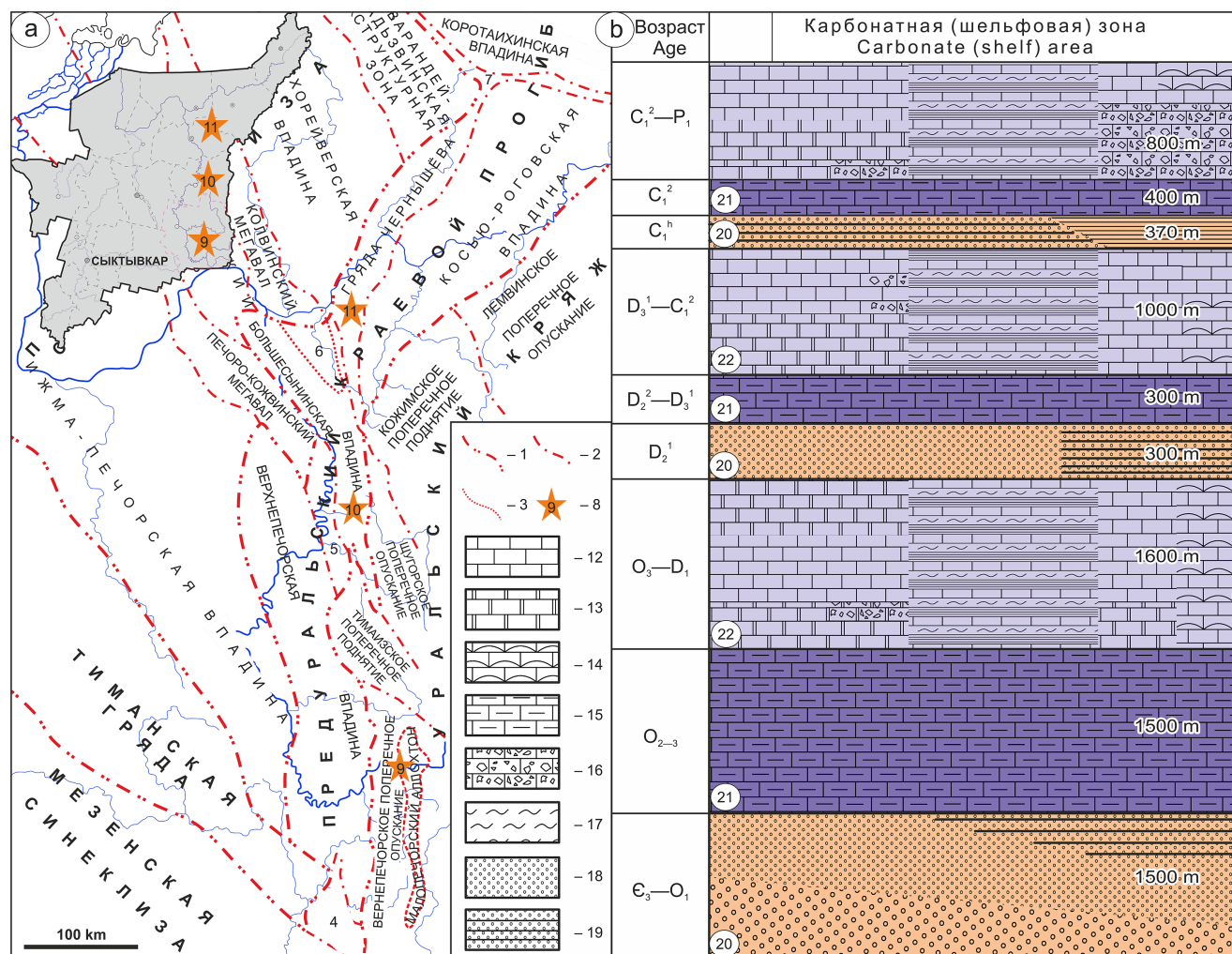
Выделение формаций проходит в несколько этапов. Вначале проводятся сравнение и типизация разрезов на основе изучения парагенезов пород, когда литологические исследования тесно связаны со стратиграфическими. На первой стадии вырисовываются лишь «контуры» формации. Затем начинаются детальное изучение парагенезов пород, выделение породных ассоциаций и градиаций, уточнение объема и границ формаций. На этой стадии главенствующим является установление генетических типов отложений. На заключительном этапе синтезируется весь материал с целью выяснения способа образования формации, положения ее в палеоструктуре района. Таким образом, данный метод предусматривает и литологический, и стратиграфический, и тектонический подходы.

Более подробная последовательность изучения формаций может выглядеть следующим образом (по: Елисеев, 2008; Курбацкая, 2003 в авторской интерпретации):

1) комплексное стратиграфическое, литологическое и минералого-геохимическое исследование отложений опорных разрезов в пределах крупной палеотектонической зоны;

2) эмпирическое установление естественных парагенетических ассоциаций горных пород и образованных ими градиаций (типов разрезов);

\* Введено после детального изучения карбонатных верхнеордовикско-нижнедевонских отложений севера Урала А. И. Антошкиной (Елисеев и др., 2006, стр. 25–39).



**Рис. 1.** Местоположение районов исследований на схеме тектонического районирования (по: Дедеев, 1989 с упрощениями) — а; формационный ряд Елецкой структурно-формационной (шельфовой) зоны (Елисеев, 1978) на Печорском Урале — б

Условные обозначения: 1–3 — границы структур первого (1), второго (2), третьего порядков; 4 — Колчимско-Полюдовское поднятие, 5 — Среднепечорское поднятие; 6 — Нитчемью-Сынинская ступень; 7 — гряда Чернова; 8 — местоположение районов исследований (9 — бассейн верхней Печоры, 10 — р. Щугор, 11 — южная часть гряды Чернышёва); 12 — известняки; 13 — доломиты; 14 — рифогенные известняки; 15 — глинистые известняки; 16 — известняковые брекчии; 17 — кремнистые породы; 18 — терригенные породы; 19 — глинисто-терригенные породы; 20–22 — семейства формаций шельфовой зоны (20 — фалачовые, терригенные олигомиктовые; 21 — платамовые, карбонатные или терригенно-карбонатные; 22 — калейдовские, карбонатные, депрессионно-мелководные)

**Fig. 1.** Location of research areas at the scheme of tectonic zoning by (Dedeev, 1989) with simplifications (a); stack of formations of the Eletsky structure-formation (shelf) zone (Eliseev, 1978) in the Pechora Urals (b)

Legend: 1–3 — boundaries of structures of the first (1), second (2), third orders; 4 — Kolchima-Polyudov uplift, 5 — Middle Pechora uplift; 6 — Nitchemyu-Synya uplift; 7 — Chernov ridge; 8 — location of study areas (9 — Upper Pechora basin, 10 — Shchugor river, 11 — southern part of the Chernyshev ridge); 12 — limestones; 13 — dolomites; 14 — reef limestones; 15 — argillaceous limestones; 16 — limestone breccias; 17 — siliceous rocks; 18 — terrigenous rocks; 19 — argillaceous-terrigenous rocks; 20–22 — families of shelf formations (20 — falachic, terrigenous oligomictic; 21 — platamic, carbonate or terrigenous-carbonate; 22 — kaleidic, carbonate, depression-shallow water)

3) изучение состава, строения и условий образования выявленных парагенезисов;

4) выделение формаций, структурные элементы которых связаны временем образования, общностью состава, строения и условий формирования;

5) выявление закономерностей размещения выделенных формаций (вертикальных и латеральных формационных рядов), их связей с тектоническим режимом;

6) изучение специфики каждой формации: пород-индикаторов, полезных ископаемых, характера вторичных преобразований.

### Литолого-генетические особенности изученных отложений

В общих чертах состав, строение и условия образования визейско-нижнепермских карбонатных отложений, развитых на территории бассейна верхней Печоры, вполне соответствуют основным особенностям визейской терригенно-карбонатной (платамовой) и верхневизейско-нижнеартинской (калейдовой) формаций, выделенных А. И. Елисеевым для всей Елецкой структурно-формационной зоны. Однако при детальном сравнительном анализе отложений проявились существенные отличительные особенности.





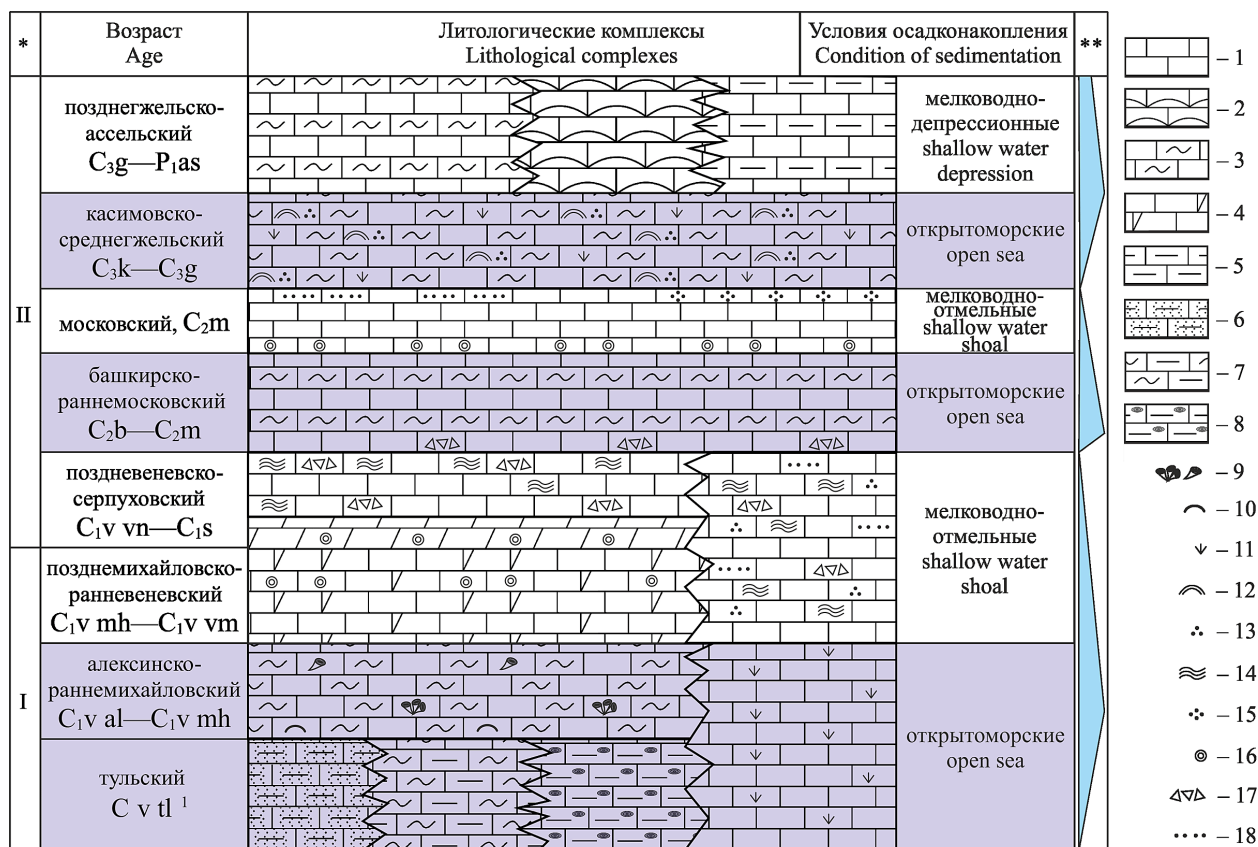
- Разрез верхневизейско-нижнепермских отложений в бассейне р. Уньи по составу и строению во многом схож с шарьюским типом разрезов, развитым на южной части гряды Чернышёва (Елисеев, 1978) и в то же время довольно специфичен. Нижняя его часть — доломитово-известняковая толща веневско-стешевского возраста — отличается от одновозрастных отложений отсутствием карбонатных псефитолитов. В восточных выходах визейско-серпуховских отложений бассейна верхней Печоры развит известняковый тип разреза, образованный в относительно мелководных условиях. Отложения башкирского яруса отличаются присутствием в основании краснополянського горизонта пачки красных аргиллитов в ассоциации с обломочными известняками, а в верхнем башкире — зеленато-серых глинистых известняков (Елисеев и др., 2006, стр. 40—47; Сандула, 2008; Сандула, Шадрин, 2020).

- Изменения условий осадконакопления визейско-нижнепермских отложений бассейна верхней Печоры происходили не только с запада на восток (от континента в море), но и с юга на север. Эта тенденция проявилась еще в визейское время, когда на фоне образования сублиторальных карбонатных отложений на открытом шельфе в центральной части Верхнепечорского бассейна накапливались относительно более глубоководные глинисто-кремнисто-карбонатные осадки (кушковатский тип разреза, р. мал. Печора) (Антошкина и др., 2011, стр. 91—108). Позднее данная особенность проявлялась в формировании областей островного мелководья или отмельных зон в начале и под конец серпуховского века, в каширское и раннемячковское время московского века. Причем их развитие на территории верхней Печоры отмечается локально на севере и юге бассейна. В раннем серпухове область островного мелководья, откуда сносился грубообломочный материал, находилась на севере бассейна (реки Илыч и М. Шайтановка) (Сандула, 2008). В предбашкирское время на севере и юге (реки Илыч и Унья) накапливался мелкообломочный известняковый материал в ассоциации с красноцветными глинами. В то же время в центральной части Верхнепечорского бассейна (р. мал. Печора) господствовали морские условия, способствовавшие отложению криноидно-фораминиферовых осадков (Антошкина и др., 2011, стр. 109—133). В каширских отложениях московского яруса отмельные отложения распространены на юге Верхнепечорского бассейна (р. Унья), наличие их фиксируется в разрезе ассоциацией оолитовых и мелкобиокластовых доломитизированных известняков. В мячковское время на севере (р. Илыч) проявились субаэральные условия осадконакопления, на что указывает присутствие в разрезе пачки (~2.2 м) мелко- и среднебиокластовых водорослевых и микрокодиевых известняков (Сандула, Пономаренко, Шадрин, 2013).

- В строении разреза каменноугольно-нижнепермских отложений наблюдается чередование интервалов, отвечающих открытоморским и мелководно-отмельным условиям осадконакопления (рис. 2) и образующих три трансгрессивно-регрессивных циклита: *визейско-серпуховский, башкирско-московский, верхнекаменноугольно-нижнепермский* (Антошкина и др., 2012; Сандула, 2019; Сандула, Шадрин, 2020). Границы между циклитами литологически четко фиксируются (рис. 3). В основании башкирского яруса залегает пач-

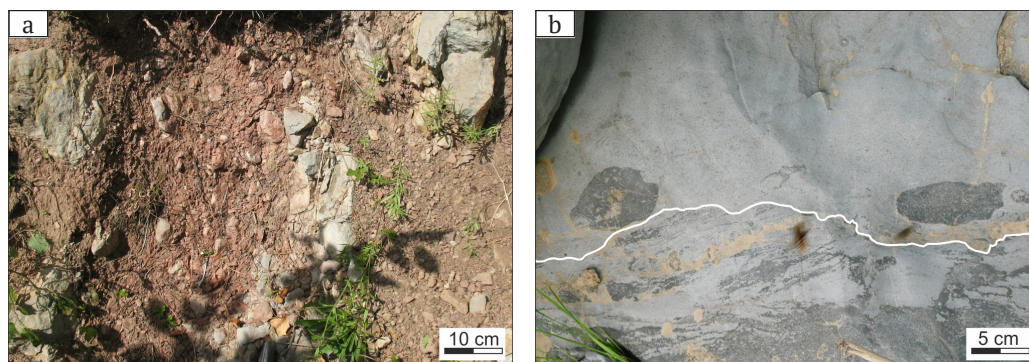
ка (5—8 м) пестроцветных известковых, частично кремненных аргиллитов, содержащих различное количество (20—70 %) разноразмерных известняковых обломков (р. Унья, правый берег выше устья р. Мисюрый, р. Илыч, правый берег выше скалы Лек-Из) (Сандула, 2019). Граница башкирско-московского и верхнекаменноугольно-нижнепермского циклитов фиксируется в разрезе наличием уровней субаэральной экспозиции в отложениях верхней части мячковского горизонта московского яруса (эрозионные врезы и слои с микрокодиевыми образованиями), а также слоев оолитовых известняков и биокластовых известняковых песчаников в основании касимовского яруса (Пономаренко, 2015; Пономаренко, Иванова, 2020). В кровле последнего верхнекаменноугольно-нижнепермского трансгрессивно-регрессивного циклита явные признаки перерывов осадконакопления отсутствуют. По данным Е. С. Пономаренко (2015), в позднегжельское время в восточной зоне бассейна начинает формироваться впадина, по окраине которой уже в позднеассельское время преобладали крайне мелководные условия. Так, в центральной зоне (р. Унья, Бузгальский Камень) была характерна иловая седиментация, куда сносился биокластовый материал с более возвышенных участков морского дна. В восточных районах с ассельского века развивались скелетные холмы (р. Илыч, левая заостровка о. Еремей-Шляпа-Ди; р. мал. Печора, правая заостровка о. Трудник; р. Унья, ск. Чертов Стульчик и Писанный Камень). Такие органические постройки формировались на склоне карбонатных платформ в фотической зоне, около границы базиса действия волн. Скелетные холмы время от времени прекращали свой рост вследствие стрессовых ситуаций и коллапса экосистемы или в результате резких понижений уровня моря, с которыми связано образование стадий деструкции. Также в постройках наблюдается смещение фаций скелетных холмов в западном направлении (Пономаренко, 2015).

- В среднекаменноугольное время на территории Северного, Приполярного Урала и на гряде Чернышева существовали различные условия осадконакопления (рис. 4). На Северном Урале (бассейн верхней Печоры) в начале башкирского века после обширной регрессии устанавливаются пелагические обстановки открытого моря карбонатной платформы. Активизация инверсионных движений способствовала возникновению позднее островных мелководий и отмелей на различных участках шельфа. На Приполярном Урале (бассейн р. Щугор) выделяются три этапа осадконакопления. Первый этап характеризуется довольно резкими колебаниями уровня моря, что проявилось в чередовании слоистых известняков и более массивных карбонатных псефитолитов. Второй (раннемосковский) отличается довольно частыми колебаниями уровня моря, а сам морской бассейн начал дифференцироваться на различные по режиму осадконакопления области: депрессионную на западе (Нижние Ворота) и мелководноморскую на востоке (Верхние Ворота). На третьем (позднемосковском) этапе разделение бассейна полностью состоялось, а циклиты этого времени строились из постепенно нарастающих трансгрессий и таких же регрессий. На западе в депрессионной области накапливались мощные толщи карбонатно-глинистых пород, а на востоке около мелководной области — филлоид-



**Рис. 2.** Литологические комплексы каменноугольно-нижнепермских карбонатных отложений в бассейне верхней Печоры  
Условные обозначения: 1—8 — типы разреза (1 — известняковый, 2 — известняковый (биоцементный, биокластовый), 3 — кремнисто-известняковый, 4 — доломитово-известняковый, 5—8 — глинисто-известняковый (6 — кварцево-песчаный, 7 — кремнистый, 8 — сидерито-конкреционный); 9—16 — органические остатки (9 — кораллы, 10 — брахиоподы, 11 — водоросли, 12 — палеоаплизины, 13 — микробные образования, 14 — строматолиты, 15 — микрокодии); 16 — оолиты; 17, 18 — известняковый литокластовый материал (17 — мелкообломочный, 18 — песчаный). \* — карбонатные формации по А. И. Елисееву (2008): I — визейская платамовая, II — верхневизейско-нижнеартинская калейдовая. \*\* — трансгрессивно-регрессивные циклиты

**Fig. 2.** Lithological complexes of the Carboniferous-Lower Permian carbonate deposits in the Upper Pechora basin  
Legend: 1—8 — types of section (1 — limestone, 2 — limestone (biocement, bioclastic), 3 — siliceous-limestone, 4 — dolomite-limestone, 5—8 — argillaceous-limestone (6 — quartz-sandy, 7 — siliceous, 8 — siderite-concretion); 9—16 — organic remains (9 — corals, 10 — brachiopods, 11 — algae, 12 — paleoaplysines, 13 — microbial formations, 14 — stromatolites, 15 — microcodia); 16 — oolites; 17—18 — limestone lithoclastic material (17 — fine-clastic, 18 — sandy). \* — carbonate formations according to A. I. Eliseev (2008): I — Visean platamic, II — Upper Visean-Lower Artinskian kaleidic. \*\* — transgressive-regressive cyclites



**Рис. 3.** Признаки перерывов осадконакопления на границах седиментационных циклитов:

a — обломки известняков в пачке пестроцветных аргиллитов в основании башкирского яруса (р. Унья, правый берег выше устья р. Мисюрый), b — эрозионное наложение в кровле слоев со скоплениями *Microcodium* в отложениях верхней части мячковского горизонта московского яруса (р. Илыч, правый берег выше устья руч. Молебный)

**Fig. 3.** Evidence of sedimentation breaks at the boundaries of sedimentation cycles:

a — limestone fragments in a band of red-variegated mudstones on the base of the Bashkirian stage (Unya river, the right bank outcrop above the Misyuryai river mouth), b — erosion overlap at the top of *Microcodium* limestone bed in the deposits of the upper part of the Myachkovian horizon of the Moscovian stage (Ilych river, right bank outcrop above the Molebnij creek mouth)



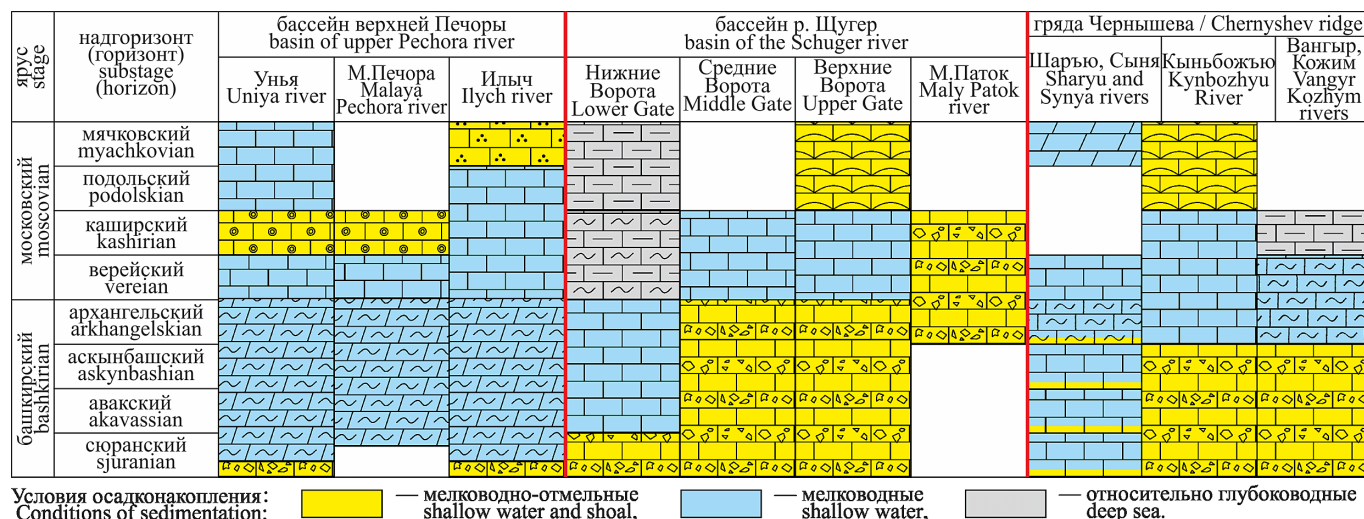


Рис. 4. Строение среднекаменноугольных отложений Печорского Урала. Условные обозначения см. на рис. 1

Fig. 4. Structure of the Middle Carboniferous deposits of the Pechora Urals. See the symbols on Fig. 1

но-водорослевые и водорослево-мшанковые скелетные холмы (Антошкина и др., 2011, стр. 109—133). В истории осадконакопления южной части гряды Чернышева (бассейн р. Шарью) можно выделить четыре этапа (Сандула, 2019; Сандула, Шмелёва, 2022): ко-согорско-аскынбашский, ташастинский, асатаусско-каширский и подольско-мячковский. На первом этапе основания седиментационных циклитов образованы осадками крайнего мелководья (гравелиты, оолитовые известняки), а остальная часть — карбонатными отложениями неритовой области сублиторали открытого шельфа. На втором этапе в строении седиментационных циклитов наблюдается смена активного гидродинамического режима на спокойноводный, основными породообразующими компонентами в породах наряду с биокластами становятся остатки водорослей. На третьем этапе установился стабильный тектонический режим, захоранивались в основном остатки водорослей и микробиальных образований. Позднемосковское время ознаменовало собой обширную регрессию, в результате которой на большей части гряды Чернышева отмечается перерыв осадконакопления. Море сохранилось только на территории южной части района, где отлагались преимущественно биокластово-мшанковые карбонатные осадки и «гидрактиноидные» постройки (Елисеев, 1963). Некоторое углубление бассейна произошло в мячковское время. В результате была подтоплена территория бассейна р. Шарью, где вслед за мшанково-биокластовыми породами была образована известняково-доломитовая толща.

Перечисленные отличия литологического состава, геологического строения и особенностей условий осадконакопления косвенным образом могут свидетельствовать о существовании на территории бассейна верхней Печоры на протяжении визейско-ассельского времени морского палеобассейна (Верхнепечорского), обособленного от более северных территорий.

#### Литологические комплексы визейско-нижнепермских карбонатных отложений

В строении верхневизейско-нижнеартинских отложений бассейна верхней Печоры по составу пород

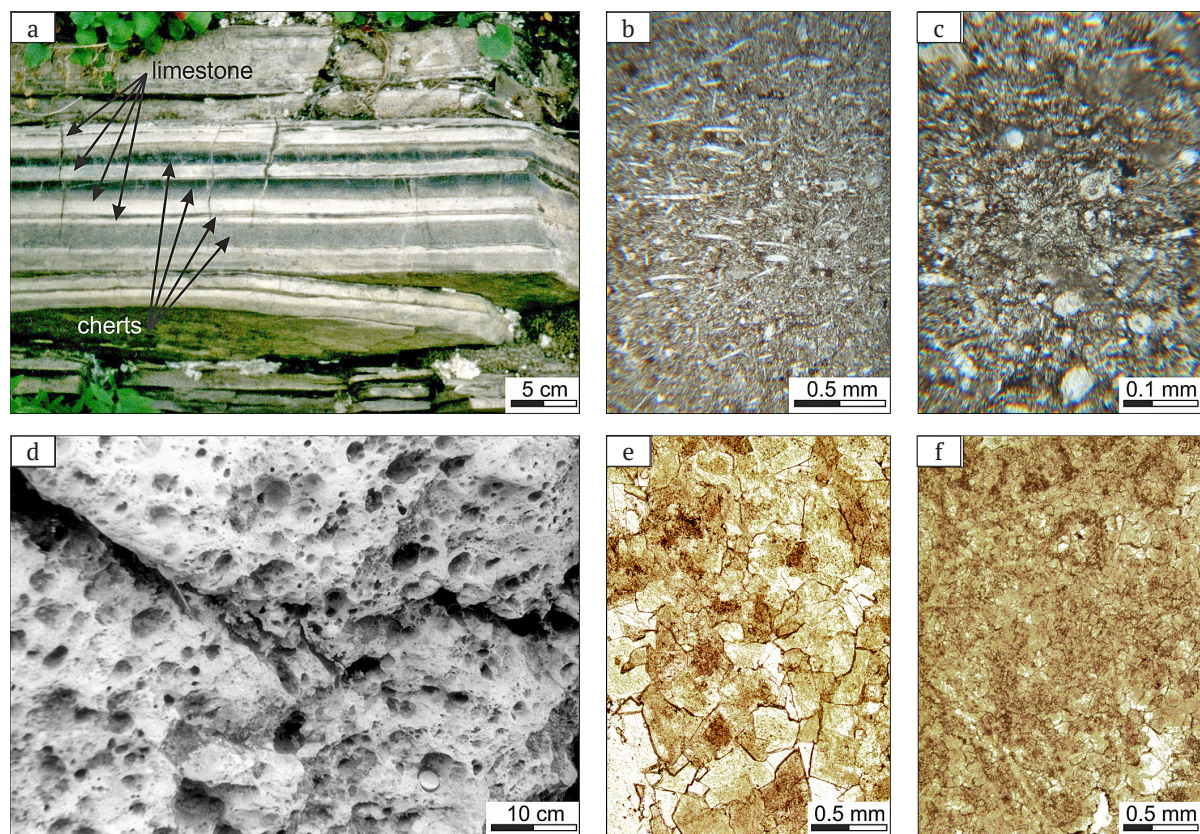
можно выделить четыре типа разрезов: кремнисто-глинисто-известняковый, известняковый, доломитово-известняковый, кремнисто-известняковый. В зависимости от условий осадконакопления каждый из этих типов имеет свои отличительные черты.

*Кремнисто-глинисто-известняковый тип разреза* отмечен только в отложениях тульского возраста, образованных в открытоморских условиях на начальном этапе визейской трансгрессии. В составе отложений этого возраста с запада на восток уменьшается количество терригенного материала: слои кварцевых песчаников с небольшими пластами углей отмечаются только в западной части Верхнепечорского бассейна в разрезе р. Ильч (район Первого кордона Печоро-Ильичского заповедника); в центре бассейна этот тип разреза слагают глинистые известняки с тонкими линзами и прослоями черных кремней (рис. 5, а—с); на востоке среди биокластовых известняков известковые аргиллиты образуют лишь тонкие прослои, а также встречается большое количество сидеритовых конкреций (разрез Патракарием, р. Ильч) (Шадрин, Сандула, 2018).

*Доломитово-известняковый тип разреза* характерен для мелководно-отмельных условий осадконакопления, проявившихся в веневское время визейского века и в ко-согорское время серпуховского века. На большей части бассейна он образован в основном органо-генными карбонатами, часто с косослоистыми текстурами, а в областях островных поднятий и отмелей — доломитизированными биокластовыми, литокластовыми, оолитовыми известняками (рис. 5, d—e) (Антошкина и др., 2011, стр. 91—108).

*Известняковый тип разреза* характерен для крайнего востока Верхнепечорского бассейна в полосе выходов от бассейна р. Кысунья через р. Унья до бассейнов рек Б. Шежым и Шежымью) — отложения визейско-серпуховского возраста (рис. 6). Там он сложен преимущественно водорослево-биокластовыми известняками с редкими включениями кремней, образованных, по всей видимости, в фотической зоне, но ниже уровня действия штормовых волн. Колебания уровня моря в разрезе фиксируются слоями известняковых песчаников, микробиальных образований и строматолитов (Шадрин, Сандула, 2020). Западнее данный





**Рис. 5.** Структурно-текстурные особенности пород кремнисто-глинисто-известнякового (а–с) и доломитово-известнякового (d–f) типов разрезов: а — чередование тонких слоев кремней и известняков тульских отложений (разрез Кушковатка, р. мал. Печора, устье р. М. Шайтановка,  $C_1v$  tl); б — спикуловый известняк (шлиф, обр. СМПК 6,  $C_1v$  tl); с — окремененный мелкобиокластовый известняк (шлиф, обр. СМПК 15,  $C_1v$  tl); d — пористо-кавернозный доломит с реликтовой органогенно-обломочной структурой в нижнесерпуховских отложениях (ск. Белый Мох, р. Унья, 6 км выше устья р. Мисюряй,  $C_1s$ ); е — яснокристаллический доломит (шлиф, обр. 04Ун65/7,  $C_1s$ ); f — доломитизированный биокластовый известняк (шлиф, обр. 04Ун65/18,  $C_1s$ )

**Fig. 5.** Structural and textural features of rocks of siliceous-clay-limestone (a–c) and dolomite-limestone (d–f) types of sections. a — alternating of thin layers of cherts and limestones of the Tulian deposits (Kushkovatka outcrop, Malaya Pechora river, mouth of the Malaya Shaitanovka River); b — spicule limestone (thin section, sample SMPK 6); c — silicified bioclastic wackestone (thin section, sample SMPK 15); d — porous-cavernous dolomite with relic organogenic-detrital structure in the Lower Serpukhovian deposits (Beliy Mokh (White Moss) Crag, Unya River, 6 km above the mouth of the Misyuryai River); e — coarse-crystalline dolomith (thin section, sample 04Un65/7); f — dolomitized bioclastic grainstone (thin section, sample 04Un65/18)

тип разреза формировался преимущественно в мелководно-отмельных условиях (протвинский горизонт серпуховского яруса, московский ярус) или в области развития скелетных холмов (ассельский ярус) (Сандула, Шадрин, Пономаренко, 2013).

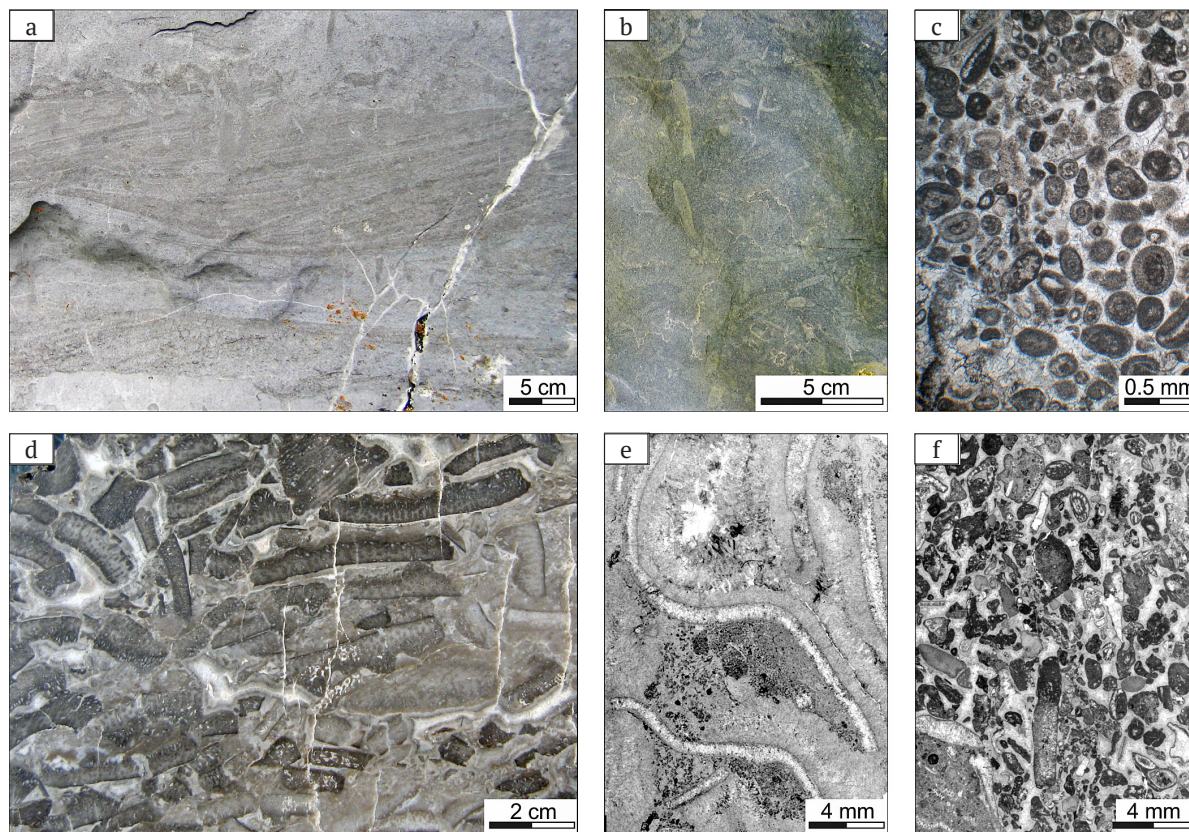
Кремнисто-известняковый тип разреза обычно отвечает открытому условиям осадконакопления алексинско-раннемихайловского, башкирско-раннемосковского и касимовско-среднежельского этапов геологического развития верхней Печоры, когда осаждались преимущественно шламово-биокластовые отложения, обогащенные кремнеземом, палеоаплизинные и водорослевые известняки (рис. 7, а–с). В раннепермское время также формировался данный тип разрезов в зоне накопления карбонатных илов в относительно глубоководных депрессиях перед органогенными постройкиками типа скелетных холмов (рис. 7, d–e) (Антошкина и др., 2011, стр. 134–149; Пономаренко, 2015).

Из анализа вышеизложенного материала следует, что изученные отложения подразделяются на литологические комплексы: кремнисто-глинисто-карбонатный открытому (тульский), кремнисто-карбо-

натные открытому (алексинско-нижнемихайловский, башкирско-нижнемосковский, касимовско-среднежельский), карбонатные мелководно-отмельные (верхнемихайловско-протвинский, московский), а также верхнежельско-ассельский мелководно-депрессивный (кремнисто-известняковый, известняковый, глинисто-известняковый).

Данные литологические комплексы вполне можно было бы выделить в субформации, на примере того, как это было сделано А. И. Антошкиной в карбонатной верхнеордовикско-нижнедевонской формации (Елисеев и др., 2006, стр. 25–39). Однако в таком случае можно получить ряд противоречий: 1) выделенные нами однотипные литологические комплексы входят в состав как в визейской платамовой, так и в верхневизейско-нижнеартинской калейдовой формации (по: Елисеев, 1978); 2) граница между данными формациями не совпадает с границей визейско-серпуховского и башкирско-московского трансгрессивно-регрессивных циклитов; 3) выделенные трансгрессивно-регрессивные циклиты делят калейдовую формацию на три неравные части.





**Рис. 6.** Структурно-текстурные особенности пород известнякового типа разрезов: а — серии косослоистых известняковых песчаников (плёсо Патракарием, правый берег, р. Илыч,  $C_1v$  mh); б — текстуры биотурбации (там же); с — оолитовый известняк (шлиф, обр. 06Ил87/122-1,  $C_1v$  mh); д — палеоаплизиново-биокластовый биоцементолит (пришлифовка, обр. 02У28/6, Писаный Камень, р. Унья,  $P_1as$ ); е — филоидно-водорослевый биоцементолит (шлиф, обр. 02У28/13, Писаный Камень, р. Унья,  $P_1as$ ); ф — литокластово-биокластовый известняковый песчаник (шлиф, обр. П-Ун28/7, Писаный Камень, р. Унья,  $P_1as$ )

**Fig. 6.** Structural and textural features of rocks of the limestone type of sections: а — series of limestone sandstones with cross bedding structures (Pleso Patrakariem, right bank, Ilych river,  $C_1v$  mh); б — bioturbation textures (Pleso Patrakariem, right bank, Ilych River,  $C_1v$  mh); с — oolitic grainstone (thin section, sample 06IL87/122-1,  $C_1v$  mh); д — paleoaplysina bioclastic biocementolite (polished lump, sample 02U28/6, Pisany Kamen` (Written stone), Unya river,  $P_1as$ ); е — phylloid algae biocementolite (thin section, sample 02U28/13, Pisany Kamen` (Written Stone), Unya river,  $P_1as$ ); ф — litho-bioclastic limestone sandstone (thin section, sample P-Un28/7, Pisany Kamen` (Written Stone), Unya river,  $P_1as$ )

Кроме того, литологические комплексы, образованные в открытоморских условиях осадконакопления, по своим литологическим характеристикам и строению вполне соответствуют определению формаций из семейства платамовых\*, а комплексы, образованные в мелководно-отмельных и мелководно-депрессивных условиях, — определению формаций из семейства калейдовых\*\*. При этом каждый из выделенных нами трансгрессивно-регрессивных циклитов образован из последовательной смены отложений платамовых и калейдовых формаций.

Возможно, причина полученных разногласий состоит в том, что северо-восточное ограничение Европей-

ской платформы, на палеозойском этапе развития являвшейся пассивной континентальной окраиной, являлось не единой палеотектонической областью, а было разделено на зоны с различной палеогеодинамикой.

### История палеогеодинамического развития Печорского Урала

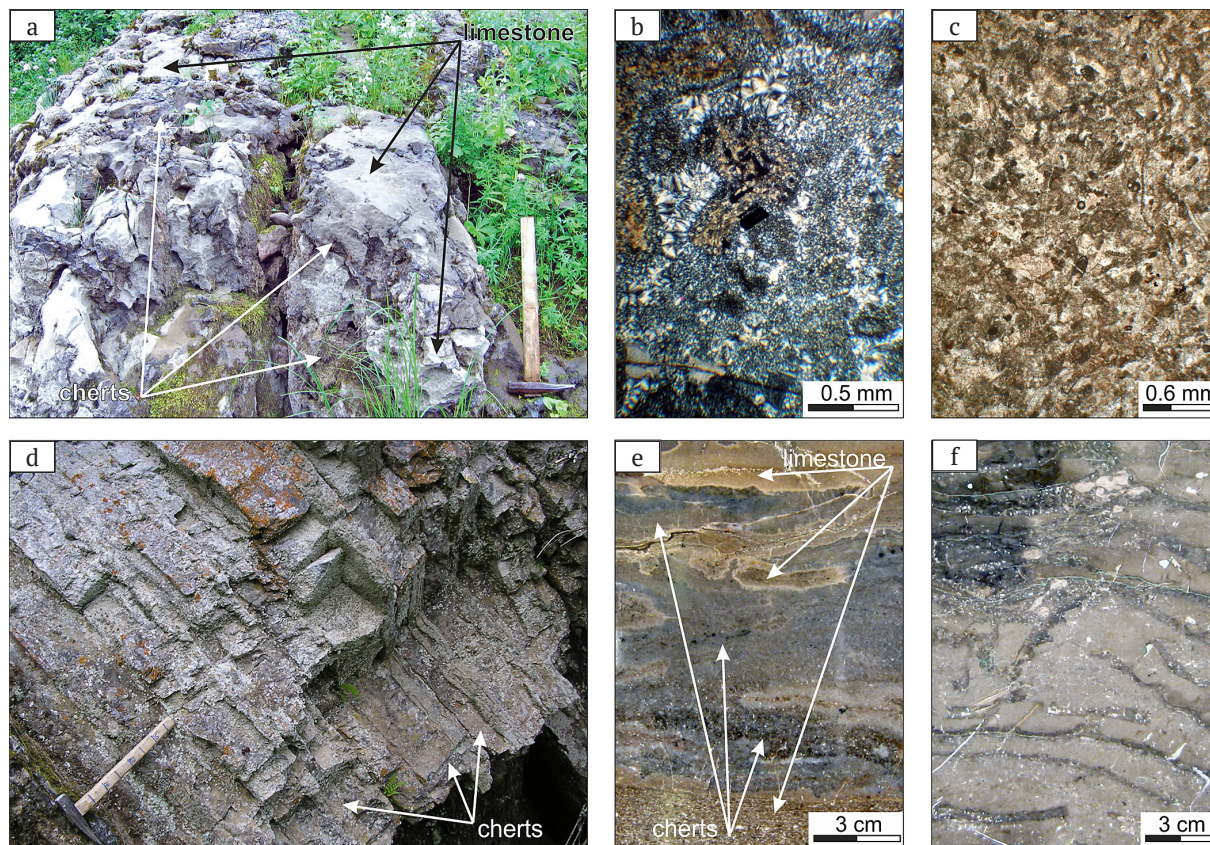
История палеогеодинамического развития Печорского Урала была рассмотрена в трех районах: бассейн верхней Печоры, среднего и нижнего течения р. Шугор и южной части гряды Чернышева (территории, для которых были выявлены различия в эволюции осадконакопления среднекаменноугольной эпохи (Сандула, 2019).

В современном структурном плане данные области находятся в различных тектонических позициях (рис. 1, а). Так, бассейн верхней Печоры располагается в пределах Верхнепечорской поперечной впадины Западной складчатой зоны Урала (ЗСЗУ) между Тимаизским поперечным поднятием на севере и Колчимско-Полюдовским поднятием Предуральяского прогиба (ПрП) и Кваркушко-Каменногорским анти-

\* Платамовые формации (от греческого «платамон» — широкий, плоский камень) — это карбонатные или терригенно-карбонатные формации на континентальной окраине, отвечающие трансгрессивному этапу ее развития и связанные с открытым шельфом (рампой) (Елисеев, 2008, с. 19)

\*\* Калейдовые формации (от греческого «калос» — красивый и «ейдос» — вид) — это карбонатные формации закрытого шельфа, отвечающие регрессивному этапу развития бассейна (Елисеев, 2008, стр. 20)





**Рис. 7.** Структурно-текстурные особенности пород кремнисто-известнякового типа разрезов: а — желваковые выделения кремня в известняках башкирского яруса (скала Лек-из, р. Ильч,  $C_2b$ ); б — структура кремнистого стяжения (шлиф с анализатором, обр. 06Ил56/20кр,  $C_2b$ ); в — мелкобиокластовый известняк, вмещающий стяжения кремня (шлиф, обр. 06Ил56/20,  $C_2b$ ); д — напластование кремнисто-карбонатных отложений ассельского яруса (скала Бузгальский Камень, р. Унья,  $P_1as$ ); е — сильно-окремненный тонкослоистый шламово-биокластовый известняк (пришлифовка, обр. 02Ун24/106,  $P_1as$ ); ф — шламово-биокластовый известняк с тонкими пластинками палеоаплизин (пришлифовка, обр. 02Ун24/90,  $P_1as$ )

**Fig. 7.** Structural and textural features of rocks of the siliceous-limestone type of sections: а — nodular excretions of cherts in limestones of the Bashkirian stage (outcrop Lek-iz, Ilych river,  $C_2b$ ); б — the structure of the chert nodules (thin section, with analyzer, sample 06IL56/20kr,  $C_2b$ ); в — wackestone containing chert nodules (thin section, sample 06IL56/20,  $C_2b$ ); д — bedding of siliceous-carbonate deposits of the Asselian stage (outcrop Buzgalsky Stone, Unya River,  $P_1as$ ); е — highly silicified thin-layered wackestone (polished lump, sample 02Un24/106,  $P_1as$ ); ф — wackestone with thin plates of Paleoplysina (polished lump, sample 02Un24/90,  $P_1as$ )

клинорием Центрально-Уральского поднятия (ЦУП) на юге (Юдин, 1983; Государственная..., 2007). На западе данная область ограничена Верхнепечорской впадиной ПрП, за которой располагаются тиманские структуры. *Бассейн среднего-нижнего течения р. Шугор* располагается на границе центральной части Шугорского поперечного опускания ЗСЗУ и южной оконечности Большесынинской впадины ПрП, граничащей на западе со Среднепечорским поднятием. *Южная часть гряды Чернышева* включает в себя Шарью-Заостренский и Сынинский блоки, приурочена к северной части ПрП и находится в окружении Хорейверской, Косью-Роговской и Большесынинской впадин (Юдин, 1994; Тимонин, 1998).

Указанные различия тектонического строения этих трех областей прослеживаются до поверхности фундамента (Атлас..., 2000). Как можно заметить, бассейны верхней Печоры и Шугора приурочены к зонам впадин ПрП и опусканий ЗСЗУ и отделены друг от друга поднятиями. Южная часть гряды Чернышева граничит с Большесынинской впадиной, однако в районе этой границы на севере Большесынинской впадины

также отмечен приподнятый блок — Нитчемью-Сынинская ступень (Дедеев и др., 1989).

Примечательно, что указанные приграничные территории располагаются на продолжении положительных структур северо-западного простираения Печорской плиты (Юдин, 1994; Иванов, Пучков, 2022). Так, на продолжении структур Печоро-Кожвинского мегавала располагаются Среднепечорское поднятие и Тимаизское поперечное поднятие, а Колвинский мегавал трассируется к юго-востоку Нитчемью-Сынинской ступенью Большесынинской впадины (рис. 1, а). Многими исследователями отмечается, что данные полосы поднятий северо-западного простираения существовали еще до формирования ПрП и являлись тектонически активными на протяжении всего палеозоя (Дедеев и др., 1989; Юдин, 1994; Иванов, Пучков, 2022; Нечуехин и Волчек, 2015 и др.).

Печоро-Кожвинский и Колвинский мегавалы являются соответственно юго-западным и северо-восточным ограничениями Печоро-Колвинского авлакогена. Эта крупная структура была образована в зоне ордовикско-девонской системы палеорифтов Печорской





плиты (Тимонин, 1998; Малышев, 2002 и др.), расположенной на сочленении двух крупных блоков земной коры — Ижма-Печорского и Большеземельского, различающихся между собой по возрасту, внутренней структуре и составу пород фундамента. В интерпретации В. М. Нечеухина и Е. Н. Волчек Ижма-Печорский мегаблок (Ижемская покровно-блоковая мегазона континентального склона) на северо-западе ограничен зоной коллизионного шва, за которым располагалась Кулгуевско-Кожимская коллизионно-покровно-блоковая мегазона, сочетающая в себе области аккреции базальт-кремнисто-сланцевых отложений и блоки синокитических прототеррейнов (Нечеухин и Волчек, 2015). По их мнению, заложение системы грабенов Печоро-Колвинского авлакогена произошло на позднекембрийско-раннеордовикском этапе рифтогенеза. Однако тектоническая активность и дифференциация территории на относительно мобильные и стабильные мегаблоки наиболее отчетливо проявились с позднего силура — раннего девона до раннего карбона. В результате этого в данной области формировались зоны интенсивного прогибания, характеризующиеся в настоящее время существенно увеличенными мощностями осадочных отложений нижнего палеозоя. Позднее визейско-раннеартиновское время характеризуется более равномерным прогибанием всей площади плиты, однако активизация уральской складчатости в конце визейского века привела к инверсии линейных отрицательных структур Печоро-Колвинской рифтогенной зоны и формированию на их месте крупных палеовазов (Дедеев и др., 1989; Тимонин, 1998; Малышев, 2002) и поднятий на их продолжении в юго-восточном направлении (Иванов, Пучков, 2022).

Из вышеизложенного следует, что осадконакопление Верхнепечорского и Щугорского районов происходило в пределах территорий с существенно различными геодинамическими обстановками: бассейн верхней Печоры — на юго-восточном ограничении стабильного Ижма-Печорского блока, а бассейн среднего и нижнего течения р. Щугор — на продолжении структур Печоро-Колвинского авлакогена. Именно вследствие данного обстоятельства эволюция осадконакопления этих двух областей имеет существенные различия. Например, если в среднекаменноугольную эпоху на территории бассейна верхней Печоры тектоническая активизация проявлялась лишь в чередовании поднятия и опускания южной или северной областей, то на широте р. Щугор тектонические процессы, протекавшие в зоне Печоро-Колвинского авлакогена, а также напряжения со стороны надвигающегося с востока орогена, привели к дифференциации морского бассейна на относительно глубоководный на западе и мелководный на востоке.

Несколько иная геологическая история разворачивалась в районе южной части гряды Чернышева. Для ее понимания нужно иметь в виду, что данная структура не является конседиментационной, а образована на рубеже перми и триаса в результате разгрузки напряжений со стороны надвигавшегося Уральского орогена и послонного срыва по верхнеордовикским соленосным отложениям (Юдин, 1994). В палеотектоническом плане территория гряды вполне отвечала переходной зоне между областями с различными условиями осадконакопления. Морфологически она могла

быть выражена как уступ. Косвенными признаками его наличия может служить существенное различие мощностей отложений, накопленных с ордовика по триас: от 10—12 км в центральной части Косью-Роговской впадины до 4 км в центральной части Хорейверского прогиба (Тимонин, 1998; Данилов, 2017). На севере он разделял тектонически относительно стабильный Большеземельский мегаблок и более подвижную область континентальной окраины (Косью-Роговскую впадину). Субпараллельно южной оконечности гряды Чернышева в Большесынинской впадине располагается Нитчемью-Сынинская ступень, которая, скорее всего, была морфологически выраженной на протяжении по крайней мере позднего палеозоя. В пользу этого говорят результаты литолого-фациального анализа А. И. Елисеева, согласно которым на территории южной части гряды Чернышева с позднего девона — раннего карбона происходило накопление двух разнофациальных комплексов отложений — западного сынинского (мелкое море) и восточного вангырского (относительно глубокое море). Распространение областей данных фаций было субпараллельно структурам гряды Чернышева: северо-восток — юго-запад на севере, север — юг на юге (Елисеев, 1963, рис. 30—35).

Таким образом, различия тектонического строения в совокупности с общей геодинамической ситуацией (инверсия тектонических движений, обусловленных активизацией коллизии (Малышев, 2002) послужили одной из причин различий в эволюции осадконакопления на верхней Печоре, в бассейне р. Щугор и на гряде Чернышева. Также следует, что Верхнепечорский палеобассейн в каменноугольно-раннепермское время был отделен от более северных палеоморей поднятиями, на территории которых уже в визейское время формировалась обширная зона осушенных и мелководно-островных областей (Калашников, 2005; Атлас..., 2000; Сандула, Шадрин, 2017).

## Выводы

На территории бассейна верхней Печоры на протяжении визейско-ассельского времени существовал палеобассейн (Верхнепечорский), эволюция осадконакопления которого имеет свои отличительные черты.

В истории геологического развития территории верхней Печоры в визейско-ассельское время выделяются три этапа, отвечающие времени формирования трёх трансгрессивно-регрессивных циклитов: *визейско-серпуховский, башкирско-московский, позднекаменноугольно-раннепермский*.

В строении верхневизейско-ассельских отложений бассейна верхней Печоры по составу пород можно выделить четыре типа разреза: *кремнисто-глинисто-известняковый, известняковый, доломитово-известняковый, кремнисто-известняковый*.

По составу, строению, времени и условиям осадконакопления изученные отложения подразделяются на следующие литологические комплексы: *кремнисто-глинисто-карбонатный открытоморской* (тульский), *кремнисто-карбонатные открытоморские* (алексинско-нижнемихайловский, башкирско-нижнемосковский, касимовско-среднежелтый), *карбонатные мелководно-отмельные* (верхнемихайловско-протвинский,

московский), а также верхнегжельско-ассельский мелководно-депрессивный (кремнисто-известняковый, известняковый, глинисто-известняковый).

Литологические комплексы, образованные в открытоморских условиях, относятся к формациям семейства платамовых, а в мелководно-отмельных условиях — к формациям семейства калейдовых. Они составляют вертикальный формационный ряд, в котором образуют трехкратное чередование друг с другом.

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

## Литература / Reference

- Антошкина А. И., Салдин В. А., Никулова Н. Ю. и др. Особенности палеозойской истории североуральского осадочного бассейна // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2012. № 3 (207). С. 16—23.  
Antoshkina A. I., Saldin V. A., Nikulova N. Yu. et al. Features of the Paleozoic history of the North Ural sedimentary basin. Vestnik IG Komi SC UB RAS, 2012, No. 3 (207), pp. 16—23. (in Russian)
- Антошкина А. И., Салдин В. А., Сандула А. Н. и др. Палеозойское осадконакопление на внешней зоне шельфа пассивной континентальной окраины северо-востока Европейской платформы. Сыктывкар: Геопринт, 2011. 200 с.  
Antoshkina A. I., Saldin V. A., Sandula A. N. et al. Paleozoic sedimentation on the outer shelf zone of the passive continental margin of the northeast of the European Platform. Syktyvkar: Geoprint, 2011, 200 p. (in Russian)
- Атлас геологических карт (литолого-фациальных, структурных и палеогеологических). Тимано-Печорский седиментационный бассейн / Отв. ред. Н. И. Никонов. Ухта, 2000. 132 с. (ГУП Тимано-Печорский НИЦ).  
Atlas of geological maps (lithological-facies, structural and paleogeological). Timan-Pechora sedimentation basin. / Ed. N. I. Nikonov. Ukhta: 2000. 132 p. (Timan-Pechora Research Center). (in Russian)
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Уральская. Лист Р-40 — Североуральск. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2005. 332 с.  
State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1,000,000 (third generation). The Ural series. P-40 — Severouralsk. Explanatory note. St. Petersburg: 2005, 332 p. (in Russian)
- Данилов В. Н. Гряда Чернышева: геологическое строение и нефтегазоносность. СПб.: Реноме, 2017. 288 с.  
Danilov V. N. Chernyshev Ridge: geological structure and oil and gas potential. St. Petersburg: RENOME, 2017, 288 p. (in Russian)
- Дедеев В. А., Юдин В. В., Богацкий В. И., Шарданов А. Н. Тектоника Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции (Объяснительная записка к «Структурно-тектонической карте Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции» масштаба 1:1 000 000). Сыктывкар, 1989, 27 с.  
Dedeev V. A., Yudin V. V., Bogatskiy V. I., Shardanov A. N. Tectonics of the Timan-Pechora oil and gas province (explanatory note to the «Structural-tectonic map of the Timan-Pechora oil and gas province», scale 1:1000000). Syktyvkar, 1989, 27 p. (in Russian)
- Елисеев А. И. Стратиграфия и литология каменноугольных отложений гряды Чернышева. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1963. 173 с.  
Eliseev A. I. Stratigraphy and lithology of carboniferous deposits of the Chernyshev Ridge. Moscow-Leningrad, 1963, 173 p. (in Russian)
- Елисеев А. И. Формации зон ограничения северо-востока Европейской платформы (поздний девон и карбон). Л.: Наука, ленинградское отделение, 1978. 203 с.  
Eliseev A. I. Formations of the restriction zones of the north-east of the European platform (Late Devonian and Carboniferous). Leningrad: Nauka, 1978, 203 p. (in Russian)
- Елисеев А. И. Геологические формации и методы формационного анализа. Сыктывкар: Геопринт, 2008. 36 с.  
Eliseev A. I. Geological formations and methods of formation analysis. Syktyvkar: Geoprint, 2008, 36 p. (in Russian)
- Елисеев А. И., Салдин В. А., Антошкина А. И. и др. Формации палеозоя северо-восточной окраины Европейской платформы. Сыктывкар, 2006. 72 с. (Научные доклады Коми НЦ УрО РАН. Вып. 481).  
Eliseev A. I., Saldin V. A., Antoshkina A. I. et al. Paleozoic formations of the northeastern margin of the European Platform. Syktyvkar, 2006, 72 p. (Scientific reports, Komi SC UB RAS, 481). (in Russian)
- Иванов К. С., Пучков В. Н. Структурно-формационные зоны Уральского складчатого пояса: обзор данных и развитие новых идей // Геотектоника. 2022. № 6. С. 78—113.  
Ivanov K. S., Puchkov V. N. Structural And Formation Zones Of The Urals Fold Belt (East Of Russia): An Overview. Geotectonics. 2022, No. 6, pp. 78—113. DOI: 10.31857/S0016853X22060030 (in Russian)
- Калашиников Н. В. Экосистемы раннего карбона Европейского Севера России. Екатеринбург, 2005. 165 с.  
Kalashnikov N. V. Ecosystems of the Early Carboniferous of the European North of Russia. Ekaterinburg: 2005, 165 p. (in Russian)
- Курбачкая Ф. А. Осадочные формации западного склона Среднего и Северного Урала // Генетический формационный анализ осадочных комплексов фанерозоя и докембрия: 3-е Всерос. литол. совещ. М: МГУ, 2003. С. 109—110.  
Kurbatskaya F. A. Sedimentary formations of the western slope of the Middle and Northern Urals. Proc. of the 3rd All-Russian Lithological Meeting. Moscow: 2003, pp. 109—110. (in Russian)
- Малышев Н. А. Тектоника, эволюция и нефтегазоносность осадочных бассейнов Европейского Севера России. Екатеринбург, 2002. 273 с.  
Malyshev N. A. Tectonics, evolution and oil and gas content of sedimentary basins of the European North of Russia. Yekaterinburg, 2002, 273 p. (in Russian)
- Нечеухин В. М., Волчек Е. Н. Типы аккреционных и коллизионных процессов в орогенных системах Тимано-Уральского сегмента Евразии // Литосфера. 2012. № 4. С. 78—90.  
Necheukhin V. M., Volchek E. N. Types of accretion and collision processes in orogenic systems of the Timan-Ural segment of Eurasia. Lithosphere, 2012, No. 4, pp. 78—90. (in Russian)
- Пономаренко Е. С. Вернекаменноугольно-нижнепермские карбонатные отложения западного склона Северного Урала. Сыктывкар: Геопринт, 2015. 177 с.





- Ponomarenko E. S. Upper Carboniferous–Lower Permian carbonate dwposites on western slope of the Nothern Urals. Syktyvkar: Geoprint, 2015, 177 p. (in Russian)
- Пономаренко Е. С., Иванова Р. М. Касимовский ярус в разрезе Молебен-Из (р. Илыч, Северный Урал) // Литосфера. 2020. № 20(3). С. 341–362.
- Ponomarenko E. S., Ivanova R. M. Kasimovian stage in the Moleben-Iz section (Ilych River, Northern Urals). Litosfera, 2020, No. 20(3), pp. 341–362. DOI: 10.24930/1681-9004-2020-3-341-362. (in Russian)
- Сандула А. Н. Известняковые брекчии в каменноугольных отложениях Печорского Урала. Екатеринбург: УрО РАН, 2008. 143 с.
- Sandula A. N. Limestone breccias in carboniferous deposits of the Pechora Urals. Ekaterinburg: UB RAS, 2008, 143 p. (in Russian)
- Сандула А. Н. Эволюция среднекаменноугольного осадконакопления на Печорском Урале // Материалы IX Всеросс. литол. совещ. (с межд. участием). Казань: Изд-во Казанского университета, 2019. С. 420–421.
- Sandula A. N. Evolution of the Middle Carboniferous sedimentation in the Pechora Urals. Proceedings of the IX All-Russian Lithological Meeting. Kazan: 2019, pp. 420–421. (in Russian)
- Сандула А. Н., Шадрин А. Н. Каменноугольно-нижнепермские карбонатные формации западного склона Печорского Урала: строение и условия образования // Материалы Всерос. литол. совещ., посвящ. пам. А. Г. Косовской и И. В. Хворовой. М.: ГЕОС, 2020. С. 216–219.
- Sandula A. N., Shadrin A. N. Carboniferous–Lower Permian carbonate formations of the western slope of the Pechora Urals: structure and conditions of formation. Proc. of the All-Russian Lithological Meeting dedicated to the memory of A. G. Kosovskaya and I. V. Khvorova Moscow: GEOS, 2020, pp. 216–219. (in Russian)
- Сандула А. Н., Шадрин А. Н., Пономаренко Е. С. Особенности строения каменноугольно-нижнепермских карбонатных формаций в бассейне Верхней Печоры // Материалы VII литол. совещ. Т III. Новосибирск: ИНГТ СО РАН, 2013. С. 63–65.
- Sandula A. N., Shadrin A. N., Ponomarenko E. S. Structural features of the Carboniferous–Lower Permian carbonate formations in the Upper Pechora basin. Proc. of the VII Lithological Conference, V. 3, Novosibirsk, 2013, pp. 63–65. (in Russian)
- Сандула А. Н., Шмелёва Л. А. Верхнебашкирские карбонатные отложения в бассейне реки Шарью (гряда Чернышева): литология, изотопия углерода и кислорода, условия осадконакопления // Известия Коми НЦ УрО РАН. 2022. № 2 (54). С. 14–29.
- Sandula A. N., Shmelyova L. A. Upper Bashkirian deposits in the Sharyu River basin (the Chernyshev Ridge): lithology, carbon and oxygen isotopes, conditions of sedimentation. Proc. of the Komi SC UB RAS, 2022, No. 2 (54), pp. 14–29. DOI: 10.19110/1994-5655-2022-2-14-29. (in Russian)
- Тимонин Н. И. Печорская плита: история геологического развития в фанерозое. Екатеринбург: УрО РАН, 1998. 240 с.
- Timonin N. I. Pechora Plate: the history of geological development in the Phanerozoic. Yekaterinburg: UB RAS, 1998, 240 p. (in Russian)
- Хворова И. В. Задачи и некоторые результаты изучения литологии формаций // Тр. ГИН АН СССР. Вып. 81. М., 1963. С. 7–29.
- Khvorova I. V. Tasks and some results of studying the lithology of formations // Proc. of the GIN of the AS USSR, 81, Moscow, 1963, pp. 7–29. (in Russian)
- Херасков Н. П. Тектоника и формации. Избранные труды. М.: Наука, 1967. 403 с.
- Kheraskov N. P. Tectonics and formations. Selected works. Moscow: Nauka, 1967, 403 p. (in Russian)
- Хераскова Т. Н. Развитие идей И. В. Хворовой: Значение методов литологического и формационного анализа осадочных и вулканогенно-осадочных формаций при реконструкциях палеотектонических структур // Материалы Всерос. литол. совещ., посвящ. пам. А. Г. Косовской и И. В. Хворовой. М.: ГЕОС, 2020. С. 258–262.
- Kheraskova T. N. Development of I. V. Khvorova's ideas: The importance of methods of lithological and formation analysis of sedimentary and volcanogenic-sedimentary formations in reconstructions of paleotectonic structures. Proc. of the All-Russian Lithological Meeting dedicated to the memory of A. G. Kosovskaya and I. V. Khvorova. Moscow: GEOS, 2020, pp. 258–262. (in Russian)
- Шадрин А. Н., Сандула А. Н. Визейские карбонатные отложения в бассейне р. Илыч (Северный Урал): литология, изотопия, эволюция осадконакопления // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2018. № 5. С. 13–21.
- Shadrin A. N., Sandula A. N. Visean carbonate deposits in the Ilych River basin (Northern Urals): lithology, isotopy, evolution of sedimentation. Vestnik IG Komi SC UB RAS, 2018, No. 5, pp. 13–21. DOI: 10.19110/2221-1381-2018-5-13-21. (in Russian)
- Шатский Н. С. Геологические формации и осадочные полезные ископаемые // Избранные труды. М.: 1965. Т. 3. 346 с.
- Shatskiy N. S. Geological formations and sedimentary minerals. Selected works. V. 3. Moscow: 1965, 346 p. (in Russian)
- Юдин В. В. Варисциды Северного Урала. Л.: Наука, 1983. 173 с.
- Yudin V. V. Variscids of the Northern Urals. Leningrad: Nauka, 1983, 173 p. (in Russian)
- Юдин В. В. Орогенез севера Урала и Пай-Хоя. Екатеринбург: Наука, 1994. 286 с.
- Yudin V. V. Orogeny of the North of the Urals and Pay-Khoy. Yekaterinburg: Nauka, 1994, 286 p. (in Russian)

Поступила в редакцию / Received 5.10.2023



УДК 551.735.1 (282.247.111)

DOI: 10.19110/geov.2023.12.2

## Строматолиты в верхневизейских отложениях разреза «Пача-Ласта» (р. Илыч, Северный Урал)

А. Н. Шадрин<sup>1</sup>, Р. М. Иванова<sup>2</sup>, Е. С. Пономаренко<sup>1</sup><sup>1</sup> Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар; [anshadrin@geo.komisc.ru](mailto:anshadrin@geo.komisc.ru), [esponomarenko@geo.komisc.ru](mailto:esponomarenko@geo.komisc.ru)<sup>2</sup> Институт геологии и геохимии УрО РАН, Екатеринбург; [geoivanur@mail.ru](mailto:geoivanur@mail.ru)

На основе изучения фауны фораминифер карбонатного разреза «Пача-Ласта» (р. Илыч, Северный Урал) достоверно установлен веневский возраст отложений. При литологическом описании разреза среди биокластовых известняков выявлены два горизонта развития строматолитовых образований, нехарактерных для разновозрастных отложений района. Они сложены микритизированными колониями цианобактерий, среди которых определены *Ortonella* и *Girvanella*. Данные строматолиты относятся к типу скелетных, которые в силуре и позднем девоне имели определенное палеогеографическое положение и фиксировали окраину карбонатной платформы. Для бассейна р. Илыч предполагается последовательное уменьшение относительного уровня моря после ранневизейской трансгрессии со сменой условий открытой сублиторали (тульско-алексинское время) на условия островного мелководья (михайловско-веневское время). В последних при определенных обстоятельствах могли появляться строматолиты — структурные элементы, нехарактерные для верхневизейских пород района.

**Ключевые слова:** стратиграфия, палеогеография, фораминиферы, строматолиты, визейский ярус, Северный Урал.

## Stromatolites in the Upper Visean sediments of the Pacha-Lasta section (Ilych River, Northern Urals)

A. N. Shadrin<sup>1</sup>, R. M. Ivanova<sup>2</sup>, E. S. Ponomarenko<sup>1</sup><sup>1</sup> Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar<sup>2</sup> Institute of Geology and Geochemistry UB RAS, Yekaterinburg

The object of the study is the carbonate section «Pacha-Lasta» (Ilych river, Northern Urals). The work is based on the study of the composition, structure of rocks and species diversity of the foraminifera contained in them. The rocks are represented by various limestones with numerous remains of foraminifera, brachiopods, corals, echinoderms, frequent calcispheres and rare stromatolites. Based on the presence in the complex of certain foraminifera genera *Biseriella*, *Globivalvulina*, various *Eostaffella* (including *E. ikensis tenebrosa*) as well as the species *Endothyranopsis sphaerica* and *Asteroarchaediscus baschkiricus*, the Venusian age of the deposits is reliably established. Stromatolite formations, which are not characteristic of the same-age deposits of the area, were established at two intervals of the studied section. They are composed of micritized colonies of cyanobacteria, among which *Ortonella* and *Girvanella* are identified. These formations belong to the type of skeletal stromatolites, which in the Silurian and Late Devonian had a certain paleogeographic position and fixed the margin of the carbonate platform. For the Ilych River basin, a consistent decrease in relative sea level is assumed after the Early Visean transgression with a change in the conditions of the open sublittoral (Tula and Aleksinsky horizons) to the conditions of insular shallow water (Mikhailovsky and Venevsky horizons). In the latter, stromatolites can sometimes occur, which are not characteristic of the Upper Visean deposits of the area.

**Keywords:** stratigraphy, paleogeography, foraminifera, stromatolites, Visean, Northern Urals.

### Введение

Верхневизейские карбонатные отложения имеют широкое распространение в бассейне р. Илыч (Северный Урал) и вскрыты в естественных выходах в районе устья руч. Патракаръем-Вомынбож-Ёль (восточные выходы), о-ва Пушта-Ди, р. Ыджид Анью (центральные выходы) и руч. Изпыред-Вомыншор-Ёль до руч. Лёкиз-Вож (западные выходы). Они представлены различными

биокластовыми и пелитоморфными известняками, известняковыми песчаниками и их доломитизированными и окремненными разностями. Характерной особенностью карбонатных пород является значительное содержание скелетного материала: остатков иглокожих, брахиопод, кораллов, фораминифер, зеленых и красных водорослей, а также более редких гастропод, остракод и пелеципод.

**Для цитирования:** Шадрин А. Н., Иванова Р. М., Пономаренко Е. С. Строматолиты в верхневизейских отложениях разреза «Пача-Ласта» (р. Илыч, Северный Урал) // Вестник геонаук. 2023. 12(348). С. 16–23. DOI: 10.19110/geov.2023.12.2

**For citation:** Shadrin A. N., Ivanova R. M., Ponomarenko E. S. Stromatolites in the Upper Visean sediments of the Pacha-Lasta section (Ilych River, Northern Urals). A new location of stromatolites in the Middle Timan: their morphological and structural features. Vestnik of Geosciences, 2023, 12(348), pp. 16–23, doi: 10.19110/geov.2023.12.2





Продукты жизнедеятельности микробных сообществ в верхней части визе бассейна р. Илыч обычно немногочисленны и представлены редкими корочками обрастаний на крупных биокластах и/или частично микритизированными\* мелкими скелетными остатками. Такие образования, как строматолиты\*\*, более характерны для вышележащих серпуховских отложений, а в верхневизейских породах они ранее не отмечались.

Разрез «Пача-Ласта» (обн. 62 по В. А. Варсанюфьевой (Варсанюфьева, 1940)) был описан во время полевых исследований 2015 г., а затем доизучен в 2022 г. Для бассейна верхней Печоры он представляет собой редкий пример появления верхневизейских строматолитов на этом стратиграфическом интервале.

Целью работы является литологическая характеристика строматолитов из разреза «Пача-Ласта», их стратиграфического и палеогеографического положения.

### Материал и методы

Материалом для работы послужили образцы пород (127 шт.), отобранные с обн. 62 при исследованиях 2015 и 2022 гг. Первичный анализ состава проводился непосредственно на обнажении путем воздействия на карбонатные породы 10 %-м раствором HCl. Из выборки образцов для литологического исследования было изготовлено 37 шлифов, а для палеонтолого-стратиграфических изысканий из пород, содержащих фораминиферы, — 28 шлифов. Для последующего получения дополнительной информации о составе карбонатов с ними проводили реакцию окрашивания подкисленными (7—10 % HCl) чернилами. Дальнейшее изучение состава и строения пород, а также установление палеонтологических характеристик проводились под поляризационным микроскопом.

### Литолого-стратиграфическая характеристика разреза «Пача-Ласта»

Обнажение 62 находится на правом берегу р. Илыч, в 1.4 км ниже о. Молебен-Ди и в 300 м ниже устья сухого руч. Пача-Шор (рис. 1).

Коренные выходы неприметные, расположены у уреза воды и морфологически практически не выражены в рельефе (максимальная высота выходов составляет 0.7 м при длине обнажения около 70 м). При низком уровне воды некоторые интервалы разреза также можно наблюдать на дне реки. Слои падают монотонно по азимуту 80—95° под углом 50—55°, наращивание — снизу вверх по реке. Видимая мощность разреза составляет 35.5 м.

Нижние 14.2 м разреза (рис. 2) представлены разноплитчатыми (плитки 0.2—1.0 м) биокластовыми известняками и биокластовыми известняковыми песчаниками с преимущественно ступчатым цементом. В верхней части появляются известняки кальцисферово-пелитоморфные и ступчато-кальцисферовые. Венчает рассматриваемый интервал слой стромато-

литового известняка мощностью 0.5 м. Органогенный материал представлен фрагментами раковин фораминифер, брахиопод, талломов водорослей, члеников криноидей, колоний табулят, одиночных ругоз и мшанок. Значительно реже встречаются раковины остракод и гастропод. Иногда кальцисферы составляют 50—70 % породы. Органогенный материал, как правило, не сортирован по размеру и таксономическим группам, но в некоторых слоях ориентирован по напластованию.

Породы этой части разреза содержат комплекс фораминифер *Archaeosphaera* sp., *Earlandia vulgaris* (Raus. et Reitl.), *Pseudoammodiscus priscus* (Raus.), *Asteroarchaediscus ovoides* (Raus.), *A. baschkiricus*\*\*\* (Krest. et Theod.), *Forschia mikhailovi* Dain, *F. cf. parvula* Raus., *Lituotubella magna* Raus., *L. cf. magna* Raus., *Endothyra similis magna* Raus., *E. exilis* Raus., *E. obsoleta* (Raus.), *Omphalotis omphalota* (Raus. et Reitl.), *Omphalotis cf. omphalota* (Raus. et Reitl.), *Globoendothyra globulus* (Eichw.), *Globoendothyra* sp., *Endothyranopsis* sp., *E. cf. sphaerica* (Raus. et Reitl.), *Plectogyranopsis convexa* (Raus.), *Pojarkovella* sp., *Mediocris breviscula* (Gan.), *Endostaffella decurta* Raus., *E. parva* (Moell.), *Cribrospira cf. mira* Raus., *Bradyina* sp. (ex gr. *eonutiliformis* Reitl.), *Palaeotextularia* sp., *P. longiseptata* Lip., *P. longiseptata fallax* Lip., *Consobrinella consobrina intermedia* (Lip.), *Climacamina prisca* Lip., *C. cf. prisca* Raus., *Biseriella parva* (N. Tchern.), *Globivalvulina kamensis* Reitl., *Eostaffella postproikensis* Vdov., *E. ovoidea* Brazn. et Pot., *E. parastruvei* Raus., *E. irenae* Gan., *E. rotunda* Durk., *Ikensieformis (Eostaffella) ikensis* (Viss.), *Parastaffella angulata* Raus., *Pseudoendothyra propinqua* Viss. и сообщество зелёных и красных водорослей: *Palaeoberesella lahuseni* (Moell.), *P. issetica* R. Ivan., *Koninckopora inflata* (Koninck), *K. cf. inflata* (Koninck), *Fasciella kizilia* R. Ivan.; *Ungdarella uralica* Masl., *Epistacheoides* sp., *Stacheoides tenius* Petryk et Mamet.

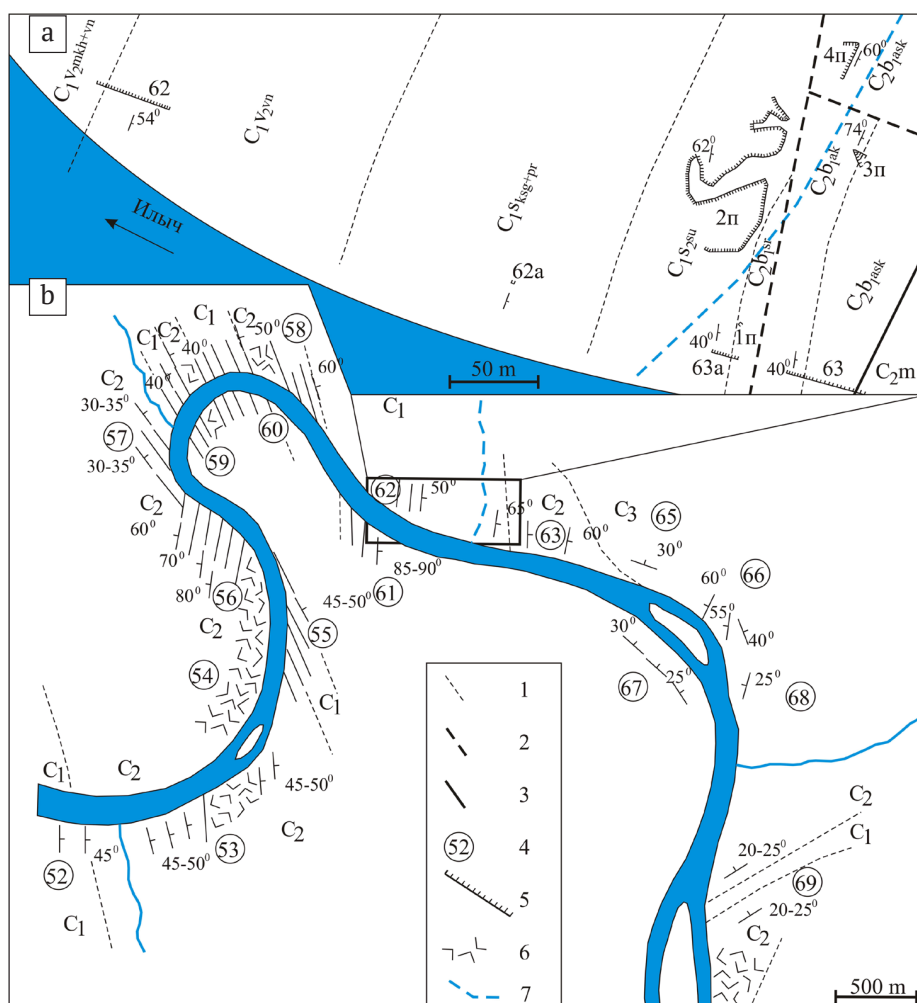
По наличию в приведенном выше комплексе фораминифер родов *Biseriella*, *Globivalvulina*, разнообразных *Eostaffella*, а также видов *Endothyranopsis sphaerica* и *Asteroarchaediscus baschkiricus* предполагается веневский возраст пород пачки.

Выше, после 3-метрового необнаженного интервала (рис. 2), вскрываются разноплитчатые (0.05—1 м) известняки: ступчато-биокластовые, пелитоморфно-биокластовые, биокластово-кальцисферовые, биокластовые со ступчатым цементом и биокластовые песчаники, включающие в средней части слой строматолитового известняка мощностью 0.5 м. Известняки содержат разнообразные ископаемые, представленные остатками фораминифер, брахиопод, кораллов, мшанок, криноидей, водорослей, кальцисфер и др. Видимая мощность этого (верхнего) интервала — 18.3 м. Он содержит комплекс фораминифер: *Archaeosphaera* sp., *Earlandia vulgaris* (Raus. et Reitl.), *E. cf. elegans* (Raus. et Reitl.), *E. minor* (Raus.), *Archaediscus pauxillus* Schlyk., *A. karreri fragilis* Raus., *A. cf. moelleri gigas* Raus., *Asteroarchaediscus ovoides* (Raus.), *A. baschkiricus* (Krest. et Theod.), *Neoarchaediscus parvus* (Raus.), *Forschia parvula* Raus., *Lituotubella* sp., *Omphalotis omphalota* (Raus. et Reitl.), *Globoendothyra cf. globulus* (Eichw.), *G. globulus* (Eichw.), *Endothyranopsis* sp., *E. cf. crassa* (Brady), *Endostaffella parva* (Moell.), *Pojarkovella* sp., *Mediocris breviscula* (Gan.), *M. mediocris*

\* Полная микритизация встречается, но крайне редко.

\*\* Под строматолитами понимаются слоистые бентосные микробиальные отложения (Riding, 1991).

\*\*\* Наиболее характерные и зональные таксоны фораминифер в тексте выделены полужирным шрифтом.



**Рис. 1.** Расположение изученного обнажения: а — карта-схема приустьевых участка сухого руч. Пача-Шор, б — геологическая схема среднего течения р. Илыч (Варсановьева, Раузер-Черноусова, 1960) с добавлениями авторов. Условные обозначения: 1 — границы между стратиграфическими подразделениями; 2 — тектонические нарушения предполагаемые; 3 — тектонические нарушения установленные; 4 — номера обнажений (по В. А. Варсановьева, 1940); 5 — изученные обнажения; 6 — известняковые брекчии; 7 — сухое русло руч. Пача-Шор

**Fig. 1.** Location of the studied outcrop: а — а schematic map of the estuary section of the dry Pacha-Shor creek, б — geological diagram of the middle course of the Ilych River (Varsanofieva, Rauser-Chernousova, 1960) with additions by the authors. Symbols: 1 — boundaries between stratigraphic units; 2 — tectonic disturbances assumed; 3 — tectonic disturbances established; 4 — numbers of outcrops (according to V. A. Varsanofieva (Varsanofieva, 1940)); 5 — studied outcrops; 6 — limestone breccias; 7 — dry streambed Pacha-Shor creek

(Viss.), *Bradyina rotula* Eichw., *Palaeotextularia longiseptata* Lip., *P. longiseptata fallax* Lip., *Consobrinella consobrina* (Lip.), *C. consobrina intermedia* (Lip.), *Biseriella* cf. *parva* (N. Tchern.), *B. minima* Reith., *Eostaffella irenae* Gan., *E. proikensis* Raus., *Ikensieformis (Eostaffella) tenebrosa* Viss., *I. (Eostaffella) cf. tenebrosa* Viss., *E. mosquensis* Viss., *E. rotunda* Durk., *E. parastruvei* Raus., *Parastaffella angulata* Raus. и водорослей *Kamaena minuta* R. Ivan., *Kamaenoides antropovi* Tchuv., *Koninckopora inflata* (Koninck), *Calcifolium okense* Schwet. et Bir., *Fasciella kizilia* R. Ivan., *Stacheoides ex gr. polytrema* Brady., *S. tenius* Petryk et Mamet, *Epistacheoides connorensis* Mamet et Rudl.

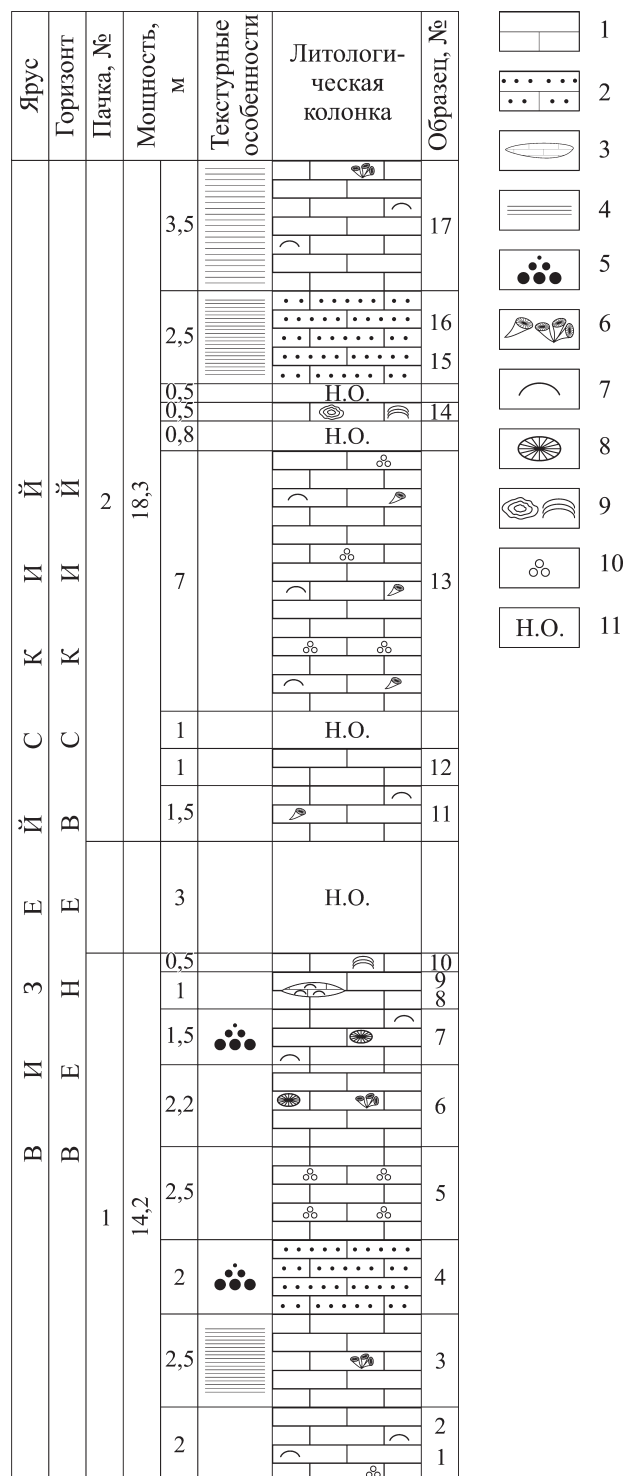
Для данной пачки также уверенно устанавливается веневский возраст на основании характерных *Asteroarchaediscus* (*A. ovoideus*, *A. baschkiricus*), многочисленных эоштафелл (*E. irenae*, *E. parastruvei*, *E. proikensis* и др.), по появлению *Neoarchaediscus parvus* и присутствию зональной формы *Eostaffella ikensis tenebrosa*.

### Характеристика строматолитов

Строматолиты отмечаются в средней и верхней частях изученного разреза в слоях мощностью по 0.5 м (рис. 2). Морфологически они представлены мелкими (до 1.5 см) округлыми желвачками (рис. 3, а), а также (в верхней части разреза) более крупными куполовидными (1–4 см в ширину и 0.5–2 см в высоту) или уплощенно-куполовидными (3–5 см в ширину и до 0.5 см в высоту) (рис. 3, б, в) формами.

Строматолиты имеют тонкослоистое строение. Наблюдается до 10 ламин, сложенных микритизированными колониями цианобактерий (высота 0.4–1.2 мм, длина 0.5–2.0 мм) и более светлыми слоями, обогащенными биокластовым материалом (0.2–2 мм) или с узорчатым строением (0.6–0.8 мм). Кроме того, отмечаются пелитоморфные пленки со множеством нитчатых микроструктур (диаметром 0.02–0.05 мм и длиной до 1.0 мм), а также кальциферы. При





**Рис. 2.** Литолого-стратиграфический разрез визейских отложений в обн. 62 «Пача-Ласта» (р. Илыч, Северный Урал)

Условные обозначения: 1 — известняк; 2 — песчаник известняковый; 3 — линза; 4 — слоистость горизонтальная; 5 — слоистость градационная; 6 — кораллы одиночные и колоннальные; 7 — брахиоподы, 8 — губки; 9 — микробные образования; 10 — кальцисферы; 11 — не обнажено

**Fig. 2.** Lithological and stratigraphic section of Visean sediments in the outcrop Il 62 «Pacha-Lasta» (Ilych river, Northern Urals)

Symbols: 1 — limestone; 2 — limestone sandstone; 3 — lens; 4 — horizontal layering; 5 — gradation layering; 6 — single and colonial corals; 7 — brachiopods, 8 — sponges; 9 — microbial formations; 10 — calcispheres; 11 — not exposed

детальном исследовании среди колоний были установлены кустистые *Ortonella* (рис. 3, d, e) и, реже, нитчатые *Girvanella* (рис. 3, f). По своему строению изученные образования в соответствии с классификацией Ридинга (Riding, 2011) можно отнести к типу скелетных строматолитов, которые характеризуются хорошо сохранными и идентифицируемыми остатками цианобактерий. Такие составляющие изученных строматолитов, как биокластовый материал и кальцисферы, а также пелитоморфный кальцит, имеют строго подчиненное значение.

Пространство между строматолитами заполнено биокластовым материалом с пелитоморфным или спаритовым цементом. Биокласты (0.1—0.5 мм) представлены фрагментами раковин фораминифер, брахиопод, талломов водорослей, кальцисфер, остракод (рис. 3, g, h). Вокруг крупного биокластового материала часто отмечаются цианобактериальные обрастания (онколиты) (рис. 3, g). Удлиненный органогенный материал частично расположен по напластованию, обуславливая слаборазличимую слоистую текстуру вмещающих строматолиты пород.

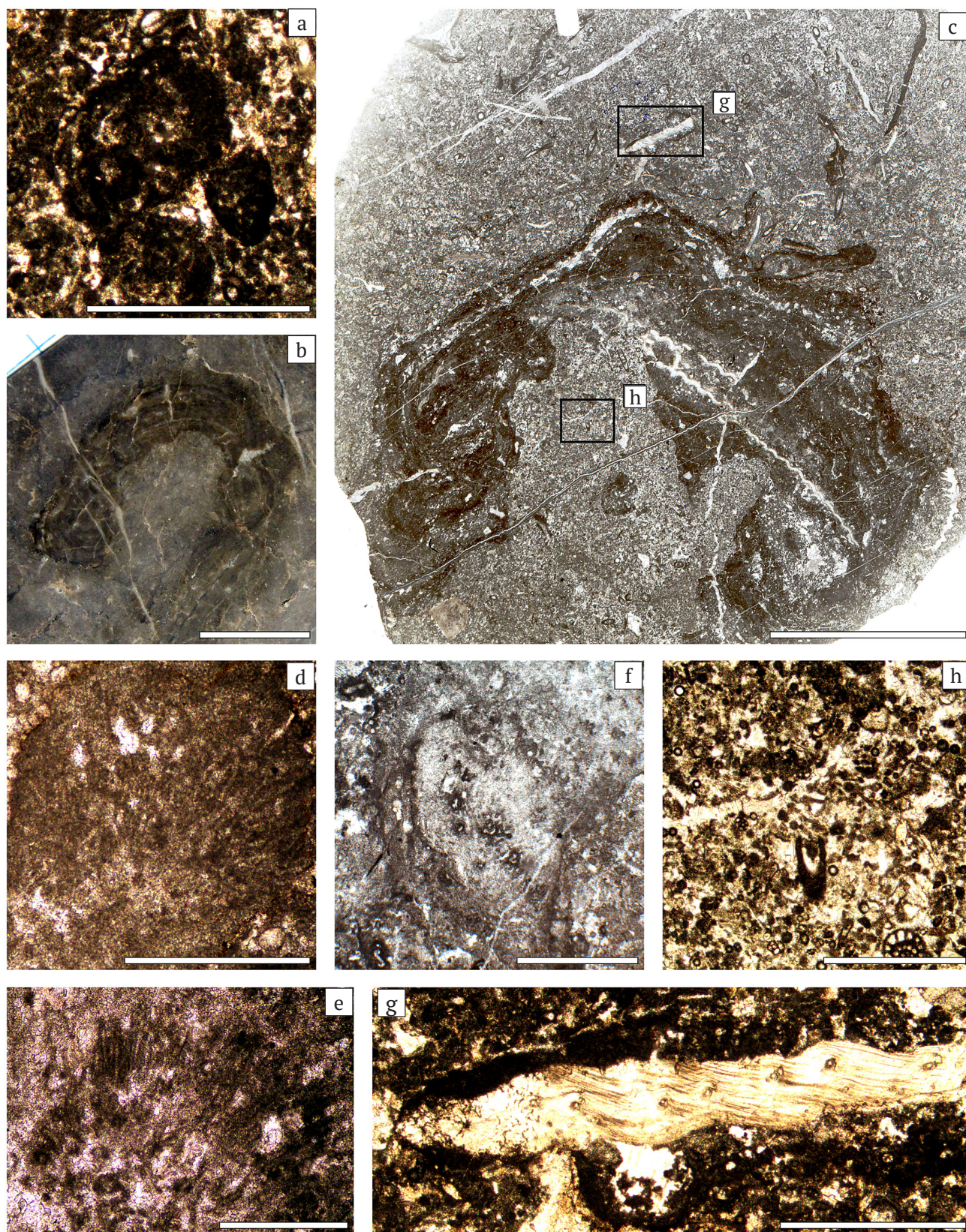
## Обсуждение

### Условия образования отложений

Преимущественно биокластовый состав пород и разнообразие органических остатков свидетельствуют о накоплении осадков в основном в мелководных открытых нормально-морских условиях. Слои кальцисферовых известняков, по всей видимости, указывают на временное наступление обстановок полуизолированных бассейнов (по аналогии с палеогеографическим положением верхнефранских кальцисферовых известняков Южного Тимана (Антошкина и др., 2014; Пономаренко, 2019) и серпуховских отложений Северного Урала (Пономаренко и др., 2015)). С ними же, как правило, ассоциируются и строматолитовые известняки (Пономаренко, Антоновская, 2015; Пономаренко, 2019; Пономаренко и др., 2015). Такая ассоциация указывает, что изученные строматолиты строились или в условиях полуизолированных бассейнов, или вдоль карбонатных песчаных отмелей окраины платформы.

По данным исследований западных и восточных разрезов на р. Илыч (Варсановьева, 1940; Муравьев, 1968; Антошкина и др., 2011; Шадрин, 2015; Пономаренко, Иванова, 2017; Шадрин, Сандула, 2018) установлено, что после ранневизейской трансгрессии и увеличения глубины моря в осадочном бассейне господствовали мелководные нормально-морские условия, позволявшие существовать многочисленным и разнообразным животным и растениям. Продукция карбонатов (скелеты организмов и их фрагменты) компенсировала и перекомпенсировала подъем относительного уровня моря. Это, в свою очередь, привело во второй половине визе (преимущественно с михайловского времени) к уменьшению аккомодационного пространства и смене условий открытого моря на обстановки островного мелководья. На отдельных участках бассейна р. Илыч, например как в рассматриваемом районе, уменьшение аккомодационного пространства явилось причиной возникновения к концу визе (веневское время) полуизолированных участков морского





**Рис. 3.** Микробиальные образования разреза «Пача-Ласта»:

a — микробиальные желвачки (обр. Ил 62/14(98), шлиф); b — поперечный разрез строматолита (обр. Ил 62/14, пришлифовка); c — строение строматолита (обр. Ил 62/14, шлиф); d, e — *Ortonella* (обр. Ил 62/10, шлиф); f — *Ortonella* и *Girvanella* (обр. Ил 62/10, шлиф); g — фрагмент с, цианобактериальное обрастание фрагмента раковины брахиоподы; h — фрагмент с, биокластовый известняк. Масштабная линейка: 1 см — для b, c; 1 мм — для a, f, g, h; 0.5 мм — для d, e

**Fig. 3.** Microbial formations of the Pacha-Lasta section:

a — microbial nodules (mod. Ил 62/14(98), slot); b — transverse section of stromatolite (mod. Ил 62/14, grinding); c — structure of stromatolite (mod. Ил 62/14, slot); d, e — *Ortonella* (mod. Ил 62/10, slot); f — *Ortonella* and *Girvanella* (mod. Ил 62/10, plate); g — fragment c, cyanobacterial fouling of a fragment of a brachiopod shell; h — fragment c, bioclastic limestone. Scale ruler: 1 cm — for b, c; 1 mm — for a, f, g, h; 0.5 mm — for d, e





дна и формированию пород со строматолитами, нехарактерными для данного стратиграфического интервала.

#### *Строматолитообразующие организмы*

Строматолиты — слоистые микробиальные образования, включающие в себя множество микроструктур (Riding, 2011), которые, по мнению некоторых исследователей, могут являться продуктами тафономических изменений цианобактерий разных стадий (Pratt, 1995; Turner et al., 2000; Пономаренко, 2019). Тем не менее, находки нитчатых *Girvanella* и кустистых *Ortonella* (рис. 3, d, e, f) в изученных строматолитах разреза «Пача-Ласта» выявляют первичных их строителей (по крайней мере, часть их). Это позволяет установить их сходство с серпуховскими строматолитами Северного Урала, например из разреза «Уньинская пещера» (обн. У85 на р. Унья; протвинский горизонт), в строении которых тоже принимали участие ортонеллы (Пономаренко и др., 2015).

Проведенный ранее анализ строматолитов и строматолитоподобных образований силура севера Урала (Пономаренко, Матвеев, 2015) и верхнего франа Южного Тимана (Пономаренко, 2019) показал, что строматолиты, состоящие из идентифицируемых цианобактерий (скелетные строматолиты) имеют определенное палеогеографическое положение. Они отмечаются только в рифовых образованиях, расположенных на окраинах карбонатных платформ, в то время как в лагунных отложениях строматолиты имеют тонкозернистую и сгустковую микроструктуры. Таким образом, верхневизейские скелетные строматолиты, вероятно, совместно с карбонатными песчаными отмелями, фиксировали окраину карбонатной платформы.

#### *Строматолиты и эволюция североуральского осадконакопления в средневизейско-серпуховское время*

Более ранними исследованиями (Шадрин, 2009; Шадрин, Сандула, 2019, 2020) установлено, что обстановки открытого моря со свободной циркуляцией вод середины визе (тульский и алексинский горизонты) на территории современного бассейна верхней Печоры способствовали высокой скорости водорослевой и метазойной карбонатной продукции, что не благоприятствовало массовому развитию микробных сообществ. Роль последних фактически заключалась только в микритизации остатков организмов, что наиболее часто наблюдается в восточных разрезах (Шадрин, 2009; Шадрин, Сандула, 2019, 2020).

К концу визе (михайловский и веневский горизонты) на рассматриваемой территории установились разнообразные условия — от крайнего мелководья с активной гидродинамикой (карбонатные песчаные отмели) до спокойноводных (лагун). В последних кроме микритизации органогенного детрита микробные сообщества начали формировать маты, которые связывали участки морского дна\* (Шадрин, 2009; Шадрин, Сандула, 2018, 2019, 2020), а в отдельных случаях (раз-

рез «Пача-Ласта») формировали первые редкие и мелкие строматолиты.

В серпуховское время количество микробиальных образований заметно увеличилось: формируемые ими отдельные онколиты и строматолиты стали чаще встречаться в карбонатных породах бассейна верхней Печоры (Калашников, 2005; Шадрин, Сандула, 2007), а в некоторых случаях — даже формировать слои строматолитовых известняков (Пономаренко и др., 2015).

По всей видимости, в результате эволюции визейского и серпуховского палеобассейнов происходило постепенное уменьшение аккомодационного пространства и изменение осадконакопления от типичных открыто-морских рамповых окружений к аккумуляции карбонатов в условиях полуизолированного бассейна с широким развитием микробиальных образований.

Следует отметить, что наиболее широко серпуховские скелетные строматолиты представлены на востоке района, например в разрезе «Уньинская пещера», где они формируют пласты пород мощностью до нескольких метров (Калашников, 2005; Пономаренко и др., 2015). В современном тектоническом плане эта территория относится к центральной подзоне Верхнепечорского поперечного опускания (Юдин, 1983). Разрез «Пача-Ласта» расположен значительно западнее — в пределах центральной части западной подзоны Верхнепечорского поперечного опускания. Учитывая возможность расположения скелетных строматолитов на краю карбонатной платформы, можно сделать вывод о проградации платформы с запада на восток. К сожалению, другие достоверные данные о наличии скелетных строматолитов в разрезах визейского яруса на западе и серпуховского яруса на востоке бассейна верхней Печоры у авторов отсутствуют. По этой причине текущий вопрос следует рассмотреть в будущем при появлении новой объективной информации.

#### **Заключение**

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено следующее.

1. Верхневизейские породы в разрезе «Пача-Ласта» на р. Илыч кроме типичных открытоморских отложений с разнообразными органическими остатками содержат несколько слоев со строматолитами.

2. Установленные комплексы фораминифер достаточно представительны и позволяют достоверно определить веневский возраст изученных отложений.

3. Строматолиты имеют вид тонкослоистых мелких округлых желвачков и куполовидных или уплощенно-куполовидных строений. Кроме того, установлено, что в их строении участвовали ясно определяемые под микроскопом остатки цианобактерий (*Ortonella*, *Girvanella*).

Эти образования относятся к типу скелетных строматолитов, которые в силуэте и позднем девоне имели определенное палеогеографическое положение — в составе рифов фиксировали окраину карбонатной платформы. В раннем карбоне они, по всей видимости, отмечали окраину платформы в составе карбонатных песчаных отмелей.

4. При рассмотрении палеогеографических обстановок в бассейне р. Илыч предполагается, что здесь

\* Черных В. А. Стратиграфия, литология и условия залегания каменноугольных отложений реки Большая Шайтановка на Северном Урале: дисс. ... канд. геол.-мин. наук. Сыктывкар, 1962 / Научный архив Коми НЦ УрО РАН. Ф. 2. Оп. 2. Д. 94. 380 с.

после ранневизейской трансгрессии наблюдалось последовательное уменьшение глубины морского бассейна, что привело к смене условий открытой сублиторали (тульско-алексинское время) на условия островного мелководья (михайловское время). Аналогичные обстановки сохранялись до конца визе. Эти условия послужили основой для появления первых строматолитов на границе полуизолированного бассейна (западнее) и открытого моря (восточнее).

Авторы искренне благодарны А. И. Антошкиной и А. Н. Сандуле (ИГ Коми НЦ РАН, г. Сыктывкар) за консультации и рекомендации при написании работы.

Работа выполнена в рамках темы НИР ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН № ЕГИСУ НИОКТР — 122040600013-9 (FUUU-2022-0054) и темы НИР ИГТ УрО РАН, тема № 123011800010-5.

## Литература/References

- Антошкина А. И., Салдин В. А., Никулова Н. Ю., Сандула А. Н., Пономаренко Е. С., Шадрин А. Н., Шеболкин Д. Н., Канева Н. А. Осадконакопление в палеозойской истории Североуральского региона: направления исследований, результаты, проблемы и задачи // Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-Востока России: Материалы 16 Геол. съезда Республики Коми. Сыктывкар: 2014. Т. 2. С. 233–236.
- Antoshkina A. I., Saldin V. A., Nikulova N. Yu., Sandula A. N., Ponomarenko E. S., Shadrin A. N., Shebolkin D. N., Kaneva N. A. Sedimentation in the Paleozoic history of the North Ural region: research directions, results, problems and tasks. Geology and mineral resources of the European Northeast of Russia. Proc. of the 16<sup>th</sup> Geological Congress of the Komi Republic. Syktyvkar, 2014, V. 2, pp. 233–236. (in Russian)
- Антошкина А. И., Салдин В. А., Сандула А. Н., Никулова Н. Ю., Пономаренко Е. С., Шеболкин Д. Н., Шадрин А. Н., Канева Н. А. Палеозойское осадконакопление на внешней зоне шельфа пассивной континентальной окраины северо-востока Европейской платформы. Сыктывкар: Геопринт, 2011. 200 с.
- Antoshkina A. I., Saldin V. A., Sandula A. N., Nikulova N. Yu., Ponomarenko E. S., Shebolkin D. N., Shadrin A. N., Kaneva N. A. Paleozoic sedimentation on the outer shelf zone of the passive continental margin of the Northeastern European Platform. Syktyvkar: Geoprint, 2011, 200 pp. (in Russian)
- Варсановьева В. А. Геологическое строение территории Печорско-Ыльчского государственного заповедника // Тр. Печорско-Ыльчского гос. заповедника. Вып. 1. М.: 1940. С. 5–214.
- Varsanofyeva V. A. Geological structure of the territory of the Pechora-Ylych State Reserve. Proc. Pechora-Ylych State Reserve, Issue 1, Moscow, 1940, pp. 5–214. (in Russian)
- Варсановьева В. А., Раузер-Черноусова Д. М. К характеристике среднекаменноугольных отложений р. Илыч // Сборник трудов по геологии и палеонтологии. Сыктывкар: Полиграфиздата, 1960. С. 94–126.
- Varsanofyeva V. A., Rauser-Chernousova D. M. To the characteristics of the middle carboniferous deposits of the Ilych river. Collection of works on geology and paleontology. Syktyvkar: Polygraphizdat, 1960, pp. 94–126. (in Russian)
- Калашиников Н. В. Экосистемы раннего карбона Европейского Севера России. Екатеринбург: УрО РАН, 2005.
- Kalashnikov N. V. Ecosystems of the Early Carboniferous of the European North of Russia. Yekaterinburg: UB RAS, 2005. (in Russian)
- Муравьев И. С. Карбон Печорского Приуралья. Казань: Изд-во Казанского университета, 1968. 226 с.
- Muravyev I. S. Carbon of the Pechora Urals. Kazan: Kazan University Press, 1968, 226 pp. (in Russian)
- Пономаренко Е. С. Особенности строения микробных образований в системе «риф — лагуна» (на примере верхнедевонского рифового комплекса Седью, Южный Тиман) // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2019. № 8. С. 14–19.
- Ponomarenko E. S. Features of the structure of microbial formations in the «reef-lagoon» system (example of the Upper Devonian reef complex Sedyu, South Timan). Vestnik IG Komi SC UB RAS, 2019, No. 8, pp. 14–19. (in Russian)
- Пономаренко Е. С., Антоновская Т. В. Верхнедевонские разнофациальные отложения Южного Тимана // Путеводитель полевой экскурсии Всероссийского литологического совещания «Геология рифов» 10–14 июня 2015 г. Сыктывкар: Геопринт, 2015. 35 с.
- Ponomarenko E. S., Antonovskaya T. V. Upper Devonian different facies deposits of the Southern Timan. Field tour guide of the All-Russian Lithological Meeting «Reef Geology» June 10–14, 2015 Syktyvkar: Geoprint, 2015, 35 pp. (in Russian)
- Пономаренко Е. С., Иванова Р. М., Сандула А. Н. Первые находки Камаена (Chlorophyta) в серпуховских отложениях (разрез «Уньинская Пещера», Северный Урал) // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2015. № 7. С. 3–8.
- Ponomarenko E. S., Ivanova R. M., Sandula A. N. The first finds of Kamaena (Chlorophyta) in Serpukhov deposits (section «Uninskaya cave», Northern Urals). Vestnik of IG Komi SC UB RAS, 2015, No. 7, pp. 3–8. (in Russian)
- Пономаренко Е. С., Иванова Р. М. Литология и стратиграфия верхнесерпуховско-нижнебашкирских отложений в разрезе Пача-шор (р. Илыч, Северный Урал) // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2017. № 7. С. 28–37.
- Ponomarenko E. S., Ivanova R. M. Lithology and stratigraphy of the Upper Serpukhovian-Lower Bashkirian deposits at the Pacha-shor section (Ilych River, Northern Urals). Vestnik IG Komi SC UB RAS, 2017, No. 7, pp. 28–37. (in Russian)
- Пономаренко Е. С., Матвеев В. А. Микроструктуры некоторых строматолитов и их влияние на морские бентосные сообщества палеозоя Восточно-Европейской платформы // Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского сегмента: Информ. материалы 24 науч. конф. Сыктывкар: Геопринт, 2015. С. 11–17.
- Ponomarenko E. S., Matveev V. A. Microstructures of some stromatolites and their influence on marine benthic communities of the Paleozoic of the East European Platform. Structure, substance, history of the lithosphere of the Timan-North Ural segment. Proc. of the 24th scientific conference. Syktyvkar: Geoprint, 2015, pp. 11–17. (in Russian)
- Шадрин А. Н. Визейские карбонатные отложения нижнего течения р. Б. Шежим (Северный Урал) // Структура,





- вещество, история литосферы Тимано-Североуральского сегмента: Информ. материалы 18 науч. конф. Института геологии Коми НЦ УрО РАН. Сыктывкар: Геопринт, 2009. С. 198–199.
- Shadrin A. N. Visean carbonate sediments of the lower reaches of the Bol'shoj Shezhim river (Northern Urals). Structure, substance, history of the lithosphere of the Timan-North Ural segment. Inform. Proc. of the 18th Scientific Conference of the Institute of Geology of Komi SC UB RAS. Syktyvkar: Geoprint, 2009, pp. 198–199. (in Russian)
- Шадрин А. Н. Верхневизейские отложения р. Илыч (нижний карбон, Северный Урал) // Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского сегмента: Информ. материалы 24 науч. конф. Института геологии Коми НЦ УрО РАН. Сыктывкар: Геопринт, 2015. С. 166–169.
- Shadrin A. N. Upper Visean deposits of the Ilych river (lower Carboniferous, Northern Urals). Structure, substance, history of the lithosphere of the Timan-North Ural segment. Inform. Proc. of the 24th Scientific Conference of the Institute of Geology of Komi SC UB RAS. Syktyvkar: Geoprint, 2015, pp. 166–169. (in Russian)
- Шадрин А. Н., Сандула А. Н. Строение визейско-серпукховских отложений восточной полосы выходов бассейна р. Илыч // Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского сегмента: Информ. материалы 16 науч. конф. Института геологии Коми НЦ УрО РАН. Сыктывкар: Геопринт, 2007. С. 221–224.
- Shadrin A. N., Sandula A. N. Structure of the Visean-Serpukhov deposits of the eastern band of the Ilych river basin outlets. Structure, substance, history of the lithosphere of the Timan-North Ural segment. Inform. Proc. of the 16th Scientific Conference of the Institute of Geology of Komi SC UB RAS. Syktyvkar: Geoprint, 2007, pp. 221–224. (in Russian)
- Шадрин А. Н., Сандула А. Н. Визейские карбонатные отложения в бассейне р. Илыч (Северный Урал): литология, изотопия, эволюция осадконакопления // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2018. № 5. С. 13–21.
- Shadrin A. N., Sandula A. N. Visean carbonate deposits in the Ilych River basin (Northern Urals): lithology, isotopy, evolution of sedimentation. Vestnik IG Komi SC UB RAS, 2018, No. 5, pp. 13–21. (in Russian)
- Шадрин А. Н., Сандула А. Н. Строение разреза нижнекарбонноугольных отложений известнякового типа в бассейне р. Унья (Северный Урал) // Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-Востока России: Материалы 17 Геологического съезда Республики Коми. Сыктывкар: Геопринт, 2019. Т. 2. С. 233–235.
- Shadrin A. N., Sandula A. N. Structure of the section of lower carboniferous limestone deposits in the basin of the Unya River (Northern Urals). Geology and mineral resources of the European North-East of Russia. Proc. of the 17th Geological Congress of the Komi Republic. Syktyvkar: Geoprint, 2019, V. 2, pp. 233–235. (in Russian)
- Шадрин А. Н., Сандула А. Н. Литогенетические особенности верхневизейских отложений известнякового типа верхней Печоры (Северный Урал) // От анализа вещества — к бассейновому анализу: Материалы 13 Уральского литологического совещания. Екатеринбург: ИГТ УрО РАН, 2020. С. 298–300.
- Shadrin A. N., Sandula A. N. Lithogenetic features of the Upper Visean limestone deposits of the Upper Pechora (Northern Urals). From substance analysis to basin analysis. Proc. of the 13th Ural Lithological Meeting. Yekaterinburg: IGG UB RAS, 2020, pp. 298–300. (in Russian)
- Юдин В. В. Варисциды Северного Урала. Л.: Наука, 1983. 173 с.
- Yudin V. V. Variscids of the Northern Urals. Leningrad: Nauka, 1983, 173 pp. (in Russian)
- Pratt B. R. The origin, biota and evolution of deep-water mudmounds. In: Carbonate Mud Mounds. Their origin and evolution. (Ed. by C. L. V. Monty, D. W. J. Bosence, P. H. Bridges, B. R. Pratt). Spec. Publ. Int. Assoc. Sedim., 1995. V. 23. P. 49–123.
- Riding, R. Classification of microbial carbonates. In Riding, R., (ed.), Calcareous algae and stromatolites. Berlin: Springer-Verlag, 1991. P. 21–51.
- Riding R. Microbialites, stromatolites and thrombolites. Encyclopedia of Geobiology. J. Reitner, V. Thiel (eds). Encyclopedia of Earth Science Series. Springer, Heidelberg, 2011. P. 635–654.
- Turner E. C., James N. P., Narbonne G. M. Taphonomic Control on Microstructure in Early Neoproterozoic Reefal Stromatolites and Thrombolites. Palaios, 2000. V. 15. P. 87–111.

Поступила в редакцию / Received 16.11.2023

## Строматолиты из нового местонахождения на Среднем Тимане: их морфологические и структурные особенности

Е. В. Антропова

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

В статье приведены результаты макро- и микроскопического изучения рифейских строматолитов павьюгской свиты из нового местонахождения на левом берегу р. Ворыквы (Средний Тиман). Stromatolites образуют строматолитовый биогерм, где находятся в прижизненном положении (ориентированы по плоскости нарастания). Stromatolites характеризуются различным составом и зернистостью. В микрозернистых слоях установлены сгустковидные органогенные образования. Отмечены многочисленные следы вторичных преобразований, такие как пиритизация, доломитизация по оболочкам, образование фенестр. Таксономическая принадлежность строматолитов к видам *Gimnosolen* sp. и *Inseria djeimi* Raab. позволяет датировать вмещающие отложения поздним рифеем. Сходный комплекс известен из верхней части павьюгской свиты, однако в нем колонии строматолитов ориентированы беспорядочно, что свидетельствует об обстановках окраины органогенных построек.

**Ключевые слова:** строматолиты, быстринская серия, гимносолениды, корреляционный уровень, микробиальные образования, Средний Тиман.

## A new location of stromatolites in the Middle Timan: their morphological and structural features

E. V. Antropova

Institute of Geology, Komi Science Center, Ural RAS, Syktывkar, Russia

The paper presents the results of macroscopic and microscopic study of Riphean stromatolites of the Pavyuga Formation from a new locality on the left bank of the Vorykva River (Middle Timan). The stromatolites form a stromatolite bioherm. The microstructure of the stromatolite assemblages is characterised by layering of different composition and granularity; traces of organogenic formations of clotted and filamentous type were found in microgranular interlayers. Numerous traces of secondary transformations, such as pyritization, dolomitization on shells, and fenestra formation, were noted. The taxonomic affiliation of the stromatolites to the species *Gimnosolen* sp. and *Inseria djeimi* Raab. allows dating to the Late Riphean. A similar association is known from the upper part of the Pavyuga Formation, but the colonies of stromatolites are orientated disorderly in that association, which indicates the environment of the organogenic buildup margins.

**Keywords:** *Stromatolithes*, *Bystrinsk Group*, *correlation*, *microbial structure*, *Middle Timan*.

### Введение

По результатам полевых работ 2022 г. на р. Ворыквы было обнаружено местонахождение столбчатых строматолитов хорошей сохранности (рис. 1). Согласно известному исследователю рифейских строматолитов М. Е. Раабен, именно столбчатые строматолиты имеют исключительно большое значение для стратиграфии докембрия (Раабен, 1969).

Так как строматолиты занимают среди органических остатков докембрия одно из первых мест по широте распространения и степени изученности, именно они были положены в основу выделения в рифее трех крупных подразделений. Сейчас, когда к изучению докембрия привлечены методы био- и хемотратиграфии, а также абсолютной геохронологии, значение строматолитов снизилось. Тем не менее они по-прежнему используются для корреляции удалённых осадочных последовательностей. Обнаруженное местонахождение добавило еще одну реперную точку

в состав известной строматолитовой формации, которая прослеживается вдоль Главного Тиманского разлома (Раабен, 2007; Кочетков, Иванов, 2009) и является биостратиграфическим маркером для корреляции рифейских отложений.

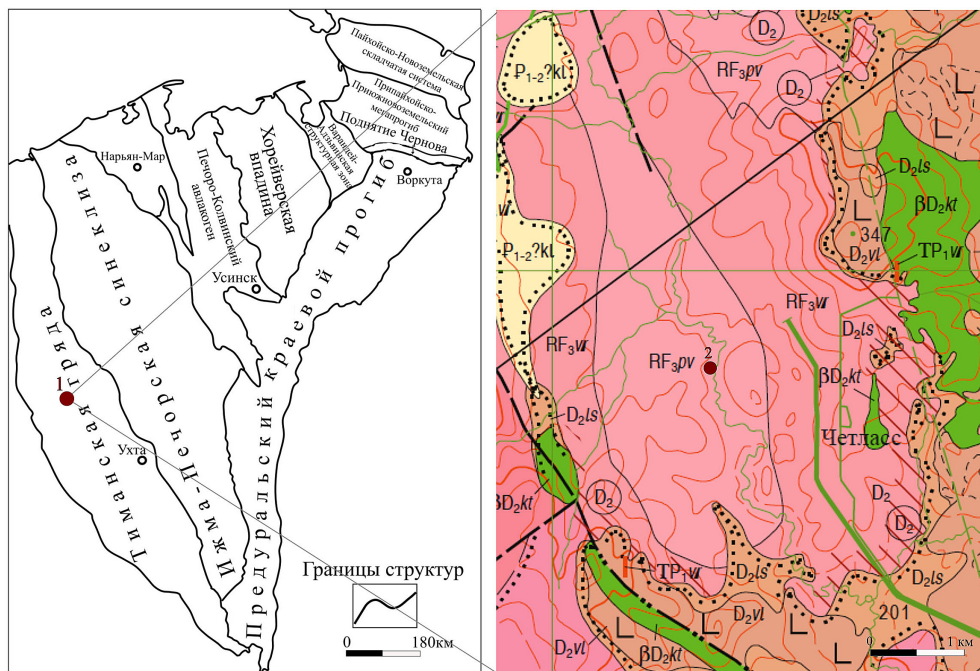
Несмотря на то, что выходы строматолитовых известняков известны во многих районах Среднего Тимана, конкретные стратиграфические уровни не всегда исследовались достаточно полно или не изучались вообще. Указанное местонахождение, как и расположенный в 600 м выше по течению выход строматолитовых известняков, отмеченный В. М. Пачуковским при проведении геологической съемки в 1957 г., не изучались, поэтому данные являются новыми.

Цель настоящей работы заключается в характеристике строматолитов павьюгской свиты Среднего Тимана из местонахождения на р. Ворыквы, основанной на полевых наблюдениях и микроскопических методах.

**Для цитирования:** Антропова Е. В. Stromatolites из нового местонахождения на Среднем Тимане: их морфологические и структурные особенности // Вестник геонаук. 2023. 12(348). С. 24–29. DOI: 10.19110/geov.2023.12.3

**For citation:** Antropova E. V. A new location of stromatolites in the Middle Timan: their morphological and structural features. Vestnik of Geosciences, 2023, 12(348), pp. 24–29, doi: 10.19110/geov.2023.12.3





**Рис. 1.** Положение изученного местонахождения на Среднем Тимане (а); точка наблюдения на р. Ворыква (б). RF<sub>3</sub>vr — ворыквинская свита, RF<sub>3</sub>pv — павьюгская свита (карта по данным А. А. Пархачева)

Условные обозначения: 1 — известняк строматолитовый; 2 — известняк доломитизированный строматолитовый; 3 — перерыв

**Fig. 1.** Position of the studied locality in the Middle Timan (a); point on the Vorykva River (b). RF<sub>3</sub>vr — Vorykva Formation, RF<sub>3</sub>pv — Pavyuga Formation (map based on data of A. A. Parkhachev)

Legend: 1 — stromatolite limestone; 2 — dolomitized stromatolite limestone; 3 — gap

### Объекты и методы исследований

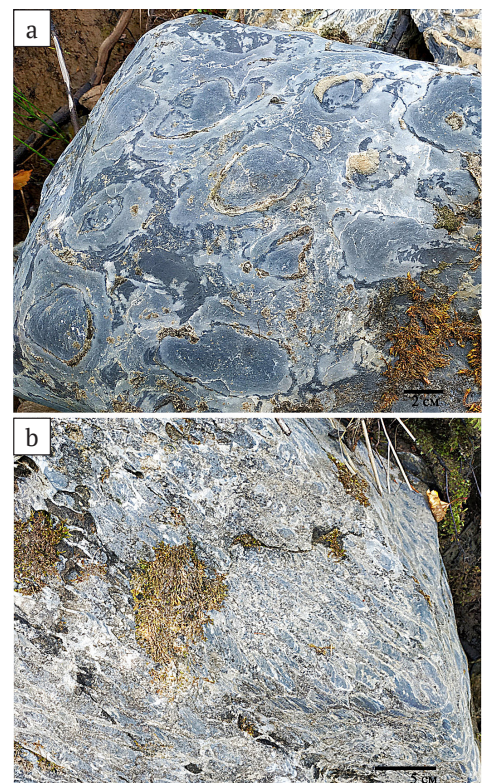
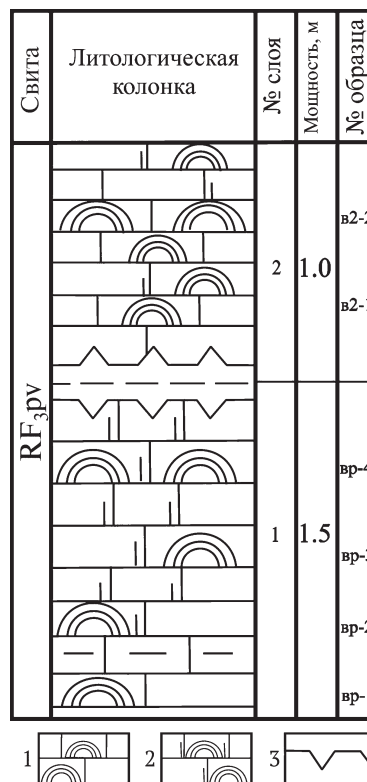
Выходы строматолитовых пород находятся по левому берегу р. Ворыква (координаты — N64°19'8", E51°4'23"). На основании литологических отличий вмещающих пород и внешнего вида строматолитовых построек выделены два слоя (рис. 2). В слое 1 мощностью до 1.5 м породы представлены известняками, доломитизированными известняками, известковыми песчаниками разномерными, серыми и темно-серыми неравномерно окрашенными. Строматолиты имеют диаметр 1.5–2 см. Слой 2 мощностью ~1 м сложен светлыми и доломитизированными известняками, мелкозернистыми и тонкослоистыми. Строматолиты здесь имеют диаметр до 12 см.

В породах часто встречаются слойки с белым крупнозернистым доломитом, невооруженным глазом фиксируются скопления терригенного материала и стяжения пирита.

Изучение строматолитов как органоседиментационных объектов проводилось с помощью сравнительно-морфологического метода, применяемого к остаткам ископаемых организмов. Установление морфологических особенностей, прослеживание их изменчивости внутри выборок и по разрезу позволяют выделять виды.

**Рис. 2.** Обнажение на р. Ворыква — литологическая колонка и внешний вид строматолитов в разрезе: а — *Inseria djajimi* Raab., слой 2; б — *Gimnosolen* sp., слой 1

**Fig. 2.** Vorykva River outcrop — lithologic column and appearance of stromatolites in section: а — *Inseria djajimi* Raab., layer 2; б — *Gimnosolen* sp., layer 1





Исследование строматолитов производилось в два этапа: макро- и микроскопически. На макроскопическом этапе фиксировались форма строматолитовых слоев, характер нарастания в процессе образования постройки, форма столбика, характер бокового ограничения, характер ветвления.

Для микроскопического описания строматолитов из каждого образца изготавливалось два взаимно-перпендикулярных шлифа. Шлифы изучались при увеличении в 10–30 раз в зависимости от степени тонкости структуры объекта (микроскоп бинокулярный Olimpus-SZ61 с системой визуализации). Для предварительного определения все шлифы фотографировались (цифровая окулярная USB-камера Альтами-UHCCD 5.0 Мпикс, программа для управления камерами и анализа изображений Altami Studio-2015), что позволило проводить сравнение сходных форм. При анализе и фотографировании также использовался микроскоп Полам-215 с системой фото- и видеофиксации LOMO-Microsystems MCview (MC-20). Сканирование шлифов производилось на сканере Canon 9000F Mark II.

### Результаты и их обсуждение

Обнаруженный выход представляет собой органогенную постройку, состоящую из столбчатых строматолитов, сохранившихся в прижизненном положении. Образования неветвящиеся, диаметром до 1.5 см в нижней части разреза (сл. 1), до 12 см в диаметре в верхней части (сл. 2). Форма столбиков строматолитов цилиндрическая, в редких случаях (около 2 %) дилатантная (ложноцилиндрическая). То есть в целом в процессе роста столбики строматолитов не увеличивали свою площадь, соответственно и биогерм не разрастался, а оставался в своих площадных границах. Поверхность столбиков гладкая, редко местами ослож-

ненная небольшими натеками, бугорками, но четко отграниченная от вмещающей породы.

В поперечном разрезе биогерма наблюдаются недоразвитые столбики строматолитов, прекратившие свой рост раньше других и заканчивающиеся в породе. Отмечена выдержанность форм строматолитов в органогенной постройке.

Особенностью строматолитов этого местонахождения является формирование светло-коричневых корочек, оторачивающих каждый столбик (рис. 3). Они имеют доломитовый состав и отличаются большей устойчивостью к процессам выветривания, поэтому на поверхностях биогерма, подвергшихся влиянию среды, приобретают форму кубков (рис. 3, в, с). Необходимо отметить, что микроструктурные элементы строматолитов (ламинаы) продолжают в этой каемке (рис. 4, 1а, 2а, 3а).

Микротекстура определяется чередованием слоев двух типов — темных микрозернистых и светлых, перекристаллизованных с терригенной составляющей (рис. 4, 2–4). Микроструктура слоев ступчатая (рис. 5). Присутствуют лентовидные образования углеродистого вещества (рис. 5, б). Также присутствуют темные компоненты текстуры округлой формы или в виде слипшихся комочков (рис. 5, 1).

Пиритизация в породах развита сильно, но неравномерно (рис. 5, 9). Внутри органогенных слоев зерна пирита ориентированы согласно общей слоистости. Приуроченность пирита к темным микрозернистым слоям говорит о его генетической связи с первичным органическим веществом и о восстановительных условиях среды.

В доломитизированных оторочках столбиков часто встречаются фенестры — полости до 4 мм в диаметре, заполненные крупными кристаллами доломита (рис. 4, 2, 3; рис. 5, 8). Они присутствуют практиче-

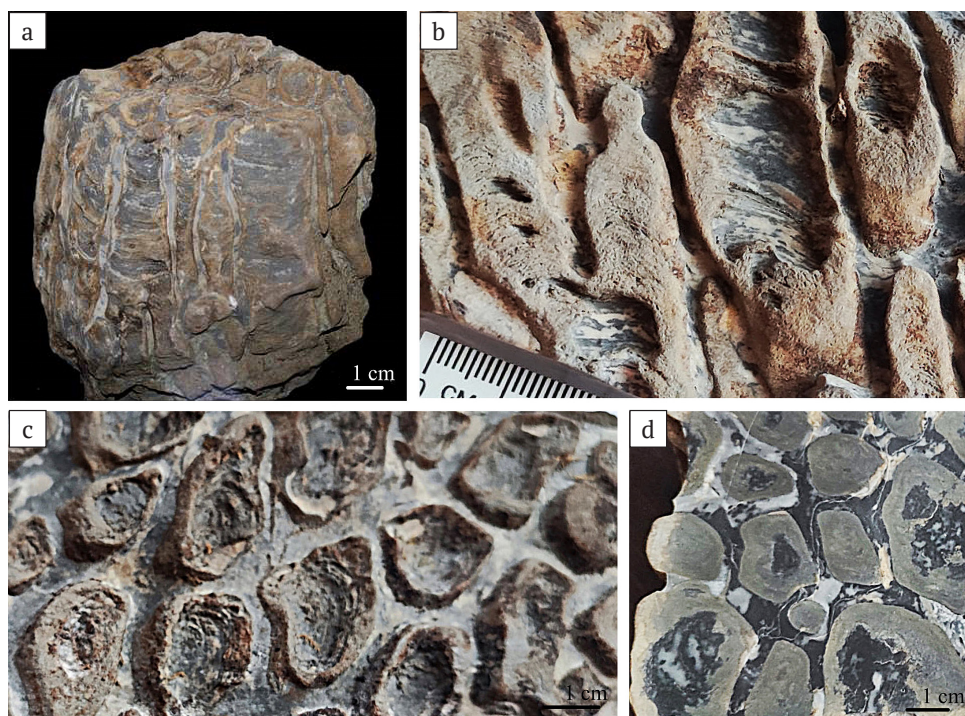


Рис. 3. Особенности внешнего вида строматолитов: а — *Inseria djejimi* Raab., обр. В2–2; б–д — *Gimnosolen* sp., обр. Вр-4

Fig. 3. Features of the external structure of stromatolite: а — *Inseria djejimi* Raab., B2–2; б–д — *Gimnosolen* sp., Bp-4





ски во всех образцах. Наличие фенестр исследователи обычно рассматривают в связи с проявлениями вторичных процессов в доломитах рифея (Антошкина и др., 2015; Шалдыбин, 2017).

По микроструктурным особенностям и внешнему строению определена таксономическая принадлежность строматолитов к *Gimnosolen* sp. и *Inseria djejmimi* Raab., они оба являются представителями гимносоленид (Раабен, 1969).

На Тимане гимносолениды известны из быстринской свиты Южного Тимана и на поднятии Жежимпарма, где присутствуют *G. asimmetricus* Raab., *G. ramsayi* Steinmann, *G. uralicus* (Kryl.), *Inseria djejmimi* Raab. (Раабен, 1969). Элементы этого же комплекса встречаются и на Среднем Тимане (Раабен, 1997).

Быстринская серия (RF<sub>3</sub>bs) на Среднем Тимане отнесена к комплексу отложений верхнего рифея, в которые входят аньюгская (RF<sub>3</sub>an), ворыквинская (RF<sub>3</sub>vr), рочугская (RF<sub>3</sub>rch), павьюгская (RF<sub>3</sub>pv) и паунская (RF<sub>3</sub>pn) свиты (Журавлев и др., 1966; Раабен, 1975; Гецен, 1975; Рифей и венд..., 1987; Государственная..., 2016; Оловянишников, 1998; Легенда..., 1999).

Распространение гимносоленид на Среднем Тимане приурочено к ворыквинской и павьюгской свитам. Ворыквинская свита содержит уровень с гимносоленидами *Inseria tjomusi* Kryl., *Jurusania nisivensis* Raab., являющимися руководящими формами для верхнего рифея (Раабен, 1969). В целом строматолиты распространены в разрезе павьюгской свиты, а гимносолениды приурочены к определенным её пачкам. В отложениях свиты описаны три горизонта со столбчатыми строматолитами. Мощность в них строматолитовых слоев составляет, как правило, 0.5–0.7 м (Изучение..., 1980\*).

Павьюгская свита принадлежит к рифогенной формации, образованной органогенными постройками, склоновыми фациями и фациями подножья органогенных построек (Черный, 1987). Многими исследователями отмечается присутствие строматолитовых конгломератов (Э. А. Кальберг, 1948; Черный, 1987; М. Е. Раабен и Л. И. Опаренкова, 1997). Определенные из таких обломочных пород окатанные строматолиты относятся, как правило, к роду *Gimnosolen* (Изучение..., 1980\*; Раабен, Опаренкова, 1997).

Низы павьюгской свиты сложены строматолитовыми доломитами, содержащими прослои с формами *Gimnosolen asimmetricus*

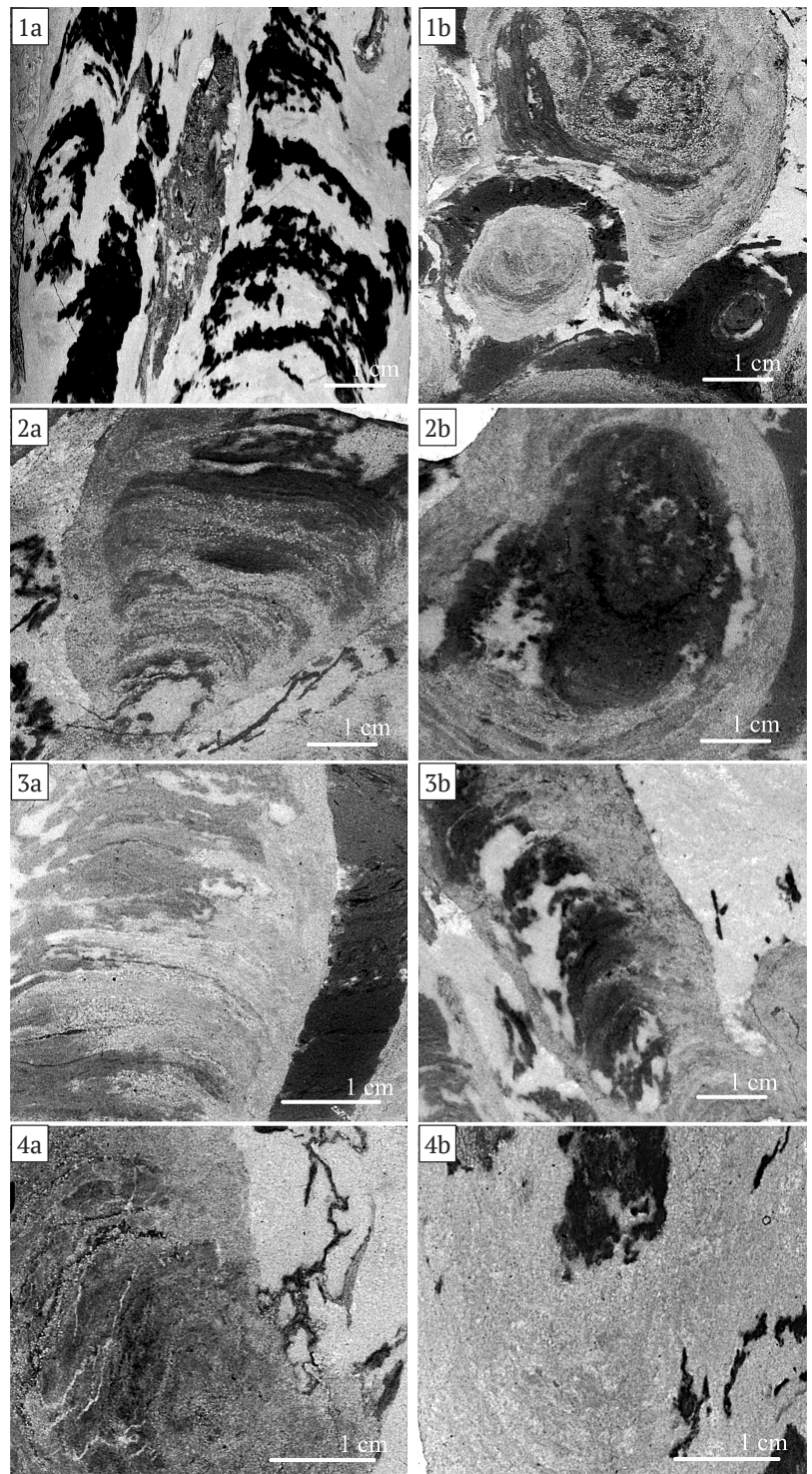


Рис. 4. Микротекстура строматолитов:

а — продольное сечение, б — поперечное

1 — переслаивание микробных слоев и слоев с терригенной составляющей, обр. Вр-1; 2 — облеkanie бокового края колонии, являющееся диагностическим признаком для *Inseria*, обр. В-в1; 3 — доломитизация окантовки и крупные кристаллы кальцита, обр. вр.-4; 4 — флексу-рообразные перегибы и выросты, обр. в-в2

Fig. 4. Microstructure of stromatolites:

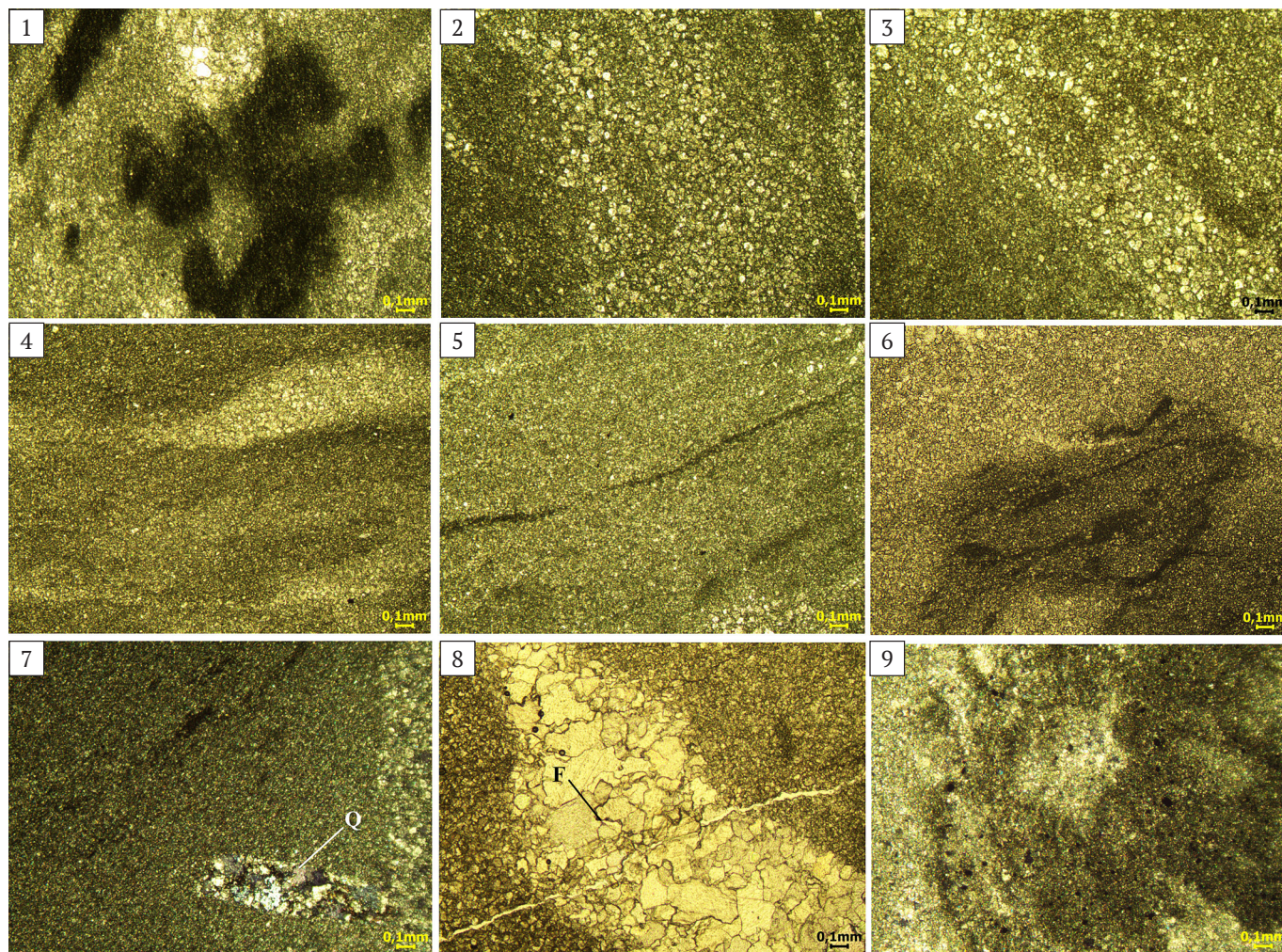
a — tangential section, b — radial section

1 — overmixing of microbial layers and layers with terrigenous component, Bp-1; 2 — cladding of the lateral edge of the colony, which is a diagnostic sign for *Inseria* B-в1; 3 — dolomitization of the rim and large calcite crystals in the colony body, Bp-4; 4 — flexural kinks and outgrowths, Bp-4. 4 — flexural kinks and outgrowths, fig. c-in2

\* Изучение докембрийских образований Среднего и Южного Тимана: Отчет / Отв. исп. В. Г. Черный, И. П. Черная, 1980 г.

\* Study of Precambrian formations of the Middle and Southern Timan: Report. Responsible executors Cherniy V. G., Chernaya I. P., 1980. (in Russian)





**Рис. 5.** Особенности строения строматолитов:

1 — темная микрослоистость, очевидно, органогенные прослои; 2, 3 — вид в шлифе доломитовой каёмки; 4, 5 — слоистость строматолита; 6 — лентовидные углеродистые прослои; 7 — обломок кварцита; 8 — фенестровая полость (F), заполненная крупными кристаллами доломита, и окружающая порода; 9 — пиритизация

**Fig. 5.** Textures of stromatolites:

1 — dark microlayering, obviously, organogenic interlayers; 2, 3 — dolomite rim view in schlioph; 4, 5 — stromatolite layering; 6 — ribbon-shaped carbonaceous interlayers; 7 — quartzite fragment; 8 — fenestral cavity filled with large dolomite crystals; 9 — pyritization

Raab., *Tungussia* sp. В средней части разреза — маломощный (0.6 м) горизонт с тем же таксономическим составом строматолитов, однако классифицированный как отложения зарифовых фаций, поскольку содержит разноориентированные окатанные столбики *Gimnosolen* и *Tungussia* (Изучение ..., 1980\*). В верхах павьюгской свиты таксономический состав гимносоленид несколько меняется: *Gimnosolen giganteus* Raab., *Inseria djejimi* Raab., *Parmites concrescens* Raab., что имеет сходство с определенным нами комплексом, особенно учитывая описания структуры и таксономического состава органогенных строматолитовых построек (Изучение..., 1980\*).

Поскольку имеются данные о широком развитии в пределах Тимана фациальных (латеральных) замещений, в частности в рядах рочугской — ворыквинской и павьюгской — паунской свит (Тиманский краж..., 2010), еще одно местонахождение хорошей сохранности дает возможность проследить строматолиты и их изменчивость в разных фациальных условиях, а сам факт нового местонахождения имеет большое значение для стратификации толщ Тимана.

## Выводы

Изучение микроструктуры строматолитов показало, что она представляет собой чередующиеся слойки, в более мелкозернистых слоях присутствуют следы органогенных остатков в виде сгустков или нитяных, лентовидных образований. Изученные строматолитовые образования претерпели длительный и сложный процесс вторичных изменений, который выразился в доломитизации стенок, пиритизации, а также в формировании многочисленных фенестровых полостей.

Таксономическая принадлежность строматолитов определена как виды *Gimnosolen* sp. и *Inseria djejimi* Raab., что подтверждает позднерифейский возраст и соответствие верхней части павьюгской свиты. Строматолитовый прослой является органогенной постройкой, имеет хорошую сохранность и прижизненное положение столбиков в противовес зафиксированным в других разрезах зарифовым отложениям с разноориентированными окатанными строматолитами, что имеет большое значение для прослеживания по латерали «рифогенной» формации.





Установленное новое местонахождение строматолитов — гимносоленид, имеющих важное значение для стратиграфии, дополняет данные о распространении «строматолитовой формации» и служит для расширения биостратиграфической характеристики павьюгской свиты.

Автор благодарит к. г.-м. н. Е. С. Пономаренко (Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН) за фото-графию шлифов и помощь в работе.

## Литература / Reference

- Антошкина А. И., Пономаренко Е. С., Канева Н. А. Фенестровые известняки: специфика позднедевонских морей, Тимано-Североуральский регион // Литология и минеральные ресурсы. 2014. № 6. С. 493—505.  
Antoshkina A. I., Ponomarenko E. S., Kaneva N. A. Fenestrian limestones — specifics of Late Devonian seas, Timan-North Ural region, 2014, No. 6, pp. 493—505. (in Russian)
- Брусницына Е. А., Ершова В. Б., Худолей А. К., Андерсен Т., Маслов А. В. Возраст и источники сноса пород четласской серии (рифей) Среднего Тимана по результатам U-TN-PB (LA-ICP-MS)-датирования обломочных цирконов // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2021. Т. 29. № 6. С. 3—23.  
Brusnitsyna E. A., Ershova V. B., Khudoley A. K., Andersen T., Maslov A. V. Age and sources of demolition of rocks of the Chetlas series (Riphean) of the Middle Timan based on the results of U-TN-PB (LA-ICP-MS) dating of clastic zircons. Stratigraphy. Geological Correlation, 2021, V. 29, No. 6, pp. 3—23. (in Russian)
- Верхний докембрий Европейского Севера СССР: Объяснительная записка к схеме стратиграфии / Ред. В. А. Дедеев, Б. М. Келлер. Сыктывкар: Ин-т геологии Коми фил. АН СССР, 1986. 40 с.  
Upper Precambrian of the European North of the USSR: (Explanatory note to the scheme of stratigraphy). Edited by V. A. Dedeev. V. A. Dedeev, B. M. Keller. Syktyvkar: Institute of Geology, Komi Branch of USSR AS, 1986, 40 p. (in Russian)
- Государственная геологическая карта Российской Федерации 1:1000000 (третье поколение). Лист Q-39 (Нарьян-Мар): Объяснительная записка / Ред. К. Э. Якобсон СПб.: Картфабрика ВСЕГЕИ, 2016. 517 с.  
State geological map of the Russian Federation 1:1000000 (third generation). Sheet Q-39 (Naryan-Mar): Explanatory note. Ed. Yakobson K. E. St. Petersburg: VSEGEI, 2016, 517 p. (in Russian)
- Кальберг Э. А. Новые данные по стратиграфии и тектонике Среднего Тимана // Советская геология. Т. 33. 1948. С. 31—44.  
Kalberg E. A. New data on stratigraphy and tectonics of the Middle Timan. Soviet geology. V. 33, 1948, pp. 31—44. (in Russian)
- Кочетков О. С., Иванов Н. Ф. О некоторых аспектах формационно-геоструктурного развития Варангер-Тиманского подвижного пояса байкалид // XV Геологический съезд Республики Коми. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2009. Т. 2. С. 124—127.  
Kochetkov O. S., Ivanov N. F. On some aspects of the formation-geostuctural development of the Varanger-Timan mobile belt of baikalids. XV Geological Congress of the Komi Republic. Syktyvkar: IG Komi SC UB RAS, 2009, V. 2, pp. 124—127. (in Russian)
- Легенда Тиманской серии листов Гос. геол. карты РФ масштаба 1:200 000 (издание второе). Ухта: Геолог-1, 1999: В 2 кн. Кн. 1. Объяснительная записка, 161 с. Кн. 2. Легенда, 17 с.  
Legend of the Timan series of sheets of the State Geological Map of the RF at a scale of 1:200,000 (second edition). Ukhta: Geolog-1, 1999. In 2 books. Book 1. Explanatory note, 161 p. Book 2. Legend, 17 p. (in Russian)
- Оловянишников В. Г. Верхний докембрий Тимана и полуострова Канин. Екатеринбург, 1998. 194 с.  
Olovyanishnikov V. G. Upper Precambrian of Timan and Kanin Peninsula, 1998, 194 p. (in Russian)
- Раабен М. Е. Строматолиты верхнего рифея (гимносолениды) // Труды ГИН РАН. Вып. 203. М.: Наука, 1969. 124 с.  
Raaben M. E. Stromatolites of the Upper Riphean (Gymnosolenids). Proceedings of GIN RAS, 203. Moscow: Nauka, 1969, 124 p. (in Russian)
- Раабен М. Е. Строматолитовые формации рифея в обрамлении Восточно-Европейской платформы // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2007. Т. 15. № 1. С. 35—46.  
Raaben M. E. Stromatolite formations of the Riphean in the East European Platform framing // Stratigraphy. Geological Correlation. 2007, V. 15, No. 1, pp. 35—46. (in Russian)
- Раабен М. Е., Опаренкова Л. И. Новые данные к стратиграфии рифея Тимана // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 1997. Т. 2. № 2. С. 13—20.  
Raaben M. E., Oparenkova L. I. New data to the stratigraphy of the Timan Riphean // Stratigraphy. Geological Correlation. V. 2, No. 2, 1997, pp. 13—20. (in Russian)
- Рифей и венд Европейского Севера СССР / В. Г. Гецен, В. А. Дедеев и др. Вологда, 1987. 124 с.  
Riphean and Vendian of the European North of the USSR. V. G. Getsen, V. A. Dedeev et al., Vologda, 1987, 124 p. (in Russian)
- Тиманский кряж: В 2 т. Т. 1. История, география, жизнь: монография. Ухта: УГТУ, 2008. 339 с.: ил.  
Timansky Kryazh. In 2 vol. V. 1. History, geography, life: monograph. Ukhta: USTU, 2008, 339 p. (in Russian)
- Шалдыбин М. В. Фенестровые структуры рифейских карбонатных пород Юрубчено-Тохомской зоны // Геология нефти и газа. 2017. № 3. С. 61—68.  
Shaldybin M. V. Fenestral structures of Riphean carbonate rocks of the Yurubcheno-Tokhom zone. Geology of Oil and Gas, 2017, No. 3, pp. 61—68. (in Russian)

Поступила в редакцию / Received 7.11.2023

## Позднедевонская плюмовая Цилемская дайка (Средний Тиман): обоснование геодинамической природы и возраста

А. С. Шуйский<sup>1</sup>, К. В. Куликова<sup>1</sup>, О. В. Удоратина<sup>1</sup>, В. А. Лебедев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар

*self88@yandex.ru, udoratina@geo.komisc.ru, fopolina1@yandex.ru*

<sup>2</sup> Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва  
*leb@igem.ru*

Трахиты цилемской дайки Среднего Тимана относятся к породам шшонитовой серии. Они имеют микропорфировую с бостонитовой основной массой структуру. В трахитах установлены две разновидности калиевого полевого шпата. Лейсты основной массы сложены магматическим санидином, а мелкие зерна по краям субизометричных выделений позднего кварца – гидротермальным микроклином. Проведенное датирование трахитов K-Ar-методом дало возраст  $365 \pm 8$  млн лет, что позволяет считать, что внедрение щелочной дайки происходило в позднедевонское время.

**Ключевые слова:** Средний Тиман, трахиты, K-Ar-возраст, плюм.

## Late Devonian plume Tsilemsky dyke (Middle Timan): composition and K-Ar age

A. S. Shuisky<sup>1</sup>, K. V. Kulikova<sup>1</sup>, O. V. Udoratina<sup>1</sup>, V. A. Lebedev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar

<sup>2</sup> Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS, Moscow

The trachytes of the Tsilemsky Kamen of Middle Timan are rocks of the Shoshonitic series. The rocks have a microporphyry structure with a bostonite groundmass. Trachytes contain two varieties of potassium feldspar. The laths of the groundmass are composed of igneous sanidine, and the small grains along the edges of subisometric late quartz segregations are composed of hydrothermal microcline. Dating of trachytes by the K-Ar method gave an age of  $365 \pm 8$  Ma; the intrusion of the alkaline dike occurred in the Late Devonian. These rocks, along with trap basalts, recorded the occurrence of several pulses of plume magmatism on Timan in Devonian time.

**Keywords:** Middle Timan, trachytes, K-Ar age, plume.

### Введение

На Среднем Тимане довольно широко распространены позднепалеозойские породы основного состава (Тиманский кряж, 2010) нормальной щелочности, которые выделяются в составе трапповой формации (Макеев, 2008). Также на Среднем Тимане в составе как верхнедевонских стратифицированных толщ, так и секущих интрузивных тел известны щелочные разновидности пород, петрохимические характеристики которых соответствуют формации щелочных вулканитов (Макеев, 2008; Панева и др., 2016; Удоратина и др., 2019). Вулканиты и интрузии являются результатом проявления палеозойского внутриплитного магматизма (Степаненко, 2016) и фиксируют разновременные, на наш взгляд, плюмовые импульсы единого суперплюма. Возможность существования такого суперплюма для Восточно-Европейской платформы допускается и предполагается разделение суперплюма на несколько струй, сформировавших разрозненные внутриплитные магматические провинции (Малышев, Шипилов, 2002; Лобковский и др., 2004). Связка трапповой формации и формации щелочных вулканитов позволяет говорить о перспективах поис-

ков новых алмазоносных кимберлитовых трубок в данном районе.

В 70-х годах прошлого века при проведении геофизических работ были выявлены слабоманнитные аномалии субизометричной формы. При проверке этих аномалий в одном из тел (трубка Умбинская) была вскрыта кимберлитовая туфобрекчия, в которой был найден осколок алмаза. На данный момент это единственная находка коренных алмазов в трубках на Среднем Тимане, хотя россыпные алмазы в этом районе являются установленным фактом (Плякин, Ершова, 2011).

Целью исследования является определение петрографического, минералогического, химического состава и геодинамической типизации пород Цилемской дайки Среднего Тимана.

### Методы исследования

Минеральный состав, структурные и текстурные особенности пород изучались в шлифах под поляризационным микроскопом Olympus BX51. Определение химического состава и получение картин дифракции обратнорассеянных электронов минералов проводи-

**Для цитирования:** Шуйский А. С., Куликова К. В., Удоратина О. В., Лебедев В. А. Позднедевонская плюмовая Цилемская дайка (Средний Тиман): обоснование геодинамической природы и возраста // Вестник геонаук. 2023. 12(348). С. 30–36. DOI: 10.19110/geov.2023.9.4

**For citation:** Shuisky A. S., Kulikova K. V., Udoratina O. V., Lebedev V. A. Late Devonian plume Tsilemsky dyke (Middle Timan): composition and K-Ar age. Vestnik of Geosciences, 2023, 12(348), pp. 30–36, doi: 10.19110/geov.2023.9.4





лись на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega 3 LMN с энергодисперсионной приставкой Instruments X-Max и с детектором EBSD Nordlys (Oxford Instruments). Исследования проводились в ЦКП «Гео-наука» Института геологии Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар).

Определение возраста породы проводилось К-Аг-методом в лаборатории изотопной геохимии и геохронологии ИГЕМ РАН (г. Москва). Измерение содержания радиогенного аргона проводилось на масс-спектрометре МИ-1201 ИГ методом изотопного разбавления с применением в качестве трасера  $^{38}\text{Ar}$ ; определение калия — методом пламенной спектрофотометрии. При расчете возраста использованы константы:  $\lambda_K = 0.581 \cdot 10^{-10} \text{ год}^{-1}$ ,  $\lambda_{\beta-} = 4.962 \cdot 10^{-10} \text{ год}^{-1}$ ,  $^{40}\text{K} = 0.01167 \text{ (ат. \%)}$  (Чернышев и др., 2006).

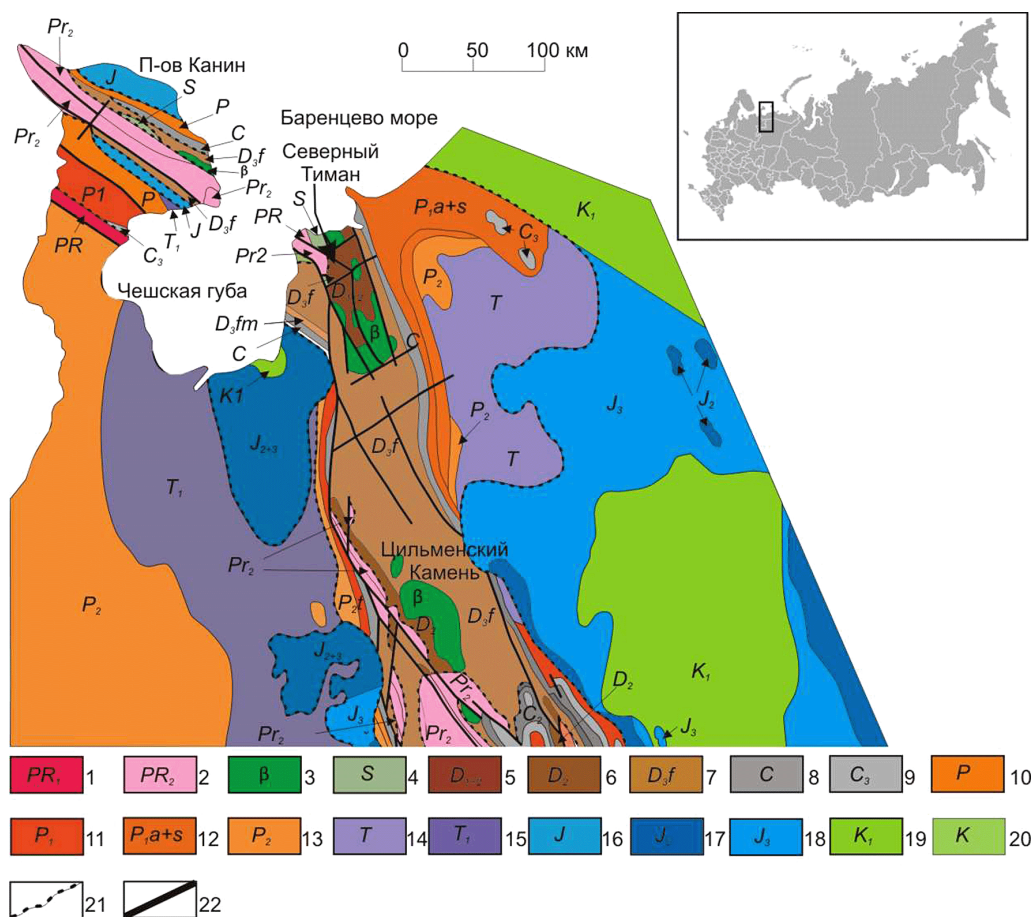
### Вещественный состав пород

На Среднем Тимане достаточно давно известны ультракалийевые магматические породы (Мальков, 1999; Макеев и др., 2008; Колониченко, 2009; Удоратина

и др., 2015; Udoratina et al., 2015, Udoratina et al., 2016, Куликова и др., 2017; Мяндин и др., 2018). Эти породы слагают дайки, трубки и межпластовые тела и имеют обычно основной состав (Удоратина и др., 2019). Отличаются более кислым составом дайка трахитов Четласского Камня верховья верхней Ворыквы и дайка трахитов Цилемского Камня правого притока реки Цильмы.

При проведении комплексных исследований на Среднем и Южном Тимане в 1984 году А. Р. Вильчиком была обнаружена дайка магматических пород, прорывающая среднедевонские аргиллиты, алевролиты, песчаники (Колониченко, Филиппов, 2009). Дайка вскрыта близ устья реки Ашуга (правого притока реки Цильмы) (рис. 1). При описании порода была названа ортоклазитом и в первом приближении определена идентичной микроклиниту или бостониту верхней Ворыквы. Таким образом, точная номенклатура породы не была установлена.

Для исследований нам были переданы образцы этих пород, отобранные Е. В. Колониченко из закопущки размером  $60 \times 80 \text{ см}$ .



**Рис. 1.** Геологическая карта-схема Тимана и п-ова Канин (Оловянишникова, 2007). Условные обозначения:

1 — нижний протерозой, 2 — верхний протерозой, 3 — нижний палеозой (базальты), 4 — силур, 5 — нижний и средний девон, 6 — средний девон, 7 — франский ярус, 8 — карбон, 9 — верхний карбон, 10 — пермь, 11 — нижняя пермь, 12 — ассельский и сакмарский ярус, 13 — верхняя пермь, 14 — триас, 15 — нижний триас, 16 — юра, 17 — средняя юра, 18 — верхняя юра, 19 — нижний мел, 20 — мел, 21 — несогласное залегание, 22 — разломы

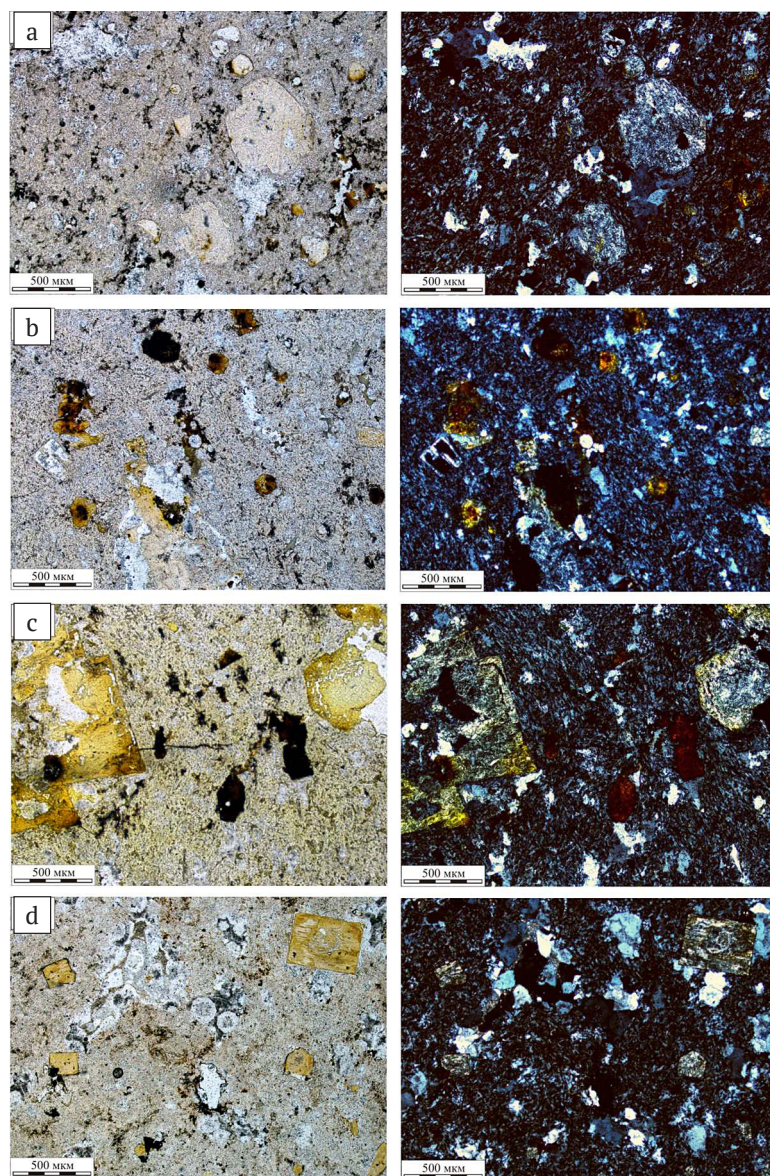
**Fig. 1.** Geological map — scheme of Timan and the Kanin Peninsula (Olovyanishnikov, 2007).

Legend: 1 — Lower Proterozoic, 2 — Upper Proterozoic, 3 — Lower Paleozoic (basalts), 4 — Silurian, 5 — Lower and Middle Devonian, 6 — Middle Devonian, 7 — Frasnian, 8 — Carboniferous, 9 — Upper Carboniferous, 10 — Permian, 11 — Lower Permian, 12 — Assel and Sakmarian stages, 13 — Upper Permian, 14 — Triassic, 15 — Lower Triassic, 16 — Jurassic, 17 — Middle Jurassic, 18 — Upper Jurassic, 19 — Lower Cretaceous, 20 — Cretaceous, 21 — unconformity, 22 — faults



**Рис. 2.** Петрографические особенности микропорфировых трахитов (в левом столбце без анализатора, в правом — с анализатором): а — вкрапленники калиевого полевого шпата; b, c, d — вкрапленники замещены агрегатом (бурый цвет) мусковита, шамозита и цеолита

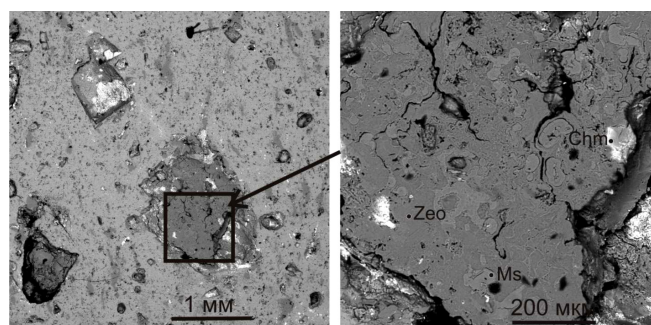
**Fig. 2.** Petrographic features of microporphyratic trachytes (left column without analyzer, right column with analyzer): a — K-feldspar phenocrysts; b, c, d — phenocrysts are replaced by an aggregate (brown color) of muscovite, chamosite, and zeolite



Был изучен петрографический, минералогический и химический состав пород дайки. Петрографически порода является микропорфировым трахитом. Порода имеет кавернозную текстуру, микропорфировую с микролитовой основной массой структуру. Порфировые, как правило субизометричные, вкрапленники размерами от 0.2 до 1.55 мм в количестве не более 10 % и микролиты представлены калиевым полевым шпатом (рис. 2). Минерал вкрапленников частично пелитизирован и замещен мелкозернистым агрегатом цеолитов. Основная масса породы сложена разноориентированными удлиненными лейстами с неровными волнистыми краями калиевого полевого шпата (до 90 об. %), такую структуру принято называть бостонитовой. Лейсты калиевого полевого шпата размером от  $0.2 \times 1$  до  $0.1 \times 0.3$  мм часто формируют простые полисинтетические двойники. В интерстициях между крупными табличками калиевого полевого шпата наблюдается гидрослюда, замещившая стекло. Внутри гидрослюда, а также изредка внутри лейст полевого шпата наблюдаются иголки апатита. Акцессорные минералы представлены фтор-апатитом, субмикронными редкоземельными (легкие РЗЭ) фазами с цирконием. Рудные минералы в большинстве случаев формируют агрегаты в виде взаимопрорастаний оксидных Fe-Ti-минеральных фаз — титаномagnetита и ильменита. Анатаз (согласно рентгеноструктурным данным) образует кристаллы субгидральной, реже ангидральной формы, его содержание не превышает 3 об. %. В породе наблюдается кварц в сростках с полевым шпатом, заполняющий либо целые полости, либо их края (рис. 2, b, d). Развитие этих минералов фиксирует, на наш взгляд, гидротермальные изменения породы.

Предыдущими исследованиями установлено, что основным минералом породы является калиевый полевой шпат, методом порошковой дифрактометрии он определяется как санидин. В химическом составе калиевого полевого шпата отмечается устойчивое содержание оксида натрия до 2 мас. %, реже отмечается присутствие оксида бария (0.3—0.9 мас. %), железа (0.2 до 0.7 мас. %) (Удоратина и др., 2018). Нашими исследованиями установлено, что вкрапленники калиевого полевого шпата часто замещены агрегатом шамозита, мусковита и цеолита (рис. 3 и табл. 1). Эти же минералы заполняют интерстиции между микролитами полевого шпата. При проведении рентгенофазовых

исследований методом дифракции отраженных электронов (EBSD) были установлены два типа калиевого полевого шпата, кристаллизовавшегося при затвердении расплава (санидин) и на стадии постмагматической гидротермальной переработки породы (микроклин). Санидин образует лейсты (рис. 4, a, b) основной



**Рис. 3.** Замещение вкрапленника агрегатом вторичных минералов (фото в обратноотраженных электронах). Zeo — цеолит, Chm — шамозит, Ms — мусковит

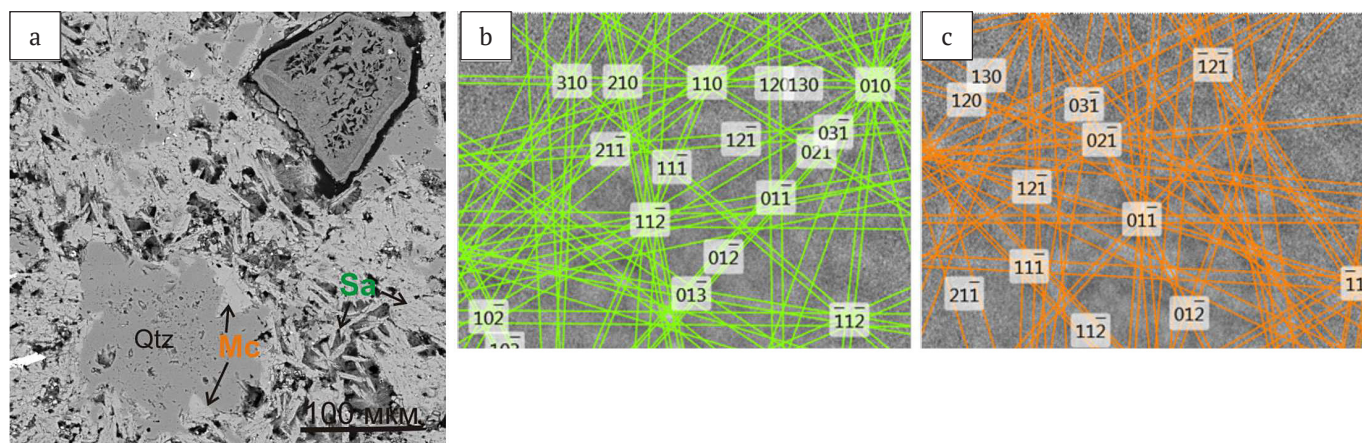
**Fig. 3.** Replacement of a phenocryst with an aggregate of secondary minerals (photo in backscattered electrons). Zeo — zeolite, Chm — chamosite, Ms — muscovite





**Таблица 1.** Химический состав минералов  
**Table 1.** Chemical composition of minerals

Компоненты Components	Шамозит / Chamosite		Калиевый полевой шпат Potassium feldspar		Мусковит / Muscovite				
SiO <sub>2</sub>	22.48	20.93	65.69	67.16	57.26	52.2	50.64	52.45	52.19
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.24	14.00	18.82	18.99	31.65	32.39	28.63	30.41	31.14
FeO	42.13	43.99	-	-	1.6	0.93	1.38	1.89	1.17
MgO	-	-	-	-	1.95	1.44	1.57	1.55	1.4
CaO	-	0.49	-	-	-	-	-	-	-
Na <sub>2</sub> O	-	-	1.31	1.86	-	-	-	-	-
K <sub>2</sub> O	1.66	1.83	13.43	13.18	6.36	4.67	6	5.37	5.18
Сумма	81.51	81.99	99.25	101.19	98.82	91.63	88.22	91.67	91.08
Формульные коэффициенты / Formula coefficients									
Si	2.86	2.75	3.05	3.05	4.28	4.20	4.24	4.23	4.23
Al	2.32	2.27	1.03	1.01	2.79	3.07	2.82	2.89	2.97
Fe <sup>2+</sup>	4.48	4.83	-	-	0.09	0.06	0.09	0.12	0.07
Mg	-	-	-	-	0.21	0.17	0.19	0.18	0.16
Ca	-	0.25	-	-	-	-	-	-	-
Na	-	-	0.11	0.16	-	-	-	-	-
K	0.26	0.30	0.79	0.76	0.60	0.48	0.64	0.55	0.53



**Рис. 4.** Две разновидности калиевого полевого шпата в трахитах: а — микролиты санидина (Sa) основной массы и микроклин (Mc) в сростании с кварцем (фото в обратноотраженных электронах); картины дифракции обратнорассеянных электронов (проиндексированные полосы Кикучи) санидина (b) и микроклина (c)

**Fig. 4.** Two varieties of K-feldspar in trachytes: (a) groundmass sanidine (Sa) microlites and microcline (Mc) intergrown with quartz (photo in backscattered electrons); backscattered electron diffraction patterns (indexed Kikuchi bands) of sanidine (b) and microcline (c)

массы породы, а микроклин развивается в виде тонкой каймы в краевых частях кварцевых обособлений (рис. 4, а, с). К сожалению, порфиновые вкрапленники калиевого полевого шпата не были исследованы из-за их полного замещения вторичными минералами.

Для внутриплитного магматизма, фиксирующего плюмовый процесс, широко известна смена трапповых базальтов щелочными породами шошонитовой серии — трахитами и фонолитами, что хорошо изучено на примере вулканитов Северной Эфиопии (Nagos et al., 2010).

Петрохимически изученные породы дайки Цилемского Камня соответствуют трахитам шошонитовой серии (рис. 5, табл. 2). По сравнению с фонолитами вулканического поля Эфиопии (Nagos et al., 2010), которые формировались также позже траппов на севере Восточно-Африканской рифтовой зоны, трахиты Тимана являются более калиевыми породами.

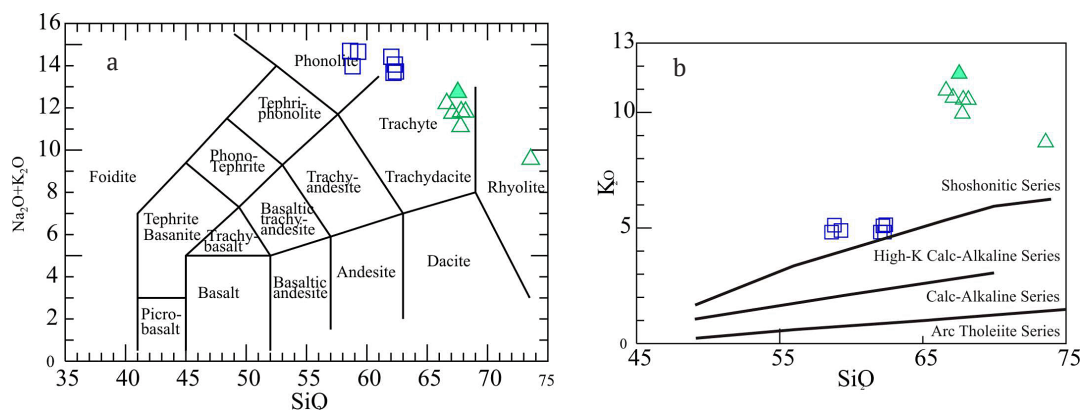
Изучение состава элементов примесей трахитов Цилемского Камня (табл. 3) показало, что породы Среднего Тимана обеднены редкоземельными элемен-

тами и элементами ряда Nb, Ta, La, Ce, по сравнению с фонолитами вулканического поля Эфиопии (рис. 6, а, б), кроме Pb, Th и U. Повышенное содержание Pb, Th и U объясняется присутствием в породе редкоземельных фаз с цирконием.

### Возраст позднепалеозойских магматических пород Среднего Тимана

Н. А. Малышевым и Э. В. Шипиловым в 2002 г. было сделано обобщение по геодинамической эволюции северо-востока Европейского кратона и выделены девонские магматические импульсы. Для Канино-Тиманской гряды ими отмечается магматизм около 375 млн лет (поздний девон), который связывается с активным рифтингом, проявленным в результате подъема обширного плюма (Малышев, Шипилов, 2002).

К настоящему времени для трапповой формации Тимана Ar-Ar методом установлен возраст  $389 \pm 8$  млн лет (Удодатина и др., 2014), что соответствует средне-девонскому времени.



**Рис. 5.** Петрохимические особенности трахитов. TAS-диаграмма (а), вариационная диаграмма  $K_2O - SiO_2$  (б). Зеленые треугольники — трахиты Цилемского Камня, синие квадраты — фонолиты вулканического поля Северной Эфиопии

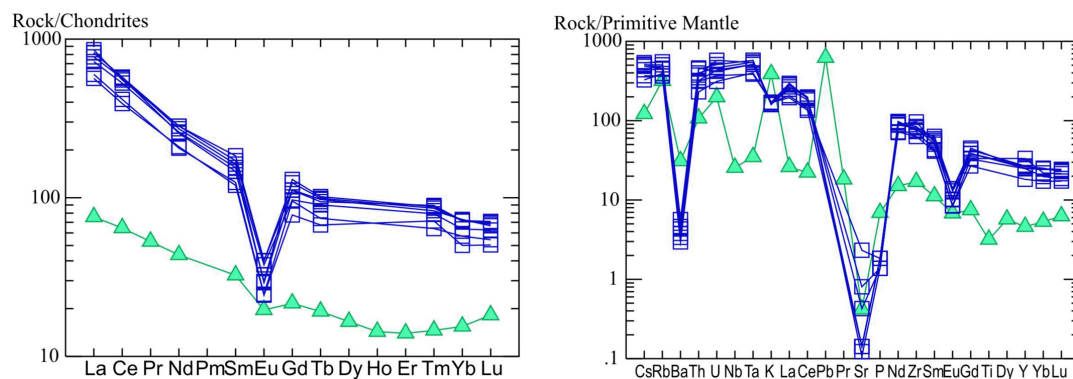
**Fig. 5.** Petrochemical features of trachytes. TAS diagram (a),  $K_2O - SiO_2$  variation diagram (b). Green triangles are trachytes of the Tsilemsky Stone, blue squares are phonolites of the volcanic field of Northern Ethiopia

**Таблица 2.** Химический состав трахитов Цилемского Камня  
**Table 2.** Chemical composition of trachytes of the Tsilemsky Kamen

Компоненты Components	Проба / Sample						
	060/10	060/10	060-1/10	060-2/10	060/3	060-4/10	060-6/10
SiO <sub>2</sub>	67.54	67.82	67.76	67.1	66.62	68.18	73.58
TiO <sub>2</sub>	0.60	0.70	0.65	0.70	0.72	0.67	0.78
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.25	15.78	14.9	15.77	15.74	15.01	13.02
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.61	0.56	2.21	1.58	1.37	1.34	0.22
FeO	0.26	0.3	0.37	0.36	0.58	0.58	0.38
MnO	0.001	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
MgO	0.30	0.20	0.10	0.30	0.30	0.20	0.30
CaO	0.63	0.40	0.40	0.40	0.20	0.66	0.20
Na <sub>2</sub> O	1.06	1.26	1.17	1.11	1.26	1.25	0.86
K <sub>2</sub> O	11.67	10.55	9.94	10.63	10.94	10.54	8.70
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.15	0.16	0.18	0.17	0.18	0.18	0.12
Сумма / Sum	95.07	97.74	97.68	98.13	97.92	98.61	98.16

**Таблица 3.** Содержание редких, рассеянных и редкоземельных элементов в трахите Цилемского Камня (г/т)  
**Table 3.** Content of rare, trace and rare earth elements of the Tsilemsky Kamen (ppm)

Образец Sample	Компоненты / Components															
	Li	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Rb	Sr	Y	Zr
060/10	0.92	0.84	3.87	55.73	40.64	4.28	6.98	19.82	24.83	13.85	0.94	1.83	201.93	8.81	20.96	189.84
Nb	Mo	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu
18.23	0.99	0.14	0.16	0.03	6.47	6.62	0.16	0.36	0.96	216.68	17.92	39.42	5.03	20.35	4.97	1.14
Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Hg	Tl	Pb	Bi	Th	U
4.44	0.72	4.21	0.81	2.31	0.372	2.63	0.46	5.45	1.42	2.77	0.12	1.1	44.14	0.2	9.08	4.18



**Рис. 6.** Геохимические особенности трахитов. Диаграмма распределения РЗЭ (а), мультикомпонентная диаграмма (б)  
Условные обозначения: Зеленые треугольники — трахиты Цилемского Камня, синие квадраты — фонолиты вулканического поля Северной Эфиопии (Hagos et al., 2010). Составы нормированы по: Sun S., McDonough W. F., 1989

**Fig. 6.** Geochemical features of trachytes. REE distribution diagram (a), multicomponent diagram (b)  
Legend: Green triangles are trachytes of the Tsilemsky Stone, blue squares are phonolites of the Northern Ethiopia volcanic field (Hagos et al., 2010). The compositions are normalized according to: Sun S., McDonough W. F., 1989





Нами было проведено определение возраста К-Аг-методом по образцу трахита Цилемского Камня Среднего Тимана (валовая проба). Были получены следующие параметры: калий (%)  $\pm \sigma = 8.34 \pm 0.09$ ;  $^{40}\text{Ar}_{\text{рад}}$  (нг/г)  $\pm \sigma = 234.0 \pm 0.7$ ; в образце  $^{40}\text{Ar}_{\text{возд}}$  (%) = 4.9. Возраст составляет  $365 \pm 8$  млн лет, что соответствует позднедевонскому времени.

Ранее для дайки трахитов Четласского Камня верховья верхней Ворыквы Среднего Тимана К-Аг-методом был получен возраст 270—280 млн лет (Мальков, 1999), и Аг-Аг-методом — 292 млн лет (Удоратина и др., 2016).

## Выводы

Трахиты Цилемской дайки имеют микропорфировую с бостонитовой основной массой структуру. Преобладающим минералом является калиевый полевошпат.

Установлены две разновидности калиевого полевошпата. Лейсты основной массы трахита сложены магматическим санидином, а мелкие зерна по краям субизометричных выделений позднего кварца — гидротермальным микроклином, образовавшимся на постмагматической стадии.

Породы трапповой формации Тимана формировались в среднедевонское время ( $389 \pm 8$  млн лет). Внедрение трахитов происходило в течение довольно продолжительного периода — начало соответствует позднему девону ( $365 \pm 8$  млн лет), а наиболее поздние известные на данный момент события относятся к ранней перми (292 млн лет).

Таким образом, позднепалеозойские вулканические породы — трапповые базальты и трахиты Тимана — фиксируют проявление нескольких импульсов плюмового магматизма.

## Литература / References

- Колониченко Е. В., Филиппов В. Н. Малые сульфидные руды Среднего Тимана // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2009. № 3. С. 10—13.  
Kolonichenko Ye. V., Filippov V. N. Small sulfide ores of the Middle Timan. Vestnik IG Komi SC UB RAS, 2009, No. 3, pp. 10—13. (in Russian)
- Куликова К. В., Удоратина О. В., Макеев Б. А., Савельев В. П. Петрографо-минералогическая характеристика ультракалиевых пород нижних частей базальтовых тел (Южный Тиман) // Геодинамика, вещество, рудогенез Восточно-Европейской платформы и ее складчатого обрамления: Материалы Всерос. науч. конф. с межд. уч. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2017. С. 99—101.  
Kulikova K. V., Udoratina O. V., Makeyev B. A., Savelyev V. P. Petrographic and mineralogical characteristics of ultrapotassic rocks in the lower parts of basalt bodies (Southern Timan). Proc. of the All-Russian scientific conference with international participation. Syktyvkar, IG Komi SC UB RAS, 2017, pp. 99—101. (in Russian)
- Лобковский Л. И., Никишин А. М., Хаин В. Е. Современные проблемы геотектоники и геодинамики. М.: Науч. мир, 2004. 612 с.  
Lobkovskiy L. I., Nikishin A. M., Khain V. Ye. Sovremennyye problemy geotektoniki i geodinamiki (Modern problems

of geotectonics and geodynamics). Moscow: Nauchny mir, 2004, 612 p. (in Russian)

Макеев А. Б., Лебедев В. А., Брянчанинова Н. И. Магматиты Среднего Тимана. Екатеринбург: УрО РАН, 2008. 348 с.  
Makeev A. B., Lebedev V. A., Brianchaninova N. I. Magmatites of the Middle Timan. Yekaterinburg: UB RAS, 2008, 348 p. (in Russian)

Мальков Б. А. Герцинский бостонитовый комплекс Среднего Тимана // Геология Европейского Севера России: Труды Института геологии Коми НЦ УрО РАН; Вып. 103. Сыктывкар, 1999. № 4. С. 43—47.

Malkov B. A. Gertsinsky bostonite complex of the Middle Timan. Geology of the European North of Russia. Proceedings of the Institute of Geology of the Komi SC UB RAS. Issue 103, Syktyvkar, 1999, No. 4, pp. 43—47. (in Russian)

Малышев Н. А., Шипилов Э. В. Геодинамическая эволюция Европейского Северо-Востока в девоне // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2002. № 11 (95). С. 2—4.

Malyshev N. A., Shipilov E. V. Geodynamic evolution of European north-east in Devonian. Vestnik IG Komi SC UB RAS, November 2002, No. 11 (95), pp. 2—4. (in Russian)

Мяндин А. С., Удоратина О. В., Смолева И. В. Изотопный состав кислорода и углерода карбонатов щелочных базальтов (Южный Тиман) // Молодежь и наука на Севере: Материалы докладов III Всерос. (XVIII) молод. науч. конф.: в 2 т. (Сыктывкар, Республика Коми, Россия, 2018 г.). Сыктывкар, 2018. Том II. С. 76—77. (ФИЦ Коми НЦ УрО РАН).

Myandin A. S., Udoratina O. V., Smoleva I. V. Oxygen and carbon isotopic composition of carbonates of alkaline basalts (Southern Timan). Proceedings of the 3<sup>rd</sup> All-Russian (18th) Youth Scientific Conference «Youth and Science in the North» (in 2 volumes). Volume II. (Syktyvkar, Komi Republic, Russia, 2018). Syktyvkar, 2018, pp. 76—77. (in Russian)

Оловянишников В. Г. Геологическое развитие Северного Тимана и п-ова Канин. Сыктывкар: Геопринт, 2004. 80 с.

Olovyanishnikov V. G. Geological development of the Northern Timan and the Kanin Peninsula. Syktyvkar: Geoprint, 2004, 80 p. (in Russian)

Панева А. А., Куликова К. В., Бурцев И. Н. Внутриплитный палеозойский магматизм Среднего Тимана // Петрология магматических и метаморфических комплексов: Материалы Всерос. петрограф. конф. с межд. участием. Томск: Изд-во Томского ЦНТИ. 2016. Вып. 8. С. 224—230.

Paneva A. A., Kulikova K. V., Burtsev I. N. Intraplate Paleozoic magmatism of the Middle Timan. Petrology of igneous and metamorphic complexes. Issue 8. Proc. of the All-Russian petrographic conference with international participation. Tomsk: Publishing house of the Tomsk CNTI, 2016, pp. 224—230. (in Russian)

Плякин А. М., Ершова О. В. История открытия и изучения Умбинско-Средненского полиминерального месторождения // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2011. № 7 (199). С. 25—29.

Pyakin A. M., Ershova O. V. History of the discovery and study of the Umbinsko-Srednenskoye polymineral deposit. Vestnik IG Komi SC UB RAS, 2011, No. 7(199), pp. 25—29. (in Russian)

- Степаненко В. И. Канино-Тимано-Печорская провинция позднедевонского внутриплитного магматизма (положение и размеры) // Доклады академии наук. 2016. Т. 467. № 5. С. 572–575.
- Stepanenko V. I. Kanino-Timan-Pechora province of Late Devonian intraplate magmatism (position and size). Doklady Earth Sciences, 2016, V. 467, No. 5, pp. 572–575. (in Russian)
- Тиманский кряж: В 2 т. / Ред.-сост.: Л. П. Шилов, А. М. Плякин, В. И. Алексеев. Т. 1. История, география, жизнь: монография. Ухта: УГТУ, 2010. 339 с.
- Timan Ridge. In 2 volumes. Editorial staff: L. P. Shilov, A. M. Plyakin, V. I. Alekseev, V. 1, History, geography, life: monograph. Ukhta: USTU, 2010, 339 p. (in Russian)
- Удоратина О. В., Бурцев И. Н., Куликова К. В., Голубева И. И. Ультракалиевые магматические комплексы Тимана // Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-Востока России: Материалы XVII Геол. съезда Республики Коми. Сыктывкар, 2019. С. 104–106.
- Udoratina O. V., Burtsev I. N., Kulikova K. V., Golubeva I. I. Timan ultrapotassium igneous complexes. Geology and mineral resources of the European North-East of Russia. Proc. of the 17<sup>th</sup> Geological Congress of the Komi Republic. Syktyvkar, 2019, pp. 104–106. (in Russian)
- Удоратина О. В., Куликова К. В., Варламов Д. А., Макеев Б. А. Ультракалиевые породы (Средний Тиман, Цилемский Камень) // Петрология магматических и метаморфических комплексов: Материалы X Всерос. с межд. уч. петрограф. конф. Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 2018. Вып. 10. С. 380–383.
- Udoratina O. V., Kulikova K. V., Varlamov D. A., Makeev B. A. Ultrapotassium rocks (Middle Timan, Tsilemsky Kamen). Petrology of igneous and metamorphic complexes. Issue 10. Proc. of the 10<sup>th</sup> All-Russian petrographic conference with international participation, Tomsk, Publishing house of Tomsk CNTI, 2018, pp. 380–383. (in Russian)
- Удоратина О. В., Травин А. В., Куликова К. В., Варламов Д. А. Свидетельства раннепермского импульса ультракалиевого магматизма на Среднем Тимане // Бюл. моск. испытателей природы. Отд. геол. 2016. Т. 91. Вып 2–3. С. 29–35.
- Udoratina O. V., Travin A. V., Kulikova K. V., Varlamov D. A. Evidence of the Early Permian pulse of ultrapotassium magmatism in the Middle Timan. Bulletin of the Moscow Naturalists. Department of Geology, 2016, V. 91, Issue 2–3, pp. 29–35. (in Russian)
- Удоратина О. В., Андреичев В. Л., Саватенков В. М., Травин А. В. Базальты Среднего Тимана: Rb–Sr-, Sm–Nd- и Ar–Ar-данные // Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-Востока России: Материалы XVI Геол. съезда Республики Коми. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2014. Т. II. С. 128–131.
- Udoratina, O. V., Andreichev, V. L., Savatenkov, V. M., and Travin, A. V., Basalts of the Middle Timan: Rb–Sr, Sm–Nd, and Ar–Ar data. Geol. East of Russia: Proceedings of the 16<sup>th</sup> Geological Congress of the Komi Republic. Syktyvkar: IG Komi SC UB RAS, 2014, V. 2, pp. 128–131. (in Russian)
- Удоратина О. В., Варламов Д. А., Капитанова В. А., Ронкин Ю. Л. Ультракалиевые породы нижней части Верхневорыквинского базальтового покрова (Средний Тиман) // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. Сыктывкар. 2015. № 2. С. 17–22.
- Udoratina O. V., Varlamov D. A., Kapitanova V. A., Ronkin Yu. L. Ultrapotassium rocks of the lower part of the Upper Vorykva basalt cover (Middle Timan). Vestnik IG Komi SC UB RAS, Syktyvkar, No. 2, 2015, pp. 17–22. (in Russian)
- Чернышев И. В., Лебедев В. А., Аракелянц М. М. К–Ar-датирование четвертичных вулканитов: методология и интерпретация результатов // Петрология. 2006. Т. 14. № 1. С. 69–89.
- Chernyshev I. V., Lebedev V. A., Arakelyants M. M. K–Ar dating of Quaternary volcanics: methodology and interpretation of results. Petrology, 2006, V. 14, No. 1, pp. 69–89. (in Russian)
- Hagos M., Koeberl C., Kabeto K., Koller F. Geochemical characteristics of the alkaline basalts and the phonolite – trachyte plugs of the Axum area, northern Ethiopia // Austrian Journal of Earth Sciences. 2010. V. 103. № 2. pp. 153–170.
- Sun S., McDonough W. F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // Magmatism in the ocean basins / Eds. A. D. Saunders, M. J. Norry. Geol. Soc. London, Spec. Publ., 1989, v. 42, pp. 313–345.

Поступила в редакцию / Received 19.06.2023





## Об относительной роли сил динамического давления и вязких напряжений в тектонически активных переходных зонах Земли

С. В. Гаврилов<sup>1</sup>, А. Л. Харитонов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва; [gavrilov@ifz.ru](mailto:gavrilov@ifz.ru)

<sup>2</sup> Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН, Москва  
[ahariton@izmiran.ru](mailto:ahariton@izmiran.ru)

В статье показана роль сил динамического негидростатического давления и вязких напряжений в астеносфере тектонически активных переходных зон от континента к океану. Исследуются зоны активных тектонических процессов в литосфере и нижележащей мантии, влияющих на литосферные блоки, дневную поверхность Земли и границы плотностных неоднородностей. Показано также преимущественное влияние вязких напряжений на формирование мантийных диапиров и часто связанных с ними месторождений углеводородов. В зонах субдукции крупномасштабный нисходящий конвективный поток опускается в верхнюю мантию как погружающийся жесткий литосферный блок. Были рассмотрены силы, которые определяют угол субдукции, зависящий от возраста литосферы, скорости субдукции и реологических свойств материала мантии. Для исследования применялся метод аналитического термодинамического моделирования тектонического строения верхней мантии (литосфера, астеносфера) в переходной зоне от континента к океану. Сделан вывод о том, что относительная роль сил динамического давления преобладает в зонах, характеризующихся горизонтально удлиненными астеносферными движениями в мантии, как это происходит под протяженными океаническими литосферными плитами. Новизна исследований связана с выводом о том, что под литосферными микроплитами и вблизи их границ роли сил динамического давления и вязких напряжений сравнимы между собой. В областях термических диапиров, связанных с зонами субдукции и часто расположенных в переходных зонах от континента к океану, преобладает роль вязких напряжений. Термические диапиры в зонах субдукции иногда приводят к формированию месторождений углеводородов за счет процессов дегазации мантии.

**Ключевые слова:** силы динамического давления, вязкие напряжения, переходные зоны «континент—океан», термические диапиры, нефтегазоносность.

## Relative role of dynamic pressure forces and viscous stresses in tectonically active transition zones of the Earth

S. V. Gavrilov<sup>1</sup>, A. L. Kharitonov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow

<sup>2</sup> Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Waves Propagation RAS, Moscow

This article shows the role of dynamic non-hydrostatic pressure forces and viscous stresses in asthenosphere of tectonically active transition zones from the continent to the ocean. We have studied zones of active tectonic processes in the lithosphere and the underlying mantle, affecting the lithospheric blocks, the day surface of the Earth and the boundaries of density inhomogeneities. We showed the predominant influence of viscous stresses on the formation of mantle diapirs and often associated hydrocarbon deposits. In subduction zones, in which a large-scale descending convective flow descends into the upper mantle as a sinking hard lithospheric block. We studied forces that determine the angle of subduction, depending on the age of the lithosphere, the rate of subduction and the rheological properties of the mantle material. We applied the method of analytical thermodynamic modeling of the tectonic structure of the upper mantle (lithosphere, asthenosphere) in the transition zone from the continent to the ocean. We concluded that the relative role of dynamic pressure forces prevailed in zones characterized by horizontally elongated asthenospheric movements in the mantle, as it happened under extended oceanic lithospheric plates. The novelty of the research is connected with the conclusion that under lithospheric micro-plates and near their boundaries, the roles of dynamic pressure forces and viscous stresses are comparable. In the areas of thermal diapirs associated with subduction zones and often located in transition zones from the continent to the ocean, the role of viscous stresses prevails. Thermal diapirs in subduction zones sometimes lead to the formation of hydrocarbon deposits due to mantle degassing processes.

**Keywords:** dynamic pressure forces, viscous stresses, «continent—ocean» transition zones, thermal diapirs, oil and gas potential.

### Введение

В Российской Федерации и за рубежом опубликовано некоторое количество работ, посвященных исследованиям по динамической топографии, процессам дегазации мантии (Павленкова, 2011; Miashiro, 1972), происходящим в тектонически активных суб-

дукционных зонах перехода от океана к континенту (Lobkovsky, Kotelkin, 2004; Трубицын, Баранов, Евсеев, 2006; Трубицын, Баранов, Харыбин, 2007; Кирдяшкин и др., 2008; Червов, Черных, Бушенкова и др., 2014; Бобров, Баранов, 2016; Bobrov, Baranov, Tenzer, 2022; Schubert et al., 2001; Turcotte et al., 2002; Clark et al.,

**Для цитирования:** Гаврилов С. В., Харитонов А. Л. Об относительной роли сил динамического давления и вязких напряжений в тектонически активных переходных зонах Земли // Вестник геонаук. 2023. 12(348). С. 37–44. DOI: 10.19110/geov.2023.12.5

**For citation:** Gavrilov S. V., Kharitonov A. L. Relative role of dynamic pressure forces and viscous stresses in tectonically active transition zones of the Earth. Vestnik of Geosciences, 2023, 12(348), pp. 37–44, doi: 10.19110/geov.2023.12.5

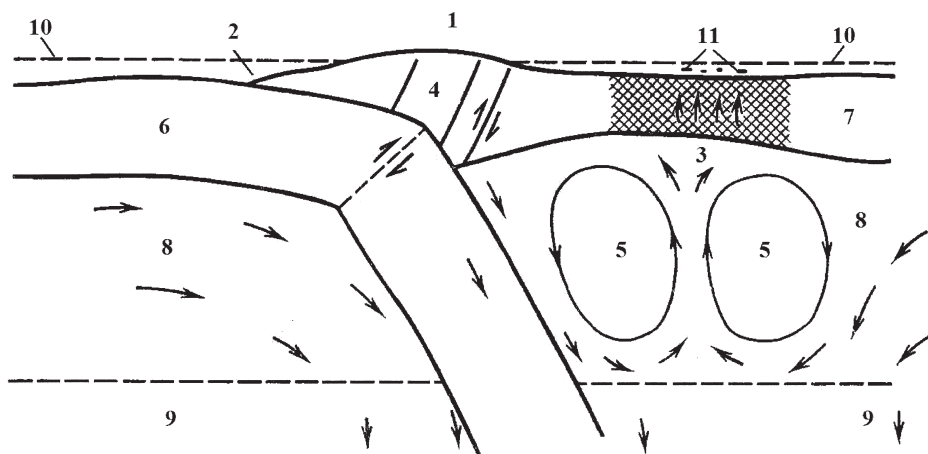
2005). Особенно большой вклад в решение этой проблемы внесли отечественные научные школы геодинамики под руководством академика Л. И. Лобковского и члена-корреспондента В. П. Трубицына. В зонах субдукции часто возникают области подъема термических или химических диапиров (Гаврилов, Аббот, 1999; Юркова, 2011). Это говорит о том, что они могут быть обусловлены вязкими напряжениями и/или силами негидростатического давления. В ранее опубликованных работах было показано, что относительная роль этих сил зависит от геометрии областей, охваченных конвективными движениями в мантии Земли (Монин, 1979; Karig, 1971). Нерешенной проблемой до сих пор остаётся анализ вязких напряжений и сил негидростатического давления в области субдукции литосферных микроплит. Поэтому одной из целей нашего исследования является задача показать преимущественное влияние вязких напряжений и сил динамического давления на формирование мантийных диапиров (рис. 1, 3), расположенных под слоем настиляющей жесткой литосферной плиты (и часто связанных с ними месторождений углеводородов (рис. 1, 11) в окрестности зон глубинных разломов (рис. 1, 7). Вязкие напряжения и силы динамического давления определяются геометрическими характеристиками той части верхней мантии (астеносфера — 8), в которой происходят конвективные течения (рис. 1, 5).

В этой статье принята модель переходной зоны столкновения океанической и континентальной литосферных плит (рис. 1), рассматриваемых как жесткие пластины, испытывающие деформацию только в узкой зоне сжатия по краям столкновения этих литосферных плит. То есть обе литосферные плиты (океаническая и континентальная) считаются упругими

или, в первом приближении, жесткими пластинами, за исключением относительно узкой области Заварицкого — Беньофа столкновения литосферных плит, где механические напряжения не превосходят конечного предела текучести.

На рис. 1 стрелками обозначены медленные кинематические конвективные течения вязкой мантийной среды в зоне литосферной субдукции, происшедшей в течение многих миллионов лет. Этим рисунком предполагается показать, что вязкие напряжения и/или силы динамического давления действуют так же и в земных недрах, например подпирая снизу субдуцирующие блоки литосферы.

Под термином «геометрические характеристики верхней мантии» авторы понимают относительные горизонтальный и вертикальный размеры области верхней мантии, охваченной конвективными (или вообще вихревыми) движениями материала мантии. Так, в случае, если горизонтальный размер значительно превышает вертикальный, например под протяженными океаническими плитами, силы динамического давления, действующие на субдуцирующие блоки и «подошву» настиляющей литосферы, преобладают над силами вязких напряжений. Если область верхней мантии с конвективными процессами в ней изометрична, то есть горизонтальный и вертикальный размеры области конвекции одинаковы, то роли динамического давления и вязких напряжений одинаковы. Если движение в верхней мантии происходит в области, вытянутой в вертикальном направлении, то действие вязких напряжений на подошву настиляющей литосферы значительно превышает действие динамического давления. В частности, из данных, приведенных на рис. 1, 5, видно, что вертикальные размеры области с конвек-



**Рис. 1.** Модель строения зоны поддвига (субдукции) литосферных плит, иллюстрирующая возникновение локальных конвективных течений (вихрей) в слое астеносферы под окраинным бассейном в тылу островной дуги (Монин, 1979):

1 — островной палеовулканический пояс; 2 — океанический желоб; 3 — конвективная зона переноса тепла и углеводородов вверх; 4 — зона наклонных разломов на переднем крае надвигаемой литосферной плиты; 5 — вихри тепловой конвекции Карига (Karig, 1971); 6 — поддвижение (субдукция) океанической литосферной плиты; 7 — зона сдвиговых деформаций (глубинных разломов) настиляющей континентальной литосферной плиты (штриховка); 8 — мантийный (астеносферный) слой; 9 — мезосферный мантийный слой; 10 — поверхность геоида; 11 — формирование нефтегазоносного бассейна

**Fig. 1.** A model of the structure of the zone of subduction of lithospheric plates, illustrating the occurrence of local convective currents (vortices) in the asthenosphere layer under the marginal basin in the rear of the island arc (Monin, 1979):

1 — island paleovolcanic belt; 2 — oceanic trough; 3 — convective zone of transporting heat and hydrocarbon upward; 4 — zone of inclined faults at the leading edge of the advancing lithospheric plate; 5 — vortices of thermal convection Karig (Karig, 1971); 6 — subduction of the oceanic lithospheric plate; 7 — zone of shear deformations (deep faults) of the underlying continental lithospheric plate (shaded); 8 — mantle (asthenospheric) layer; 9 — mesospheric mantle layer; 10 — geoid surface; 11 — formation of an oil and gas-bearing basin





цией преобладают над горизонтальными. Это значит, что в рассматриваемый на рис. 1 временной период развития геодинамических процессов в верхней мантии преобладает действие вязких напряжений на подшову настилающей литосферы и значительно превышает действие динамического давления.

Для решения поставленных в статье задач ниже предлагается рассмотреть метод геотермодинамического моделирования кинематических течений вязкой мантийной среды в зоне субдукции.

### Метод геотермодинамического моделирования

Граничные условия рассматриваемой задачи в данной модели в зоне литосферной субдукции можно представить как соблюдение процессов непроскальзывания (т. е. сцепления или прилипания), возникающих на границах погружающейся (субдуцирующей) жесткой литосферной плиты и вязкой астеносферы. Для описания процессов в астеносфере использовалось приближение к закону с постоянной вязкостью. При этом также необходимо, чтобы температура на этих границах контакта погружающейся (субдуцирующей) литосферной плиты и астеносферы была равна температуре субсолидуса. Чтобы было более понятно читателям журнала, необходимо сообщить, что термин «температура субсолидуса» означает температуру начальной стадии частичного плавления. При этом нужно отметить, что временные масштабы геологических и термодинамических явлений в зоне литосферной субдукции составляют миллионы лет.

Рассмотрим модель конвекции в прямоугольной ячейке  $0 < x < L$ ,  $0 < z < d$  с началом координат в основании верхней мантии на глубине  $d$ , вертикальной осью  $z$ , направленной вверх, и горизонтальной осью  $x$  вдоль основания верхней мантии. Ячейка заполнена однородной жидкостью плотностью  $\rho$  с коэффициентом вязкости  $\eta$ , горизонтальные границы  $z = 0$  и  $z = d$  изотермичны, с температурами  $T(z = 0) = T_0$  и  $T(z = d) = T_1$ , а вертикальные границы  $x = 0$  и  $x = L$  считаются адиабатическими, на которых  $\partial T / \partial x = 0$ . Безразмерные линеаризованные уравнения, определяющие возмущения термомеханического состояния среды в ячейке при бесконечном числе Прандтля в приближении Буссинеска, имеют вид уравнений (7.3.11)–(7.3.14) (Shubert, 2001). В обозначениях настоящей работы эти уравнения могут быть записаны как:

$$0 = -\partial_x p + \partial_x \tau_{xx} + \partial_x \tau_{xz}, \quad (1)$$

$$0 = Ra \times \theta - \partial_z p + \partial_x \tau_{xz} + \partial_z \tau_{zz}, \quad (2)$$

$$0 = \partial_x v_x + \partial_z v_z, \quad (3)$$

$$\partial_t \theta = -v_z \times \partial_z T + \chi \times \Delta \theta, \quad (4)$$

где сохранен член  $\partial_t \theta$ , описывающий нестационарную задачу, и знак при  $Ra \times \theta$  изменен, так как ось  $z$  направлена вверх. Уравнения (1)–(4) есть, соответственно,  $x$ - и  $z$ -компоненты уравнения движения, уравнение неразрывности и уравнение теплопереноса, в которых  $x$  и  $z$  — декартовы координаты,  $v_x$  и  $v_z$  — компоненты скорости вдоль осей,  $p$  — динамическое (негидростатическое) давление,  $\tau_{jk}$  — тензор вязких напряжений,  $\rho$  — плотность,  $g$  — ускорение силы тяжести,  $c_p$  — удельная теплоемкость при постоянном давлении,  $T$  — абсолютная температура,  $\kappa$  — коэффициент теплопроводности,

$\Delta$  — оператор Лапласа, а символ  $\partial$  с индексом обозначает частную производную по координатам  $x$ ,  $z$  и времени  $t$ .

Если рассматривается точное аналитическое решение, то в формулах о давлении и вязких напряжениях второй член должен быть описан как распределение полного давления:

$$P(x, z) = \rho_0 \times g(1 - z) + p = \rho_0 \times g(1 - z) - Ra(z^2/2 - z + 1/2) - 2\pi V \times [\eta \times \cos(\pi z) \times \cos(\pi x) + \eta] = p_0 + pT + p_v. \quad (5)$$

Соответственно, такой же член должен входить и в распределение значений напряжений  $\sigma_{xx}$  и  $\sigma_{zz}$ . В результате полное напряжение и давление будет состоять из трех частей. Первый член ( $p_0$ ) дает гидростатическое распределение давления при постоянной плотности. Второй член дает поправку  $pT$ , уменьшающую рост давления с глубиной благодаря росту температуры (и, соответственно, уменьшению плотности). Наконец, третий член ( $p_v$ ) представляет собой динамическое давление, обусловленное конвективными течениями вязкой жидкости. В негидростатической части давления авторы также учитывали поправку в давлении, уменьшающую рост давления с глубиной благодаря росту температуры (и, соответственно, уменьшению плотности).

Член с числом Рэлея в формуле (5) для давления описывает вариации литостатического давления из-за температурных вариаций плотности, тогда как в приближении Буссинеска (приближении несжимаемости), которое использовалось в настоящей статье, температурные вариации плотности учитываются только в члене, описывающем силу плавучести. Поэтому поправки, учитываемые формулой (5), являются незначительными. Следовательно, расчеты, сделанные в настоящей статье, производились в приближении вещества астеносферы в зоне субдукции как к однородной жидкости с постоянной вязкостью и не учитывали зависимость плотности от температуры и давления и зависимость вязкости от температуры, давления и напряжений. Таким образом, можно считать, что член с литостатическим давлением является незначительной добавкой при определении относительной роли динамического давления и вязких напряжений, и в проведенных расчетах он не рассматривался.

Чтобы читателям журнала «Вестник геонаук», интересующимся геодинамическими исследованиями в зонах литосферной субдукции, было более понятно, что авторы понимают под терминами «бесконечное число Прандтля» и «в приближении Буссинеска», приводим некоторые пояснения о физическом смысле этих терминов. Использование бесконечного числа Прандтля обозначает, что при расчетах геотермодинамических процессов происходит пренебрежение силами инерции в мантийной среде. Приближение Буссинеска означает, что при расчетах геотермодинамических процессов используется пренебрежение силами несжимаемости мантийной среды.

В уравнениях (1)–(4)  $\chi = [\kappa / (\rho \times c_p)]$  — коэффициент температуропроводности. Для приведения этих уравнений к безразмерной форме в качестве новых единиц измерения координат  $x$  и  $z$  выбрана вертикальная мощность слоя  $d$ , скорость как величина, определяемая из  $(\chi/d)$ , время как величина, определяемая из  $(d^2/\chi)$ , температура  $T$  и ее возмущение  $\theta$  как наличие характерного перепада температуры  $\delta T = (T_0 - T_1) > 0$ , а также на-

пряжений и давления как величина  $[(\eta \times \chi)/d^2]$ . Исходя из формулы (2), безразмерное число Рэлея можно представить как

$$Ra = \{[\rho \times \alpha \times g \times d^3 \times \Delta T] / (\eta \times \chi)\} > 0, \quad (6)$$

где  $\alpha$  — коэффициент теплового расширения.

В частности, можно рассчитать критическое число Рэлея, которое равно  $(27/4) \times (\pi)^4 = 658$ .

Рассматривая двумерную конвекцию в плоском горизонтальном слое  $0 \leq z \leq d$  первоначально покоящейся жидкости, в которой имеется вертикальный градиент температуры  $T_z = [(T_1 - T_0) / d] < 0$  с невозмущенным термомеханическим состоянием покоя, с постоянным вертикальным градиентом температуры  $T_z = [(T_1 - T_0)/d]$  и кондуктивным переносом тепла, можно искать решение уравнений (1)–(4) с экспоненциальной зависимостью от времени по закону  $\exp(\gamma \times t)$ .

При условии свободных непроницаемых изотермических горизонтальных и адиабатических вертикальных границ ищем решение уравнений (1)–(4) при постоянных (безразмерных)  $(\partial_z T) < 0$  и  $\chi$  в виде:

$$\begin{aligned} v_x &= A \times \sin(k \times x) \times \cos(\pi \times z), \\ v_z &= B \times \cos(k \times x) \times \sin(\pi \times z), \\ \theta &= C \times \cos(k \times x) \times \sin(\pi \times z), \\ p &= D \times \cos(k \times x) \times \cos(\pi \times z), \\ \partial_x p &= -D \times k \times \sin(k \times x) \times \cos(\pi \times z), \\ \partial_z p &= -D \times \pi \times \cos(k \times x) \times \sin(\pi \times z), \\ \partial_z v_x &= -A \times \pi \times \sin(k \times x) \times \sin(\pi \times z), \\ \partial_x v_x &= A \times k \times \cos(k \times x) \times \cos(\pi \times z), \\ \partial_x v_z &= -B \times k \times \sin(k \times x) \times \sin(\pi \times z), \\ \partial_z v_z &= B \times \pi \times \cos(k \times x) \times \cos(\pi \times z), \\ \tau_{xz} &= 2 \times \eta \times A \times k \times \cos(k \times x) \times \cos(\pi \times z), \\ \tau_{xz} &= 2 \times \eta \times A \times k \times \cos(k \times x) \times \cos(\pi \times z), \\ \tau_{xx} &= 2 \times \eta \times A \times k \times \cos(k \times x) \times \cos(\pi \times z), \\ \tau_{xz} &= -\eta \times (A \times \pi + B \times k) \times \sin(k \times x) \times \sin(\pi \times z), \\ \tau_{zz} &= 2 \times \eta \times B \times \pi \times \cos(k \times x) \times \cos(\pi \times z), \\ \partial_x \tau_{xz} &= -2 \times \eta \times A \times k^2 \times \sin(k \times x) \times \cos(\pi \times z), \\ \partial_z \tau_{zz} &= -2 \times \eta \times B \times \pi^2 \times \cos(k \times x) \times \sin(\pi \times z), \\ \partial_x \tau_{xz} &= -\eta \times (A \times \pi + B \times k) \times k \times \cos(k \times x) \times \sin(\pi \times z), \\ \partial_z \tau_{xz} &= -\eta \times (A \times \pi + B \times k) \times \pi \times \sin(k \times x) \times \cos(\pi \times z), \end{aligned} \quad (7)$$

где все не зависящие от координат величины  $A, B, C, D$  в (7) зависят от времени  $t$  по экспоненциальному закону  $\exp(\gamma \times t)$ , а  $k = \pi \times d \times L^{-1}$  есть безразмерное волновое число. Подставляя (7) в уравнения (1)–(4), находим для безразмерного инкремента  $\gamma$ :

$$\begin{aligned} \gamma &= -\{(Ra \times k^2 \times T_z) / [\eta \times (\pi^2 + k^2)^2]\} - \\ &- [\chi \times (\pi^2 + k^2)^2]. \end{aligned} \quad (8)$$

Условие возникновения конвекции  $\gamma = 0$  дает  $Ra(\gamma = 0) = -[(\pi^2 + k^2)^3 / (k^2 \times T_z)]$ . Эта величина достигает минимума при  $k = (\pi/\sqrt{2})$ , и при  $T_z = -1$   $Ra_{\min} = (27/4) \times \pi^4 \approx 658$ . Если конвекция происходит в горизонтальном слое неограниченной длины, то возникают ячейки с пространственным периодом  $(d/\sqrt{2})$ . В случае если  $T_z, \eta, \chi$  переменны, то можно для оценки инкремента конвективной неустойчивости воспользоваться формулой (8), подставив в нее средние значения  $T_z, \eta, \chi$ .

Рассмотрим подробнее вывод формулы (8) из уравнений (1)–(4). Пусть начальное возмущение температуры задается в (7) как  $\theta = C \times \cos(k \times x) \times \sin(\pi \times z)$  с  $C > 0$ . Это означает, что возмущение температуры в левой части ячейки положительно, а в правой части отрица-

тельно, т. е. в левой части ячейки вещество всплывает, а в правой опускается, и, следовательно, конвективное движение жидкости происходит по часовой стрелке. Из уравнения (3) следует, что  $B = -(A \times k / \pi)$ . Так как  $\Delta \theta = -(\pi^2 + k^2) \times C \times \cos(k \times x) \times \sin(\pi \times z)$ ,  $\partial_t \theta = \gamma \times C \times \cos(k \times x) \times \sin(\pi \times z)$ , то из уравнения (4) получим:

$$C = \{[(k / \pi) \times A \times T_z] / [\gamma + [\chi \times (\pi^2 + k^2)]]\},$$

где при  $C > 0$  и  $T_z < 0$  должно быть  $A < 0$ . Подставляя выражения (7) в уравнения (1) и (2), вычитая одно из уравнений из другого и сокращая полученный результат на  $A$ , приходим к формуле (8). Из уравнения (1) находим  $D = A \times \eta \times [(k^2 + \pi^2)/k]$ , где  $k = (\pi/L)$ , т. е.  $D < 0$ .

Согласно выражениям в верхней строке формулы (7):

$$\begin{aligned} v_x &= A \times \sin(k \times x) \times \cos(\pi \times z), \\ v_z &= B \times \cos(k \times x) \times \sin(\pi \times z), \\ \theta &= C \times \cos(k \times x) \times \sin(\pi \times z), \\ p &= D \times \cos(k \times x) \times \cos(\pi \times z), \end{aligned}$$

при  $C > 0, A < 0, B > 0, D < 0$  компоненты скорости  $v_x$  и  $v_z$  соответствуют движению жидкости по часовой стрелке, т. е. всплыванию жидкости в левой части ячейки и опусканию жидкости в правой части ячейки. На верхней границе ячейки (при  $z = 1$ ) возмущение динамического давления  $p = -D \times \cos(k \times x) = -A \times \eta \times [(k^2 + \pi^2)/k] \times \cos(k \times x)$ . Сила давления, действующая изнутри астеносферной ячейки на верхнюю границу, положительна в левой части ячейки (т. е. «подпирает» границу снизу) и отрицательна в правой части ячейки (т. е. «засасывает» границу вниз). Сравним силу негидростатического давления на верхней границе ячейки с вертикальной силой вязких напряжений, действующей со стороны жидкости на верхнюю границу ячейки. Нормальная компонента тензора вязких напряжений:

$$\begin{aligned} \tau_{zz} &= -[2 \times D \times k^2 / (\pi^2 + k^2)] \times \cos(k \times x) \times \cos(\pi \times z) = \\ &= -2 \times \eta \times A \times k \times \cos(k \times x) \times \cos(\pi \times z), \end{aligned}$$

и на верхней границе  $z = 1, \cos(\pi \times z) = -1, \tau_{zz} = 2 \times \eta \times A \times k \times \cos(k \times x)$ , т. е. при  $A < 0$  оказывается, что  $\tau_{zz}$  на верхней границе отрицательна в левой части ячейки и положительна в правой части ячейки. Так как сила, действующая со стороны жидкости на единицу обтекаемой поверхности границы с внешней нормалью  $n_i$ , равна:

$$f_i = -(p \times n_i) + (\tau_{ik} \times n_k)$$

(Ландау, Лифшиц, 1986, формула (15.14), в которой изменен знак нормали  $n_i$ ), то вертикальная сила, соответствующая вязким напряжениям, равна  $\tau_{zz}$ , так как направленная внутрь астеносферной ячейки нормаль на верхней границе  $n_z = -1$ . Следовательно, вязкие напряжения в левой части ячейки действуют на верхнюю границу как сила «подпора» снизу (в положительном направлении оси  $z$ ), а в правой части ячейки — как сила «подсоса» вниз. Сравним конвективные силы вязких напряжений и негидростатического давления, действующие на верхнюю границу ячейки. Отношение этих сил:

$$(f_{\text{visc}} / f_{\text{press}}) = [(2 \times k^2) / (k^2 + \pi^2)], \quad (9)$$

откуда видно, что при  $k = \pi$  (в изометрической ячейке с отношением сторон 1:1, т. е. при  $L = d$ ) эти силы равны между собой. В случае, например, вытянутой ячейки, для которой  $k < \pi$ , на верхней границе ячейки пре-





обладает сила возмущенного негидростатического давления. В сильно вытянутой ячейке, для которой  $k \ll \pi$ , действие вязких напряжений на верхней границе пренебрежимо мало по сравнению с действием сил возмущенного динамического давления. Соотношение (9) справедливо не только на поверхности ячейки, но и во всем ее объеме. Следует отметить, что силы негидростатического давления и вязкие напряжения в земных недрах действуют в одну сторону, и этот вывод не связан именно с конвективной природой движения, а приложим к движениям различной природы.

Авторы статьи считают необходимым отметить, что приведенное в этой статье аналитическое решение на первый взгляд может быть несколько похожим на аналитическое решение, приведенное ранее в работе (Трубицын и др., 2006). Однако в этой работе речь идет о переменной вязкости мантии, а в настоящей работе авторы ограничиваются приближением постоянной вязкости астеносферы. Поскольку число Рэлея, используемое в настоящей статье, равно 658, то не совсем корректно сравнивать наши расчеты с результатами Трубицына и др. (2006), в статье которых речь идет о жидкости с переменной вязкостью. Аналитическое решение, развиваемое в настоящей статье, скорее соответствует математическим решениям, представленным в монографии (Гершуни, Жуховицкий, 1972). Хотелось бы еще раз отметить, что решение, приведенное в настоящей статье, не претендует на разработку полной модели конвекции в мантии и анализируется только узкая часть этой модели, связанная с конвективным механизмом в его простейшем виде, чтобы на этом примере сравнить величины вязких напряжений и динамического давления.

## Результаты и обсуждение

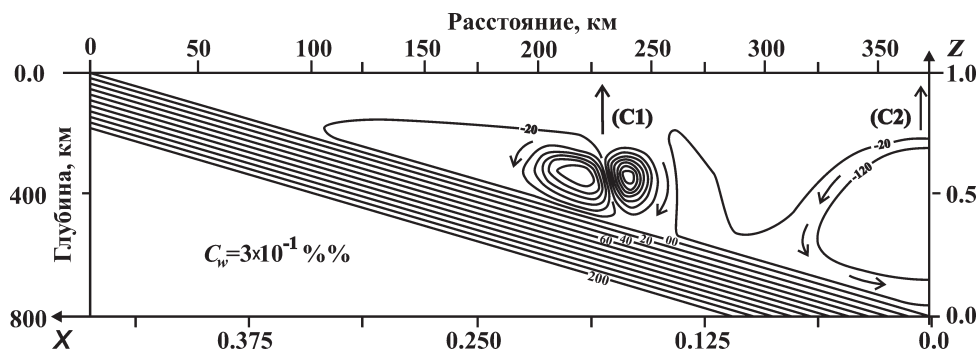
В качестве примера рассмотрим тектонически активную окрестность Черноморской зоны субдукции (рис. 2) и качественно сравним силу динамического (негидростатического) давления и вязкие напряжения,

действующие на субдуцирующий Черноморский литосферный блок и подошву динамической топографии в этой области.

На рис. 3 видно, что в астеносфере на глубине от 110 до 135 км наблюдается зона плавления, которая часто связана с подъемом термального мантийного диапира, возникающего в конвективной зоне субдукции.

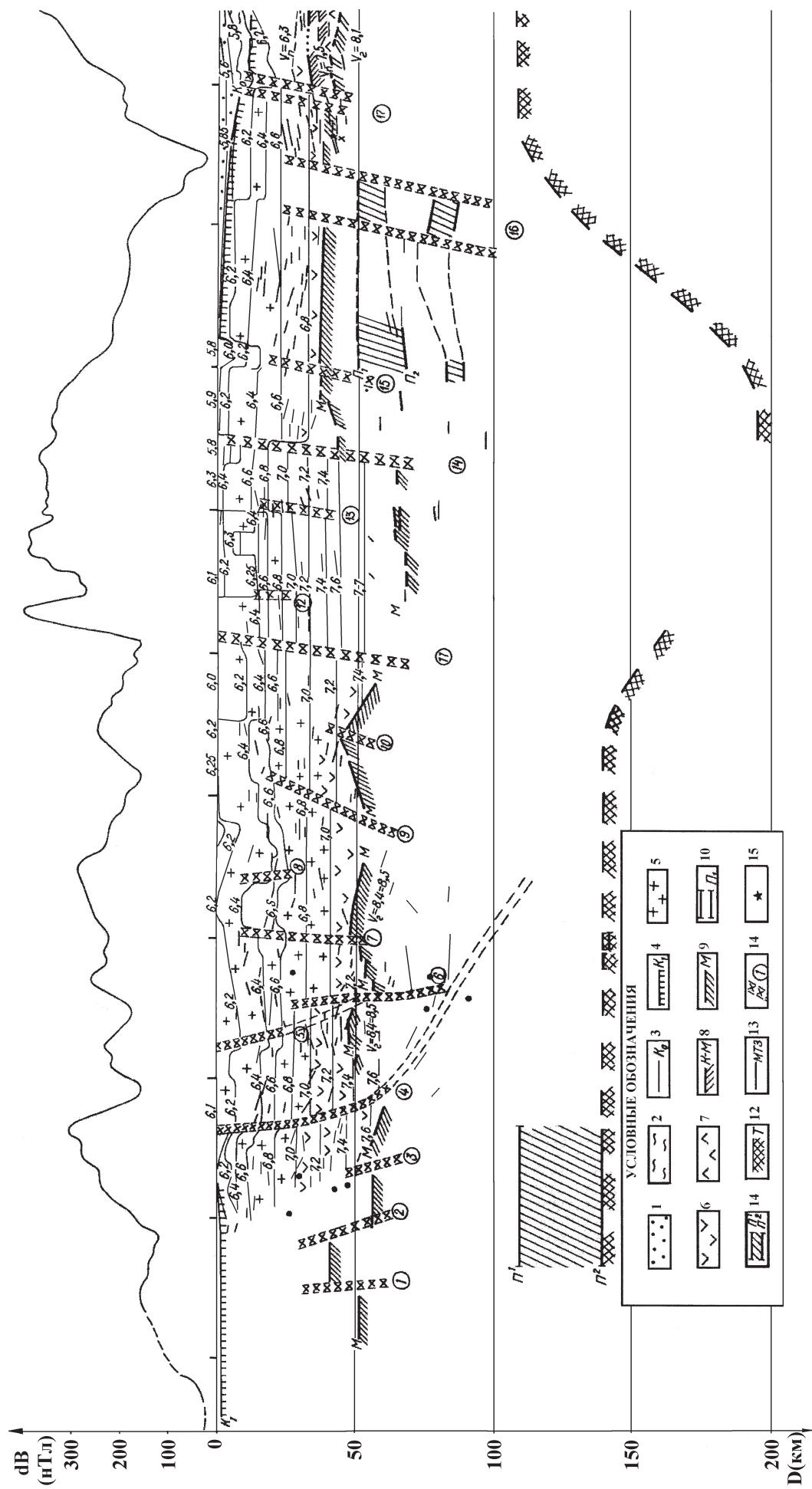
Сравнение геотермодинамической модели, представленной на рис. 2, с реальным глубинным сейсмическим разрезом литосферы Скифской плиты (рис. 3) показывает, что по данным разреза действительно можно видеть наличие верхней границы («кровли») субдуцирующей Черноморской литосферной микроплиты под Скифскую под углом  $\beta = 17^\circ$ . Кроме того, над зоной динамической топографии термического диапира (в двумерном варианте решения модельной задачи), в Черноморской субдукционной зоне, на глубине 200–400 км (рис. 2) наблюдается зона расплавления на глубине 110–150 км, возникающая за счет повышенных значений диссипативного тепла из астеносферы, поступающего в верхние слои мантии.

Так как крупномасштабные циркуляционные движения под движущейся и субдуцирующей океанической литосферной плитой и континентальной плитой, с которой сталкивается океаническая плита, происходят внутри тех частей верхней мантии, которые сильно удлинены в горизонтальном направлении, то в рамках рассмотренной конвективной модели эти циркуляционные движения характеризуются условием  $d \ll L$  или, в безразмерном виде,  $k \ll \pi$  в формуле (9). Под обозначением величины  $L$  подразумеваются горизонтальные размеры конвективной области (ячейки), под обозначением величины  $d$  — вертикальные размеры конвективной области (ячейки). Новым является то, что выполнены численные расчеты, подтверждающие, что в окрестности зон субдукции на субдуцирующие литосферные блоки и подошву настилающей литосферы действуют преимущественно силы динамического давления, а вязкие напряжения незначительны. Это условие (хотя и без всякого обоснования)



**Рис. 2.** Геотермодинамическая модель зоны субдукции Черноморской океанической литосферной микроплиты под Скифскую континентальную литосферную плиту. Условные обозначения: C1 — квазистационарное распределение безразмерной функции тока в зоне расположения термического диапира в северо-западной части вала Шатского, в субдукционном мантийном клине; C2 — квазистационарное распределение безразмерной функции тока в зоне термического диапира, расположенного под территорией Степного Крыма;  $C_w$  — принятое при расчетах значение концентрации воды  $C_w = 3 \times 10^{-1}$  весовых %, содержащейся в горных породах в субдукционном мантийном клине

**Fig. 2.** Geothermodynamic model of the subduction zone of the Black Sea oceanic lithospheric micro-plate under the Scythian continental lithospheric plate. Symbols: C1 — quasistationary distribution of the dimensionless current function in the zone of the thermal diapir in the northwestern part of the Shatsky shaft, in the subduction mantle wedge; C2 — quasistationary distribution of the dimensionless current function in the zone of the thermal diapir located under the territory of the Steppe Crimea;  $C_w$  — calculated value of the water concentration  $C_w = 3 \times 10^{-1}$  weight % contained in rocks in a subduction mantle wedge



**Рис. 3.** Глубинный сейсмический разрез литосферы Скифской плиты (Сологуб, 1986) в зоне субдукции Черноморской микроплиты под Скифскую

Условные обозначения: 1 — осадочные породы; 2 — дислоцированные породы молодого фундамента; 3 — поверхность молодого фундамента; 4 — поверхность дорифейского фундамента ( $V = 6.2-6.5$  км/с); 5 — «гранитный» слой; 6 — породы основного состава ( $V = 7.0$  км/с); 7 — породы коромантийного слоя ( $V = 7.5-7.6$  км/с); 8 — граница Моховичича; 9 — сейсмические горизонты верхней мантии; 10 — сейсмические горизонты верхней мантии; 11 — слои с пониженной скоростью в верхней мантии по данным ГСЗ; 12 — поверхность астеносферного слоя по геотермическим данным; 13 — поверхность астеносферного слоя по данным МТЗ; 14 — глубинные тектонические разломы; 15 — очаги землетрясений

**Fig. 3.** Deep seismic section of the lithosphere of the Scythian plate (Sologub, 1986) in the subduction zone of the Black Sea microplate under the Scythian

Symbols: 1 — sedimentary rocks; 2 — dislocated rocks of the young foundation; 3 — the surface of the Dorifean foundation ( $V = 6.2-6.5$  km/s); 4 — the surface of the Mohorovichich boundary; 5 — "granite" layer; 6 — rocks of the main composition ( $V = 7.0$  km/s); 7 — rocks of the crust-mantle layer; 8 — the surface of the crust-mantle layer; 9 — the Mohorovichich boundary; 10 — seismic horizons of the upper mantle; 11 — layers with reduced velocity in the upper mantle according to the GSZ; 12 — the surface of the asthenospheric layer; 13 — layers with reduced velocity in the upper mantle according to the GSZ; 14 — layers with reduced velocity in the upper mantle according to the GSZ; 15 — layers with reduced velocity in the upper mantle according to the GSZ





используется в работе (Tarcotte et al., 2002) в параграфе 6.11 о значении угла субдукции литосферной плиты. Кроме того, в качестве нового можно также отметить, что расчет динамической топографии у Clark et al. (2005) выполняется путем вычисления упругого изгиба верхней части коры, подпираемой снизу динамическим давлением в вязком течении, происходящим в слое нижней коры. Этот достаточно тонкий слой очень сильно вытянут в горизонтальном направлении. При этом также не учитываются вязкие напряжения, действием которых авторы пренебрегают, не приводя каких-либо обоснований.

Новизна результатов, изложенных в данной статье, может заключаться в том, что в окрестности зон субдукции микроплит, расположенных в пределах Российской Федерации, например Черноморской (Гаврилов и др., 2020), Амурской (Гаврилов и др., 2022), Адриатической (Гаврилов и др., 2021) и некоторых других, движения в астеносфере оказываются примерно изометричны и силы динамического давления и вязких напряжений сравнимы между собой. Этим, возможно, объясняется то, что субдукция микроплит и малых плит происходит под достаточно малыми углами к горизонту, так как субдуцирующий блок поддерживается снизу и «подсасывается» сверху не только силами динамического давления, но и сравнимыми силами вязких напряжений. Кроме того, новизна результатов статьи обусловлена еще и тем, что динамическая топография, формирующаяся над восходящими термическими диапирами, относительно узкими в горизонтальном направлении, связана с астеносферными потоками, в которых  $k \gg \eta$  в формуле (9). Практическая значимость результатов статьи обусловлена тем, что динамическая топография над мантийными диапирами (и часто связанными с ними месторождениями углеводородов (Валяев, 2011)) обусловлена преимущественно вязкими напряжениями.

## Выводы

Показано, что относительная роль сил динамического давления и вязких напряжений, действующих в областях верхней мантии, характеризующихся астеносферными течениями в окрестности активных тектонических переходных от континента к океану зон, зависит от соотношения горизонтального и вертикального масштабов течений в астеносфере. Если горизонтальный масштаб движений значительно превышает их вертикальный масштаб, то роль сил динамического давления существенно преобладает над ролью вязких напряжений и последними можно пренебречь. Так, в окрестности зон субдукции протяженных литосферных плит при вычислении динамической топографии и угла субдукции можно пренебречь вязкими напряжениями и учитывать только силы динамического давления. В зонах субдукции литосферных микроплит следует учитывать как динамическое давление, так и вязкие напряжения, роли которых сравнимы, чем, по-видимому, объясняются малые углы субдукции микроплит. Нами было показано, что динамическая топография над термическими диапирами, напротив, обязана своим происхождением преимущественно вязким напряжениям. С учетом данных, изложенных в работе (Юркова, 2011), можно пред-

положить, что наличие слоев с пластичными серпентинизированными породами и содержащимися в них углеводородами могут создавать значительные запасы природного газа и нефти в зонах мантийных термальных диапиров, сформировавшихся в переходных зонах от континента к океану (зонах литосферной субдукции).

## Литература / References

- Бобров А. М., Баранов А. А. Модель мантийной конвекции с неньютоновской реологией и фазовыми переходами: структура течений и поля напряжений // Физика Земли. 2016. Т. 52. № 1. С. 133—148.
- Bobrov A. M., Baranov A. A. Model of mantle convection with non-Newtonian rheology and phase transitions: structure of currents and stress fields. Physics of the Earth, 2016, V. 52, No. 1, pp. 133—148. (in Russian).
- Валяев Б. М. Углеводородная дегазация Земли, геотектоника и происхождение нефти и газа (Признание и развитие идей П. Н. Кропоткина) // Дегазация Земли и генезис нефтегазовых месторождений (к 100-летию со дня рождения академика П. Н. Кропоткина) / Под ред. А. Н. Дмитриевского, Б. М. Валяева. М.: ГЕОС, 2011. С. 69—92.
- Valyaev B. M. Hydrocarbon degassing of the Earth, geological tectonics and the origin of oil and gas (Recognition and development of P. N. Kropotkin's ideas). Degassing of the Earth and the genesis of oil and gas fields (to the 100th anniversary of the birth of Academician P. N. Kropotkin). Edited by A. N. Dmitrievsky, B. M. Valyaev. Moscow: GEOS, 2011, pp. 10—32. (in Russian)
- Гаврилов С. В., Абботт Д. Х. Термомеханическая модель тепло- и массопереноса в окрестности зоны субдукции // Физика Земли. 1999. Т. 35. № 12. С. 3—12.
- Gavrilov S. V., Abbott D. H. Thermo-mechanical model of heat- and mass-transfer in the vicinity of subduction zone. Physics of the Earth, 1999, V. 35, No. 12, pp. 3—12. (in Russian).
- Гаврилов С. В., Харитонов А. Л. Геотермодинамическая модель предполагаемой палеозоны литосферной субдукции в районе Черноморской впадины и ее связь с металлогенической зональностью Крыма и Кавказа // Региональная геология и металлогения. 2021. № 87. С. 4—16.
- Gavrilov S. V., Kharitonov A. L. Geothermodynamic model of the proposed palezone of lithospheric subduction in the area of the Black Sea basin and its relationship with the metallogenic zonality of the Crimea and the Caucasus. Regional geology and metallogeny, 2021, No. 87, pp. 4—16. (in Russian). DOI: 10.52349/0869-7892-2021-87-04-16.
- Гаврилов С. В., Харитонов А. Л. О субдукции Амурской микроплиты и конвективном механизме выноса диссипативного тепла и углеводородов из мантийного клина в Охотском море к востоку от острова Сахалин // Вестник Академии наук Республики Башкортостан. 2022. Т. 42. № 1(105). С. 5—12.
- Gavrilov S. V., Kharitonov A. L. On the subduction of the Amur microplate and the convective mechanism of dissipative heat and hydrocarbons removal from the mantle wedge in the Sea of Okhotsk east of Sakhalin Island. Bulletin of the Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan, 2022, V. 42, No. 1(105), pp. 5—12. (in Russian). DOI: 10.24412/1728-5283\_2022\_1\_5-12.

- Гаврилов С. В., Харитонов А. Л. Исследование величины формирования аномального теплового потока в бассейне Паннония и зоне Вардар при субдукции Адриатической плиты под Евроазиатскую плиту // International Journal of Professional Science. 2021. № 9. С. 27–39.
- Gavrilov S. V., Kharitonov A. L. Investigation of the magnitude of the formation of abnormal heat flow in the Pannonia basin and the Vardar zone during subduction of the Adriatic plate under the Eurasian plate. International Journal of Professional Science, 2021, No. 9, pp. 27–39. (in Russian). DOI: 10.54092/25421085\_2021\_9\_27.
- Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М.: Наука, 1972. 392 с.
- Gershuni G. Z., Zhukhovitsky E. M. Convective stability of an incompressible fluid. Moscow: Nauka, 1972, 392 p. (in Russian).
- Кирдяшкин А. А., Кирдяшкин А. Г. Влияние скорости движения океанической литосферы на свободно-конвективные течения в астеносфере под срединно-океаническим хребтом // Физика Земли. 2008. № 4. С. 35–47.
- Kirdyashkin A. A., Kirdyashkin A. G. Influence of the speed of movement of the oceanic lithosphere on free convective currents in the asthenosphere under the mid-oceanic ridge. Physics of the Earth, 2008, No. 4, pp. 35–47. (in Russian).
- Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 736 с.
- Landau L. D., Lifshits E. M. Hydrodynamics. Moscow: Nauka, 1986, 736 p. (in Russian).
- Океанология. Геофизика океана. Геодинамика / Под ред. А. С. Монины. М.: Наука, 1979. 416 с.
- Oceanology. Ocean geophysics. Geodynamics. Monin A. S. (ed.) Moscow: Nauka, 1979, 416 p. (in Russian).
- Павленкова Н. И. Ротационно-флюидная модель глобального тектогенеза // Дегазация Земли и генезис нефтегазовых месторождений (к 100-летию со дня рождения академика П. Н. Кропоткина) / Под ред. А. Н. Дмитриевского, Б. М. Валяева. М.: ГЕОС, 2011. С. 69–92.
- Pavlenkova N. I. Rotational fluid model of global tectogenesis. Degassing of the Earth and the genesis of oil and gas fields (marking the 100th anniversary of the birth of Academician P. N. Kropotkin). Edited by A. N. Dmitrievsky, B. M. Valyaev. Moscow: GEOS, 2011, pp. 69–92. (in Russian).
- Сейфуль-Мулюков Р. Б. Нефть и газ. Глубинная природа и ее прикладное значение. М.: Торус Пресс, 2012. 216 с.
- Seiful-Mulyukov R. B. Petroleum and gas: Inorganic abiogenic nature and its applicability. Moscow: Torus Press, 2012, 216 p. (in Russian).
- Соллогуб В. Б. Литосфера Украины. Киев: Наукова думка, 1986. 184 с.
- Sollogub V. B. Litosphere of Ukraine. Kiev: Naukova Dumka, 1986, 184 p. (in Russian).
- Сывороткин В. Л. Глубинная дегазация Земли и глобальные катастрофы. М.: Геоинформцентр, 2002. 250 с.
- Syvorotkin V. L. Deep degassing of the Earth and global catastrophes. Moscow: Geoinformcenter, 2002, 250 p. (in Russian).
- Тимурзиев А. И. К созданию новой парадигмы нефтегазовой геологии на основе глубинно-фильтрационной модели нефтегазообразования и нефтегазоаккумуляции // Геофизика. 2007. № 4. С. 49–60.
- Timurziev A. I. To create a new paradigm of oil and gas geology based on the depth-filtration model of oil and gas formation and oil and gas accumulation. Geophysics, 2007, No. 4, pp. 49–60. (in Russian).
- Трубицын В. П., Баранов А. А., Евсеев А. Н., Трубицын А. П. Точные аналитические решения уравнения Стокса для тестирования уравнений мантийной конвекции с переменной вязкостью // Физика Земли. 2006. Т. 42. № 7. С. 3–11.
- Trubitsyn V. P., Baranov A. A., Evseev A. N., Trubitsyn A. P. Exact analytical solutions of the Stokes equation for testing mantle convection equations with variable viscosity. Physics of the Earth, 2006, V. 42, No. 7, pp. 3–11. (in Russian).
- Трубицын В. П., Баранов А. А., Харьбин Е. В. Численные модели субдукции океанической коры с базальтовыми плато // Физика Земли. 2007. № 7. С. 3–10.
- Trubitsyn V. P., Baranov A. A., Kharybin E. V. Numerical models of subduction of oceanic crust with basalt plateaus. Physics of the Earth, 2007, No. 7, pp. 3–10. (in Russian).
- Червов В. В., Черных Г. Г., Бушенкова Н. А., Кулаков И. Ю. Численное моделирование трехмерной конвекции в верхней мантии Земли под литосферой Евразии // Вычислительные технологии. 2014. Т. 19. № 5. С. 101–114.
- Chervov V. V., Chernykh G. G., Bushenkova N. A., Kulakov I. Yu. Numerical modeling of three-dimensional convection in the upper mantle of the Earth under the lithosphere of Eurasia. Computational Technologies, 2014, V. 19, No. 5, pp. 101–114. (in Russian).
- Юркова Р. М. Перенос молекул водорода и метана в структурных ячейках серпентинитов при подъеме офиолитового диапира // Дегазация Земли и генезис нефтегазовых месторождений (к 100-летию со дня рождения академика П. Н. Кропоткина) / Под ред. А. Н. Дмитриевского, Б. М. Валяева. М.: ГЕОС, 2011. С. 69–92.
- Yurkova R. M. Transfer of hydrogen and methane molecules in serpentinite structural cells during the rise of ophiolite diapir. In the book: Degassing of the Earth and the genesis of oil and gas fields (marking the 100th anniversary of the birth of Academician P. N. Kropotkin). Edited by A. N. Dmitrievsky, B. M. Valyaev. Moscow: GEOS, 2011, pp. 69–92. (in Russian).
- Bobrov A., Baranov A., Tenzer, R. Evolution of stress fields during the supercontinent cycle // Geodesy and Geodynamics, 2022. V. 13, № 4, P. 363–375.
- Clark M. K., Bush J. W. M., Royden L. H. Dynamic topography produced by lower crustal flow against rheological strength heterogeneities bordering the Tibetan Plateau // Geophys. J. International, 2005. V. 162. P. 575–590.
- Karig D. E. Origin and development of marginal basins in the Western Pacific // Journal Geophysical Researches, 1971. V. 76. № 11. P. 2542–2561. DOI:10.1029/JB076i011p02542
- Lobkovsky L. I., Kotelkin V. D. Numerical analysis of geodynamic evolution of the Earth based on a thermochemical model of the mantle convection // Russian Journal of Earth Sciences. 2004. № 6 (1). P. 49–58.
- Miyashiro A. Metamorphism and related magmatism in plate tectonics // American Journal Sci., 1972. V. 272. P. 629–656.
- Schubert G., Turcotte D. L., Olson P. Mantle Convection in the Earth and Planets. New York: Cambridge University Press, 2001. 940 p. DOI:10.1017/CB09780511612879
- Turcotte D. L., Schubert G. Geodynamics. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. 719 p.





## Окисление керогена горючих сланцев перманганатом калия в щелочной среде

Н. С. Бурдельная<sup>1</sup>, Я. Д. Сенникова<sup>2</sup>, Д. А. Бушнев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар

<sup>2</sup> СГУ им. Питирима Сорокина, Сыктывкар

burdelnaya@geo.komisc.ru, yana.sennikova.2000@mail.ru, boushnev@geo.komisc.ru

Проведено аналитическое окисление перманганатом калия в щелочной среде образцов керогена из горючих сланцев ордовикского кукуерсита Прибалтики, доманикового сланца Тимано-Печоры и верхнеюрского горючего сланца Кашпирского месторождения. Выполнено одноэтапное окисление 3.5 % раствором перманганата калия с последующим анализом триметилсилильных производных карбоновых кислот методом хромато-масс-спектрометрии и многоэтапное окисление 0.5 % раствором перманганата калия и анализом продуктов окисления методом ИК-спектроскопии. В керогене доманикового и юрского сланцев часть *n*-алкильных структур оказываются периферийно связанными с матрицей керогена, тогда как в структуре керогена кукуерсита *n*-алкильные структуры являются в основном связующими звеньями более крупных его фрагментов. Более мягкое в случае многоэтапного процесса окисление приводит к образованию крупных фрагментов керогена, в целом повторяющих его углеродную структуру, но более окисленную.

**Ключевые слова:** кероген, горючие сланцы, окисление перманганатом калия, структура органического вещества, ИК-спектроскопия, карбоновые и дикарбоновые кислоты.

## Oxidation of oil shale kerogen by alkaline potassium permanganate

N. S. Burdelnaya<sup>1</sup>, Ya. D. Sennikova<sup>2</sup>, D. A. Bushnev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of geology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar

<sup>2</sup> Pitirim Sorokin Syktyvkar State University, Syktyvkar

We carried out the analytical oxidation of kerogen samples from oil shales of Ordovician kukersite from the Baltic region, Domanik shales from Timan-Pechora and Upper Jurassic oil shales of the Kashpir deposit by potassium permanganate in an alkaline medium. We performed a single-stage oxidation with 3.5 % solution of potassium permanganate, followed by analysis of trimethylsilyl derivatives of carboxylic acids using chromatography-mass spectrometry, and multi-stage oxidation by 0.5 % solution of potassium permanganate and analysis of oxidation products using IR spectroscopy. Some *n*-alkyl structures are peripherally associated with the kerogen matrix in the kerogen of Domanik and Jurassic shales, while in the structure of kukersite kerogen, *n*-alkyl structures are mainly connecting links for larger fragments. Milder, in case of a multi-stage process, oxidation results in formation of large fragments of kerogen, generally repeating its carbon structure, but more oxidized.

**Keywords:** kerogen, oil shales, oxidation by potassium permanganate, structure of organic matter, IR spectroscopy, carboxylic and dicarboxylic acids.

### Введение

Химическая деструкция керогена — нерастворимого в органических растворителях геополимера — является одним из важных способов получения данных о его структурных фрагментах (Vitorovic, 1980). В его основе лежит разрушение макромолекулярной структуры органического вещества (ОВ) до соединений с более низкой молекулярной массой, которые являются уже растворимыми и могут быть охарактеризованы и связаны с исходной структурой ОВ.

Выбор реагента и способа химического разложения ОВ во многом предопределяется целями и задачами исследования. Так, например, использование селективных реагентов (KOH в метаноле, борид никеля, Ni-Ренея, литий в этиламинe Li/EtNH<sub>2</sub>) приводит к разрушению определённых ковалентных связей (COO–,

C–O–C, C–S–C, C–S–S–C) и к высвобождению углеводородов, сохраняющих структурный углеродный скелет исходных биопредшественников и т. д. (Sinninghe Damsté et al., 1989; Schouten et al., 1993; Hold et al., 1998; Бушнев, Бурдельная, 2003).

Методы окислительной деструкции ОВ также широко используются для изучения его углеродсодержащей структуры (Vitorovic et al., 1980). Они являются одними из первых методов, используемых в реконструкции сложной геополимерной структуры ОВ углей, керогена горючих сланцев, а также лигнина, гуминовых кислот и других полимерных углеродсодержащих веществ (Vitorovic et al., 1980; Hayatsu et al., 1982). В СССР в 50–70-х гг. активно проводились исследования по окислению ОВ горючих сланцев, в частности кукуерсита (Когерман, 1952; Фомина, Побуль, 1953, 1955),

**Для цитирования:** Бурдельная Н. С., Сенникова Я. Д., Бушнев Д. А. Окисление керогена горючих сланцев перманганатом калия в щелочной среде // Вестник геонаук. 2023. 12(348). С. 45–54. DOI: 10.19110/geov.2023.12.6

**For citation:** Burdelnaya N. S., Sennikova Ya. D., Bushnev D. A. Oxidation of oil shale kerogen by potassium permanganate in alkaline environment. Vestnik of Geosciences, 2023, 12(348), pp. 45–54, doi: 10.19110/geov.2023.12.6

а также углей методом окисления перманганатом калия в щелочной среде (Кухаренко, Беликова, 1968; Сарымсаков и др., 1968, 1976) и гуминовых кислот почв, торфов и бурых углей (Maximov et al., 1972, 1977) с целью изучения структуры их органической массы.

В настоящее время в Кемеровском научном центре (Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН) широко используются методы озонирования ОБ (Семёнова и др., 2008; Семёнова, Патраков, 2010), которые проводятся с целью изучения влияния процесса озонирования на изменение химического состава органической массы углей разного генетического типа. Поскольку в данном процессе возможен переход до 90 % в растворимые продукты, то он скорее оправдан как один из способов изучения продуктов переработки углей, нежели как способ исследования структуры ОБ (Семёнова, 2017).

Основное использование окислительных методов связано также с деструкцией низкокалорийных (неэнергетических) бурых углей. Оно направлено на реализацию их химического потенциала, в частности увеличение пористости и, как следствие, сорбционных свойств углей (Чурсина, 2016). Также известно, что окисление органической массы незрелых углей способствует более эффективному извлечению гуминовых веществ (Новикова и др., 2010).

Отличительной особенностью процесса окисления является количественная зависимость выхода и молекулярно-массового распределения полученных продуктов деградации от полноты окисления (Hayatsu et al., 1982). В качестве окислителей используются озон, перекись водорода, перманганат калия, хромовая кислота, азотная кислота, тетраоксид рутения (Хейнс, 1988). Основные критерии применения того или иного окислителя будут определяться типом химических превращений, например окислением алканов в спирты и карбоновые кислоты, а также аналитическими возможностями выделения и идентификации продуктов окисления (Vitorovic, 1980).

Используемые окислители активны в разных диапазонах pH и различаются по механизму окисления. Так, например, довольно мягкий окислитель тетраоксид рутения способен селективно окислять ароматический углерод до углекислого газа, при этом оставляя алкильные звенья незатронутыми (Boucher et al., 1991; Yoshioka, Ishiwatari, 2005; Barakat et al., 2012), что приводит к более глубокому анализу строения алкильных звеньев, присоединенных к ароматическим фрагментам, и точному представлению химической структуры керогена. Основным недостатком селективности процесса является низкий выход образующихся продуктов и, как следствие, неполнота представлений о целой структуре ОБ.

Несмотря на такое разнообразие окислительных реагентов, значительных различий в составе продуктов окисления не наблюдается. Выход продуктов окисления зависит от экспериментальных условий — используемого окислителя, температуры, времени проведения опыта и других факторов.

Одним из наиболее широко используемых в изучении структуры ОБ окислителей является перманганат калия (Vitorovic, 1980; Hayatsu et al., 1982; Rullkötter and Michaelis, 1990). Изначально он массово использовался для окисления лигнина и органической массы

углей. При исчерпывающем разрушении структуры ОБ появляется возможность анализа углеродного баланса продуктов окисления, состоящих из углекислого газа, щавелевой кислоты, летучих и нелетучих карбоновых кислот, а также остаточного углерода. Позже перманганат калия стал активно применяться в окислении керогена при изучении его структурных фрагментов (Ishiwatari et al., 1985; Vitorovic et al., 1988; Bajc et al., 2001; Khaddor et al., 2008; Budinova et al., 2009). Многоэтапность окисления перманганатом калия при вариации температуры эксперимента способствует получению разной информации: в более мягких условиях (без нагрева) окисление протекает менее интенсивно и преимущественно по периферии химической структуры керогена. В результате до полного окисления ОБ требуется большее количество этапов. При повышении температуры до 90 °C окисление происходит более глубоко (Budinova et al., 2009).

Использование метода щелочного перманганатного окисления керогена имеет важное значение в геохимических исследованиях. Например, изменения в химическом строении для I, II и III типов керогена фиксируются в молекулярном составе продуктов деградации этих керогенов (Ambles et al., 1985; Vitorovic et al., 1984; Bajc et al., 2001; Khaddor et al., 2008; Budinova et al., 2009), а также в пределах керогена II типа, отличающегося условиями накопления ОБ (Ishiwatari et al., 1991). Исследования, проведенные Ишиватари (1991), показали дифференциацию в продуктах окисления (ПО)  $\text{KMnO}_4$  морских керогенов II типа от озерных (пресноводных) керогенов того же типа, в частности в молекулярном перераспределении  $\alpha, \omega$ -дикарбоновых кислот состава  $\text{C}_4\text{--C}_{10}$ , что может быть связано с различиями в составе природных липидов морского и пресноводного фитопланктона.

Целью данной работы является изучение продуктов окисления керогена горючих сланцев из широко известных среднеордовикской, верхнедевонской и верхнеюрской сланцевосных толщ Восточно-Европейской платформы и Тимана.

## Экспериментальная часть

Нами было выполнено 2 сценария химического окисления:

- одноэтапное окисление керогена горючих сланцев 3.5 % раствором перманганата калия в щелочной среде (1.6 % раствор KOH) при температуре 80 °C с последующим получением триметилсилильных производных (TMS) и хромато-масс-спектральным анализом полученных продуктов;
- многоэтапное исчерпывающее окисление 0.5 % раствором перманганата калия в щелочной среде (1 % раствор KOH) при температуре 80 °C с последующим анализом ИК-спектров продуктов окисления.

Кероген был получен последовательной обработкой соляной и плавиковой кислотами, затем исчерпывающе проэкстрагирован хлороформом. Навеску керогена (около 1 г) смешивали с готовым водным раствором перманганата калия. Температуру в колбе поддерживали с помощью нагревателя магнитной мешалки, контролировали посредством ртутного термометра. Реакцию осуществляли в течение часа до полного исчезновения малиновой окраски раствора. Затем





раствор охлаждали до комнатной температуры и фильтровали. Полученный фильтрат подкисляли соляной кислотой (осч), при этом выпадал осадок нерастворимых в воде кислот, которые затем осаждали центрифугированием (3000 об./мин., 10 минут). Полученный осадок промывали дистиллированной водой и переносили в предварительно взвешенную ёмкость. Навеску ПО (порядка 5 мг) обрабатывали BSTFA в присутствии пиридина при 80 °C (1 час) для получения триметилсилильных производных карбоновых кислот. Анализ полученной фракции выполнялся методом хромато-масс-спектрометрии (ХМС). ХМС-анализ выполнялся на приборе Shimadzu 2010 Ultra. Для хроматографического разделения использовалась колонка HP-5, 30 м × 0.25 мм, толщина слоя неподвижной фазы 0.1 мкм. Температура программировалась от 110 до 300 °C со скоростью 5 °C/мин. Температура инжектора 300 °C, ионного источника — 200 °C. Ввод пробы осуществлялся в режиме деления потока (1:30), объем пробы составлял 2 мкл. Масс-спектрометр — квадрупольный, с энергией ионизации 70 эВ. Идентификацию соединений проводили компьютерным поиском в библиотеке Национального института стандартов NIST 11.

При многостадийном процессе после каждой стадии окисления полученные кислоты объединяли, сушили и затем отбирали на ИК-анализ.

Инфракрасную спектроскопию (ИК) продуктов окисления выполняли на приборе «Инфралюм ФТ-02» с использованием таблетирования керогена с KBr (2.5 мг образца смешивалось с 800 мг порошкообразного KBr). Запись спектров велась с шагом 4 см<sup>-1</sup> в интервале волновых чисел 4000—400 см<sup>-1</sup>.

## Результаты и их обсуждение

### Геохимическая характеристика образцов

В качестве исходных образцов нами были использованы керогены, выделенные из ордовикского кукурсита, доманикового сланца, верхнеюрского горючего сланца. Эстонский горючий сланец — кукурсит — был отобран из отложений разреза «Кохтла» (Kohthla) кукурзерского горизонта среднего ордовика северо-восточной части Эстонии. Доманиковый образец, представ-

ляющий собой тонкоплитчатый кремнистый горючий сланец, был отобран из обнажения по р. Чуть (Ухтинский район, Республика Коми). Верхнеюрский сланец был взят в одном из разрезов берегового обрыва безымянного ручья по правому берегу р. Волги, относящемуся к Кашпирскому месторождению горючих сланцев Саратовской области Волжского сланценосного бассейна (Бушнев, Бурдельная, 2008). Геохимическая характеристика образцов представлена в таблице 1.

Ранее было проведено детальное изучение органической геохимии исследуемых горючих сланцев (Бушнев, Бурдельная, 2008; Бушнев, 2009; Бурдельная и др., 2013). Были изучены условия формирования ОБ доманиковых сланцев Тимано-Печорского осадочного бассейна и волжских горючих сланцев Волго-Печорской сланцевой провинции (Бушнев, Бурдельная, 2008; Бушнев, 2009). Установлено, что ОБ представленных сланцев имеет весьма сложный, смешанный состав, определяемый исходной биомассой фитопланктона и компонентов высшей растительности для юрских сланцев, морских микроводорослей и цианобактерий — для доманиковых (предполагается, что исходным материалом доманикового ОБ также могли служить хитиновые оболочки тентакулитов). Накопление ОБ верхнеюрских сланцев происходило в условиях аноксии наддонных вод палеобассейна и привело к осернению углеводной и липидной составляющей исходного ОБ, что предопределило формирование сернистой структуры керогена, определяемой как тип II-S. Для доманиковой толщи основными факторами накопления высоких концентраций ОБ явились величина биопродукции и темпы минеральной седиментации; процессы осернения здесь играли второстепенную роль. Для доманикового керогена характерен II тип.

Кукурсит содержит кероген I типа. Его уникальность состоит в том, что химическая структура керогена характеризуется определенным набором фрагментов преимущественно одного микроорганизма, а именно вымершей морской микроводоросли *Gloeocapsomorpha prisca*, предположительно представляющей собой колонии цианобактерий с близкими биохимическими свойствами к современным матформирующим цианобактериям *Entophysalis major* (Mastalerz

Таблица 1. Геохимическая характеристика исследуемых образцов

Table 1. Geochemical characteristics of the studied samples

Образец / Sample	Эстонский кукурсит Estonian kukersite	Доманик Ухтинского района Domanik of Ukhtinsky region	Кашпирский сланец Kashpir shales
Литология / Lithology	горючий сланец / oil shales	горючий сланец / oil shales	горючий сланец / oil shales
Возраст / Age	O <sub>2</sub>	D <sub>3</sub> dm	I <sub>3</sub> v <sub>2</sub>
Тип керогена / Kerogen type	I	II	II-S
C <sub>орг</sub> , %	32.2	19.5	36.0
Результаты пиролиза Rock-Eval / Rock-Eval results			
T <sub>max</sub> , °C	423	412	400*
HI, мг УВ/C <sub>орг</sub>	783	641	600*
Данные элементного анализа керогена / Element analysis of kerogen			
H/C	1.45	1.23	1.36
O/C	0.199	0.090	0.171
N/C	0.003	0.030	0.015
S/C	-	0.020**	0.063

\* Взяты средние значения из источника (Тимошина, Иванова, 2023) / Average values taken from (Timoshina, Ivanova, 2023).

\*\* Расчетные данные (Бурдельная, Бушнев, 2010) / Calculated data (Burdelnaya, Bushnev, 2010).

et al., 2003). Предполагается, что микрофосилии *G. prisca* были адаптированы к большим колебаниям солености (Derenne et al., 1992). Было установлено, что в условиях повышенной солёности они селективно сохраняют алгаенановые клеточные стенки, подобно зеленым микроводорослям *Botryococcus braunii*, и основу таких алгаенанов (биополимеров) составляют *n*-алкилзамещенные резорцинолы состава  $C_{21}$ ,  $C_{23}$ , связанные друг с другом через С–С- и С–О-связи (Derenne et al., 1990, 1992; Blokker et al., 2001).

Тип керогенов исследуемых образцов подтверждается данными пиролиза Rock-Eval и элементного состава керогена (табл. 1).

### Окисление ОВ 3.5 % раствором перманганата калия в щелочной среде

Выход ПО при одноступенчатом процессе окисления составил 4.2 % для керогена образца кашпирского горючего сланца, 9.7 % — для кукурсита и 12.2 % — для доманикового сланца.

Как правило, химические реагенты воздействуют на атом углерода, связанный с функциональной группой. Перманганат калия активно способен окислять участки неразветвлённой углеродной структуры с ОН-группами у соседних атомов, карбонильные и ненасыщенные связи. В ароматических структурах в большей степени подвергаются окислению только боковые алкильные цепи, группы превращаются в карбоксильную, а бензольное кольцо при этом не затрагивается. При наличии полиароматических ядер образование продуктов окисления определяется условиями протекания реакций (время, температура) — возможно окис-

ление одного ароматического ядра в случае с нафталином и внутреннего ядра фенантрена или антрацена. Основными продуктами окисления являются карбоновые кислоты линейного и циклического строения.

Нами был изучен качественный состав продуктов окисления. Поскольку образующиеся карбоновые кислоты (КК) обладают низкой летучестью, полученная нами фракция была обработана BSTFA, проводился анализ TMS-производных.

Молекулярно-массовое распределение КК, образующихся при окислении исследуемых керогенов, характеризуется набором двух производных — монокарбоновых кислот состава  $C_8$ – $C_{18}$  и  $\alpha,\omega$ -дикарбоновых кислот состава  $D_9$ – $D_{17}$  для кукурсита и  $D_{10}$ – $D_{20}$  для доманикового сланца. Для ПО верхнеюрского сланца картина распределения КК подобна доманиковому сланцу. Масс-хроматограммы, построенные по общему ионному току, представлены на рисунке 1.

Основной ион, образующийся при распаде КК в случае и монокарбоновых, и дикарбоновых кислот, соответствует  $m/z = 73$ , что даёт основание провести полуколичественный анализ полученных продуктов (рис. 2).

Для ПО керогена кукурсита характерно преобладание дикарбоновых кислот, у ПО керогена доманикового и верхнеюрского сланцев выше содержание монокарбоновых кислот. Анализ продуктов ступенчатой (33 этапной) перманганатно-щелочной деструкции керогена эстонского кукурсита, проведенный ранее в работе (Bajcs et al., 2001), показал образование  $\alpha,\omega$ -алкилдикарбоновых ( $C_4$ – $C_{15}$ ),  $\alpha$ -метилдикарбоновых ( $C_7$ – $C_{12}$ ,  $C_{14}$ ,  $C_{15}$ ), разветвленных дикарбоновых ( $C_5$ – $C_{10}$ ) и *n*-алкилмонокарбоновых ( $C_{14}$ – $C_{18}$ ,  $C_{22}$ ) кислот,

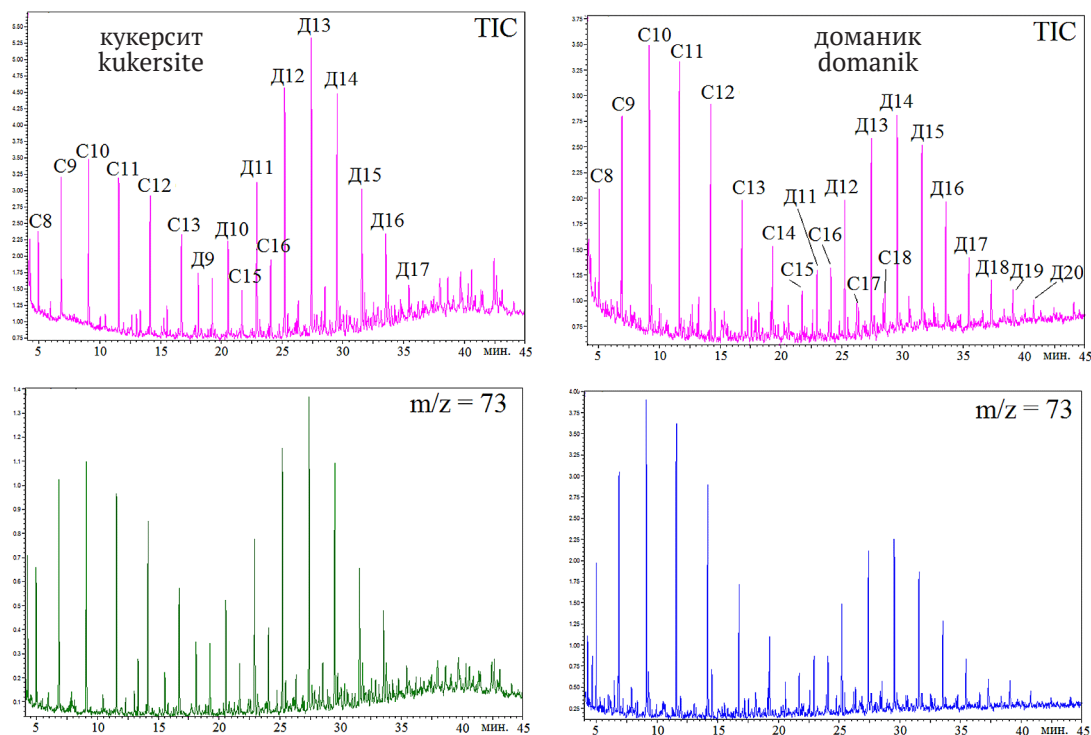
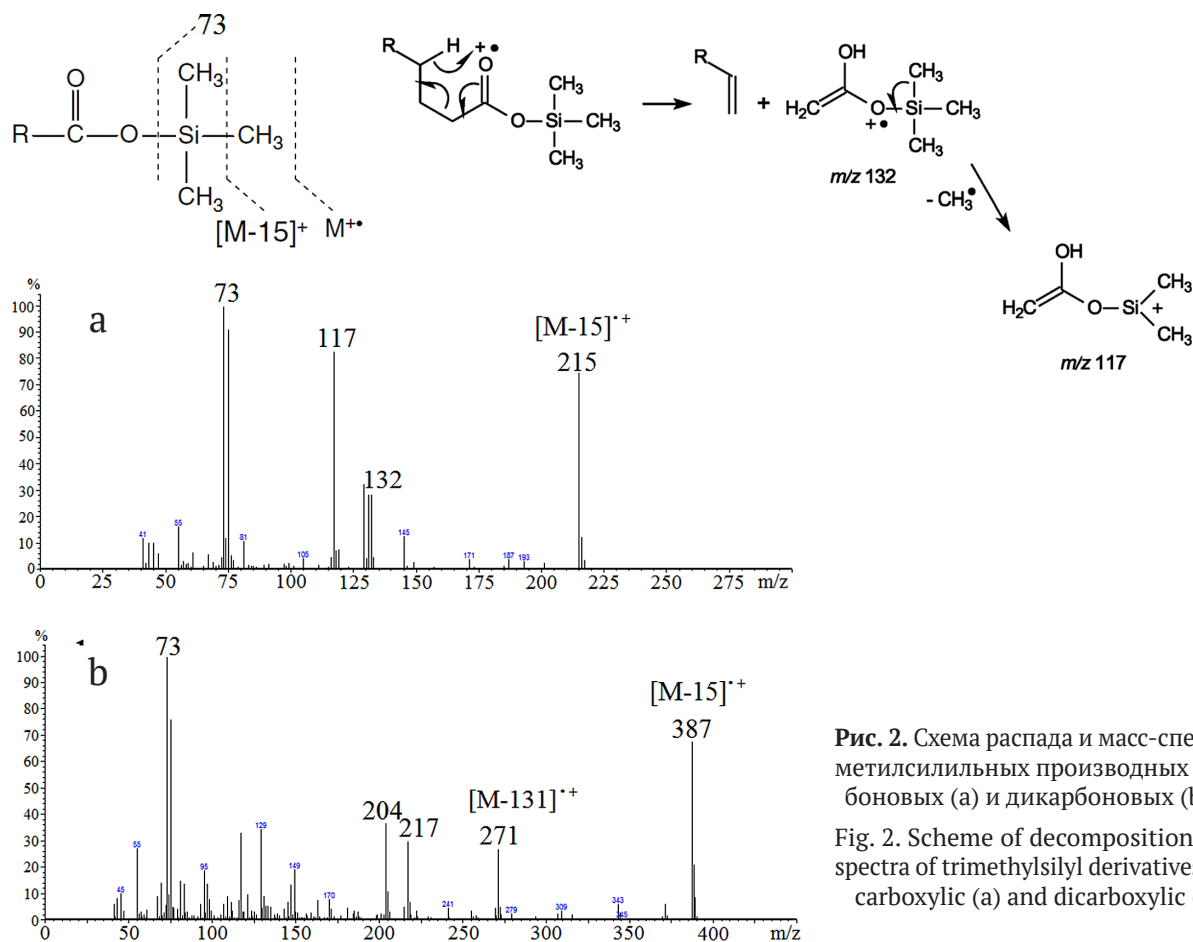


Рис. 1. Масс-хроматограммы продуктов окисления керогена, выделенного из кукурсита и доманикового сланца, построенные по общему ионному току (верхние хроматограммы) и по основному иону с  $m/z = 73$  (нижние хроматограммы):

С — монокарбоновые кислоты, Д — дикарбоновые кислоты, N — число атомов углерода в молекуле

Fig. 1. Mass chromatograms of the oxidation products of kerogen isolated from kukersite and Domanik shale, constructed by the total ion current (upper chromatograms) and by the main ion with  $m/z = 73$  (lower chromatograms): C — monocarboxylic acids, D — dicarboxylic acids, N — quantity of carbon atoms in molecule





**Рис. 2.** Схема распада и масс-спектры три-метилсилильных производных монокарбоновых (а) и дикарбоновых (б) кислот

Fig. 2. Scheme of decomposition and mass spectra of trimethylsilyl derivatives of mono-carboxylic (a) and dicarboxylic (b) acids

которые рассмотрены как возможные производные сохранившихся биоструктур микрофосилии *G. prisca*. В нашем случае, как и в ходе многоэтапного окисления керогена кукурсита (Bajcs et al., 2001), отличительной особенностью является наличие КК с более короткими углеродными цепями, при этом максимум для дикарбоновых кислот смещён в сторону меньшего числа атомов углерода. Наличие таких фрагментов согласуется с предполагаемой особенностью алифатических компонентов устойчивого биополимера, входящего в состав клеточных стенок *G. Prisca* (Bajcs et al., 2001).

#### **Многоэтапное окисление ОВ 0.5 % раствором перманганата калия в щелочной среде (результаты ИК-спектроскопии)**

Многостадийная деградация керогена с использованием небольших порций перманганата калия даёт возможность практически полностью разрушить его макромолекулярную структуру, а низкие концентрации окислителя и щелочная среда, обеспечивая более мягкие условия окисления, приводят к сохранению структурных характеристик керогена.

Практически полное окисление кукурсита и кашпирского сланца наблюдалось после 6 стадий. Окончание процесса фиксировалось нами по отсутствию изменения малиновой окраски раствора. В случае доманикового и кашпирского сланцев твердый осадок в реакционной колбе практически отсутствовал. Для керогена доманикового сланца полное окисление произошло на 7-м этапе. Общий выход продуктов окисления составил 27.6, 33.7 и 42.4 % (по массе к керогену) соответственно для кукурсита, доманикового слан-

ца и верхнеюрского горючего сланца. Такая закономерность в изменении выходов может быть связана как с разной структурой керогена, так и с наличием минеральных примесей. В случае кукурсита зольность составила более 20 % и могла повлиять на низкий выход ПО.

Есть данные о ранее проведённых экспериментах по окислению кукурсита перманганатом калия в щелочной среде (Bajcs et al., 2001). Так, авторам, которые взяли заведомо большее количество керогена (порядка 3 грамм) с зольностью 7 %, удалось полностью окислить кероген после 33 стадий. Содержание перманганата калия для каждой стадии, так же, как и в нашем случае, соответствовало 0.5 %.

ИК-спектры исходных керогенов и продуктов их окисления представлены на рис. 3. Во всех ИК-спектрах наблюдается интенсивная полоса, отвечающая за вклад гидроксильных групп (центр поглощения при 3450 см<sup>-1</sup>).

В ПО кукурсита она становится менее интенсивной. В области 2800–3000 см<sup>-1</sup>, отвечающей за валентные колебания CH<sub>2</sub>-, CH<sub>3</sub>-групп, в керогене и продуктах окисления не наблюдается сильных изменений, за исключением керогена из кашпирского сланца, где данные полосы в ПО становятся менее интенсивными. Это может указывать на окисление алифатических цепей до карбоновых кислот. Вероятно, алкильные цепи в керогене кашпирского сланца оказываются более доступными для окисления, чем в керогенах доманика и кукурсита.

Полосы в спектре кукурсита при 2928 и 2850 см<sup>-1</sup>, принадлежащие валентным асимметричным и сим-

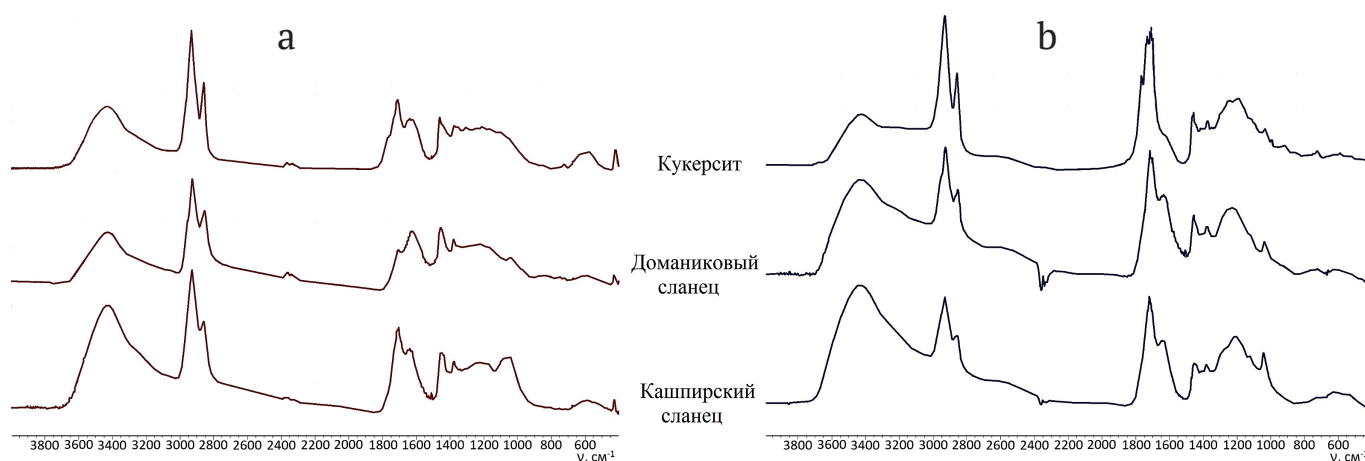


Рис. 3. ИК-спектры исходных керогенов (а) и их ПО после многоступенчатого окисления (b)

Fig. 3. IR spectra of initial kerogens (a) and their OP after multi-stage oxidation (b)

метричным колебаниям  $-\text{CH}_2$ -группы соответственно, не имеют плеча, характерного для остальных проб при  $2960$  и  $2870\text{ см}^{-1}$ . Данные полосы отвечают валентным симметричным и асимметричным колебаниям  $-\text{CH}_3$ -группы и могут указывать на низкую степень разветвлённости углеродной алкильной цепи в кукерсите — как в исходном керогене, так и в продуктах его окисления. Наиболее чётко данное плечо фиксируется в образце доманикового сланца, в продуктах его окисления оно сохраняется, что свидетельствует о сохранении структурных алкильных фрагментов, образующихся в ходе окисления групп  $-\text{CH}_2$ - и  $-\text{CH}_3$  в той же пропорции.

Наиболее значимые изменения после окисления наблюдаются в области  $1600$ — $1780\text{ см}^{-1}$ . Во-первых, соотношение полос в этой области относительно полос в области  $2800$ — $3000\text{ см}^{-1}$  резко изменяется — возрастает интенсивность полос, характерная для валентных колебаний  $\text{C}=\text{C}$ -связей в ароматических структурах ( $1615\text{ см}^{-1}$ ), за исключением кукерсита, и для кислородсодержащих групп в области  $1700$ — $1780\text{ см}^{-1}$ . Во-вторых, фиксируются изменения в самой области при  $1700$ — $1780\text{ см}^{-1}$ . Эти изменения наглядно продемонстрированы на рисунке 4 и получены по результатам деконволюции указанной области. При разложении спектров были определены от 2-х до 4-х областей, интерпретация которых может отличаться в зависимости от гене-

зиса и условий накопления исходных структур-предшественников (Petersen et al., 2008) (табл. 2).

Для исходного керогена, выделенного из кукерсита, область  $1580$ — $1640\text{ см}^{-1}$  отвечает полосам поглощения валентных колебаний карбонильных плюс гидроксильных групп, связанных с ароматическими структурами, т. е.  $\text{C}=\text{C}$ ,  $\text{OH}-\text{C}=\text{C}$  (фенольная гидроксильная группа) (Derenne et al., 1990).

На наличие несопряженных кето-групп может указывать интенсивная полоса при  $1710\text{ см}^{-1}$ . После окисления происходит перераспределение интенсивности ряда полос и появление новых. Резко снижается интенсивность полосы поглощения валентных колебаний  $\text{C}=\text{C}$ -связи в ароматических структурах ( $1619\text{ см}^{-1}$ ) относительно полос в области  $2800$ — $2900\text{ см}^{-1}$ , что указывает на их окисление, а также резкое увеличение интенсивности карбонильного и карбоксильного углерода, в последнем случае в сложных эфирах и лактонах. Зная исходную химическую структуру керогена (рис. 5), полученную ранее авторами (Lille et al., 2003) на основании её моделирования по данным спектрального и термического анализа, а также продуктов окисления керогена (Bajc et al., 2001), можно предполагать, что механизм окисления затронул преимущественно фенольные структуры.

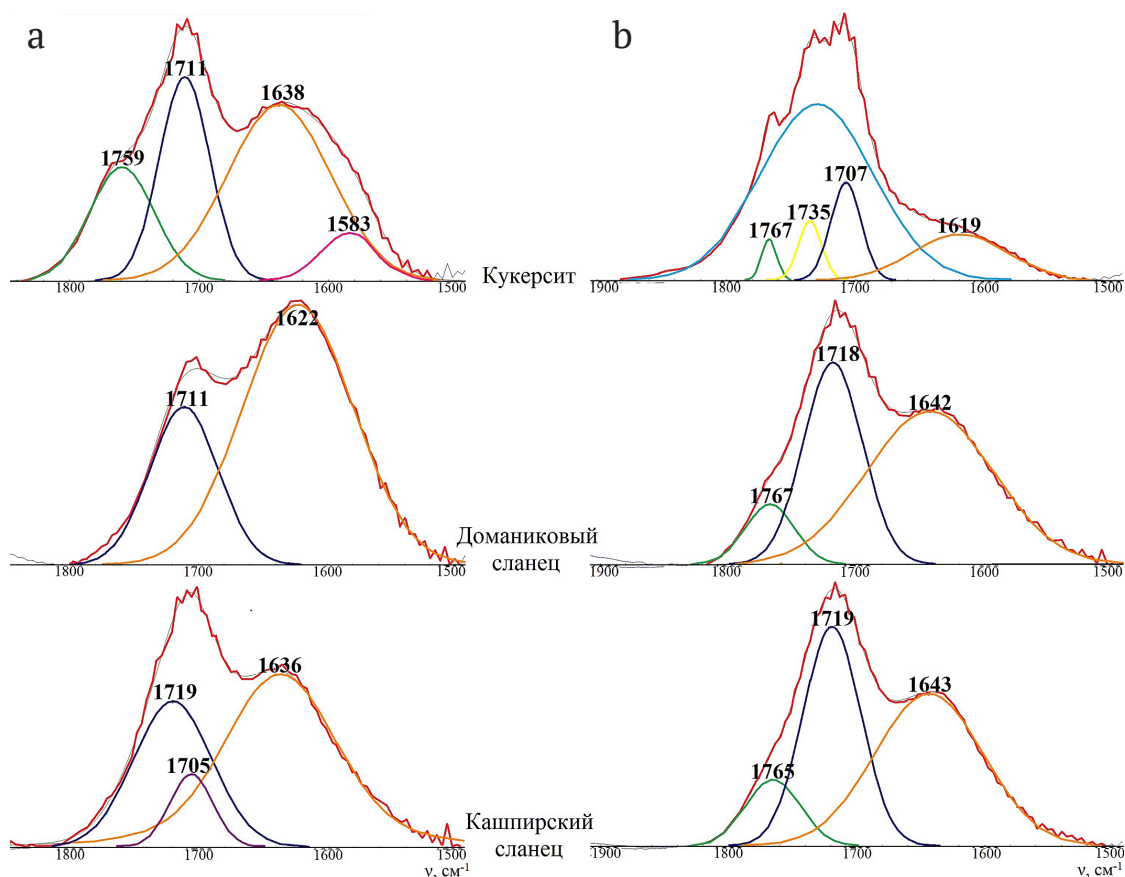
Известно, что окисление фенолов перманганатом калия в щелочной среде происходит с большой скоро-

Таблица 2. Результаты деконволюции ИК-спектров в области  $1580$ — $1770\text{ см}^{-1}$

Table 2. Results of deconvolution of IR spectra in the region  $1580$ — $1770\text{ см}^{-1}$

Структурные фрагменты Structural fragments	Типы колебаний Vibration mode	Кукерсит / Kukersite		Доманик / Domanik		Кашпирский сланец Kashpir shales	
		исх. кероген initial kerogen	ПО OP	исх. кероген initial kerogen	ПО OP	исх. кероген initial kerogen	ПО OP
		волновые числа, $\text{см}^{-1}$ / wave numbers, $\text{см}^{-1}$					
Фенольный гидроксил Phenolic hydroxyl	$\delta_{\text{C-O-H}}$	1583	-	-	-	-	-
$\text{C}=\text{C}$ -связи в ароматических циклах C=C bonds in aromatic rings	$\nu_{\text{C}=\text{C}}$	1638	1619	1622	1642	1636	1643
Карбонил (несопряженные кетоны) / карбоксил Carbonyl (non-conjugated ketones) / carboxyl	$\nu_{\text{C}=\text{O}}$	1711	1707	1711	1718	1705—1719	1719
Сложные эфиры, лактоны Esters, lactones	$\nu_{\text{C}=\text{O}}$	-	1735	-	-	1735	-
		1759	1767	-	1767	-	1765





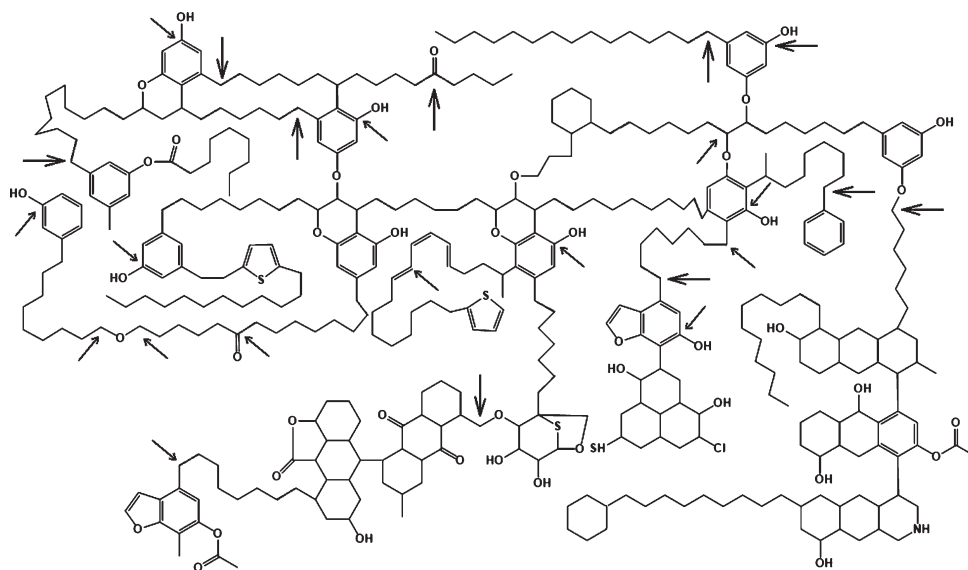
**Рис. 4.** ИК-спектры области 1500–1800  $\text{cm}^{-1}$ : а — исходных керогенов, б — продуктов многоэтапного окисления  
**Fig. 4.** IR spectra of the region 1500–1800  $\text{cm}^{-1}$ : a — initial kerogens, b — products of multi-stage oxidation

стью (Тронов, Григорьев, 1940; Фрейдлин, 1978). Это подтверждает наличие фенольных структур с длинно-цепочечными алифатическими заместителями. Образование сложноэфирных группировок может быть связано с поликонденсацией образующихся при окислении карбонильных и гидроксильных группировок.

Для керогенов доманика и кашпирского сланца наблюдаем более простую картину: здесь имеются все-

го 2 интенсивные полосы, отвечающие за валентные колебания  $\text{C}=\text{C}$ -связи в ароматических ядрах и валентные колебания карбонильных/карбоксильных групп. Для керогена доманика фиксируется полоса в области 1711  $\text{cm}^{-1}$  (рис. 4).

Детальный анализ ИК-спектров нерастворимого ОВ и/или его фрагментов различного генезиса — в углях, пресноводных/морских водорослях — горючих слан-



**Рис. 5.** Химическая структура керогена кукурсита (по: Lille et al., 2003). Стрелками указаны основные положения, по которым происходит окисление  
**Fig. 5.** Chemical structure of kukersite kerogen, from (Lille et al., 2003). Arrows indicate main positions along which oxidation occurs

цев, накапливавшихся в морских условиях (в частности, кукурсит), споринита, кутинита и т. д. позволил авторам работы (Petersen et al., 2008) по-разному интерпретировать (соотнести) полосы поглощения в области 1700–1717 см<sup>-1</sup>.

Так, для кукурсита полоса в области 1710–1717 см<sup>-1</sup> характерна для валентных колебаний карбонильных групп, тогда как для морских водорослей в этой области полоса соответствует валентным колебаниям карбоксильной группы сложных эфиров. В гипотетической молекулярной структуре керогена, полученной нами ранее для доманика (Бурдельная, Бушнев, 2010), в основном присутствуют сложноэфирные связи, что отражается в наличии полосы в области 1711 см<sup>-1</sup>. В керогене, выделенном из кашпирского сланца, полосы 1705 и 1719 см<sup>-1</sup> перекрываются в спектре.

Исследования молекулярного строения керогена сернистых юрских горючих сланцев Волго-Печорской сланцевой провинции позволили представить среднюю гипотетическую структуру, в которой чётко отражены основные структурные фрагменты и ковалентные связи (Бурдельная, Бушнев, 2010). Короткие и длинные алифатические цепи преимущественно включены в структуру посредством простых эфирных и сульфидных связей. Их наличие подтверждается данными <sup>13</sup>C ЯМР-спектроскопии в твёрдом теле (Бушнев и др., 2019). При термоллизе происходит преобразование данных структур с образованием кетонов с различным положением кето-группы в алкильной цепи и алкилзамещённых тиофенов, битиофенов и т. д. (Riboulleau et al., 2000; Бушнев, Бурдельная, 2008). Широкое разнообразие кетонов с различным положением кетогруппы, объясняющееся различной локализацией простых эфирных связей в структуре керогена, характерно для серообогатённых объектов (Riboulleau et al., 2000).

В результате окисления сохраняются ароматические структуры и в области 1765–1767 см<sup>-1</sup> появляется полоса, характерная для валентных колебаний карбоксильных групп в сложных эфирах и лактонах. Сохранение ароматических структур, скорее всего, связано с наличием полиароматических конденсированных структур, довольно устойчивых к окислению.

Область 1000–1300 см<sup>-1</sup> отвечает колебаниям простых эфирных связей. В продуктах окисления всех исследованных образцов данная полоса поглощения практически не изменяется. В процессе окисления, вероятнее всего, данные связи не затрагиваются и сохраняются в структуре керогена в неизменном виде. Известно, что в щелочной среде окисление органических соединений происходит менее агрессивно, чем в кислой (Данилин, Пурыгин, 2015). Простые эфирные связи могут прекрасно окисляться в кислой среде, а также при наличии хотя бы одного алкильного заместителя, поэтому можно предполагать, что простые эфирные связи не разрушаются в местах соединения с ароматическими ядрами, а также в насыщенных циклических структурах.

## Заключение

Нами были получены продукты окисления образцов керогена из прибалтийского кукурсита, доманикового сланца Тимано-Печоры и верхнеюрского горючего сланца из Сызрани. Анализ триметилсилильных

производных ПО, полученных при одноэтапном окислении керогенов 3.5 % раствором перманганата калия, показал наличие среди них моно- и α,ω-дикарбоновых кислот. Полученные результаты свидетельствуют о наличии в керогене доманикового и юрского сланцев периферийных *n*-алкильных заместителей, связанных с матрицей керогена, тогда как в структуре керогена кукурсита *n*-алкильные структуры являются в основном связующими звеньями более крупных его фрагментов.

Многоступенчатый процесс окисления 0.5 % перманганатом калия в щелочной среде позволил получить суммарные выходы ПО 27.6, 33.7 и 42.4 % (по массе к керогену) соответственно для кукурсита, доманикового и верхнеюрского горючих сланцев. Результаты ИК-спектроскопии исходных керогенов и их ПО, полученные в ходе многоэтапного окисления, позволили зафиксировать наиболее значимые изменения в области 1600–1780 см<sup>-1</sup>. Во-первых, в ПО возрастает интенсивность полос, характерная для валентных колебаний C=C-связей в ароматических структурах (исключение для кукурсита) и для кислородсодержащих групп в области 1700–1780 см<sup>-1</sup> относительно полос в области 2800–3000 см<sup>-1</sup>, характерных для валентных колебаний CH<sub>2</sub>-, CH<sub>3</sub>-групп. Во-вторых, фиксируются изменения в самой области при 1700–1780 см<sup>-1</sup>, связанные с появлением новых кислородсодержащих группировок, таких как сложноэфирные группы и лактоны.

Таким образом, окисление перманганатом калия керогена горючих сланцев приводит к образованию растворимых в щёлочи ПО, в целом повторяющих его углеродную структуру, но существенно окисленную. В наибольшей мере окисляются фенольные структуры в кукурсите, алкильные структуры в керогене верхнеюрского сланца и структуры, содержащие карбонильный атом углерода во всех керогенах. Фрагменты, содержащие простые эфирные связи, практически не затрагиваются. Ароматические структуры в керогене образцов доманикового и кашпирского сланцев также сохраняются.

Авторы выражают благодарность рецензентам за полезные рекомендации при подготовке статьи к публикации и Д. В. Камашеву за возможность выполнения ряда операций по окислению.

Исследования выполнялись на базе центра коллективного пользования оборудованием (ЦКП) УрО РАН «Геонаука» ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (Сыктывкар) в рамках темы НИР ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН 122040600014-6.

## Литература / Reference

- Бурдельная Н. С., Бушнев Д. А. Фрагмент химической структуры II и II-S типов керогена верхнеюрских и верхнедевонских отложений Восточно-Европейской платформы // Геохимия. 2010. № 5. С. 525–537.
- Burdel'naya N. S. and Bushev D. A. Fragment of the Chemical Structure of Type II and II-S Kerogen in the Upper Jurassic and Upper Devonian Formations of the East European Platform. *Geochemistry Int.*, 2010, V. 48, No. 5, pp. 492–504.
- Бушнев Д. А., Бурдельная Н. С. Сероорганические соединения верхнеюрской сланценовой толщи Сысольского района // Нефтехимия. 2003. Т. 43. № 4. С. 256–265.





- Bushnev D. A., Burdel'naya N. S. Organic Sulfur Compounds from the Upper Jurassic Shale-Bearing Strata of the Sysola Region. *Pet. Chem.*, 2003, V. 43, No. 4, pp. 230–239.
- Бушнев Д. А., Бурдельная Н. С. Органическое вещество и условия накопления кашпирских горючих сланцев // *Геохимия*. 2008. № 10. С. 1037–1050.
- Bushnev D. A., Burdel'naya N. S. Organic Matter and Deposition Conditions of the Kashpir Oil Shales. *Geochemistry Int.*, 2008, V. 46, No. 10, pp. 971–984.
- Бушнев Д. А. Органическое вещество Ухтинского доманика // *ДАН*. 2009. Т. 426. № 4. С. 516–519.
- Bushnev D. A. Organic Matter of the Ukhita Domanik. *Doklady Earth Sciences*, 2009, V. 426, No. 4, pp. 677–680.
- Бушнев Д. А., Бурдельная Н. С., Мокеев М. В. Результаты  $^{13}\text{C}$  ЯМР- и ИК-спектроскопии керогена верхнедевонских доманикитов Тимано-Печорского бассейна // *Геохимия*. 2019. Т. 64. № 11. С. 1146–1157.
- Bushnev D. A., Burdel'naya N. S., Mokeev M. V. Results of  $^{13}\text{C}$  NMR and FTIR Spectroscopy of Kerogen from the Upper Devonian Domanik of the Timan–Pechora Basin. *Geochemistry Int.*, 2019, V. 57, № 11, pp. 1173–1184. <https://doi.org/10.1134/S0016702919110028>
- Данилин А. А., Пурыгин П. П. Окисление органических соединений. Самара: Самарский государственный университет, 2015. 32 с.
- Danilin A. A., Purygin P. P. Oxidation of organic compounds. Samara: Samara State University, 2015, 32 p. (in Russian)
- Когерман П. К. Окисление сланцев как метод исследования химической природы керогена // *Изв. АН Эстонской ССР*. 1952. № 1. С. 108.
- Kogerman P. K. Oxidation of shale as a method for studying the chemical nature of kerogen. *Proc. AS of the Estonian SSR*, 1952, No. 1, pp. 108. (in Russian)
- Кухаренко Т. А., Беликова В. И. Исследование реакционной способности бурого угля Канско-Ачинского бассейна методом окисления перманганатом калия в щелочной среде // *Химия твёрдого топлива*. 1968. № 1. С. 13–21.
- Kukhareno T. A., Belikova V. I. Study of the reactivity of brown coal from the Kansk-Achinsk basin by the method of oxidation with potassium permanganate in an alkaline medium. *Solid fuel chemistry*, 1968, No. 1, pp. 13–21. (in Russian)
- Новикова Л. Н., Эрдэнэчимэг Р., Пурэвсурэн Б., Вакульская Т. И., Кушнарёв Д. Ф., Рохин А. В. Состав гуминовых веществ окисленного бурого угля Монголии // *Химия твёрдого топлива*. 2010. № 2. С. 14–24.
- Novikova L. N., Erdenechimeg R., Purevsuren B., Vakul'skaya T. I., Kushnarev D. F., Rokhin A. V. Composition of humic substances in oxidized brown coal from Mongolia. *Solid Fuel Chemistry*, 2010, V. 44, No. 2, pp. 78–88.
- Сарымсаков Ш. С., Назарова Н. И., Фомина А. С., Шполянская Е. И. Выделение и идентификация бензолкарбоновых кислот из продуктов окисления выветрившегося бурого угля месторождения Кара-Киче // *Химия твёрдого топлива*. 1968. № 2. С. 86–90.
- Sarymsakov Sh. S., Nazarova N. I., Fomina A. S., Shpolyanskaya E. I. Isolation and identification of benzene carbonic acids from the oxidation products of weathered brown coal from the Kara-Kiche deposit. *Solid fuel chemistry*, 1968, No. 2, pp. 86–90. (in Russian)
- Сарымсаков Ш. С., Давлеткельдиева К. А., Джундубаев А. К., Назарова Н. И. Разделение щелочных продуктов окисления угля на катионите КУ-2 // *Химия твердого топлива*. 1976. С. 84–87.
- Sarymsakov Sh. S., Davletkeldieva K. A., Dzhundubaev A. K., Nazarova N. I. Separation of alkaline products of coal oxidation on KU-2 cation exchanger. *Solid fuel chemistry*, 1976, pp. 84–87. (in Russian)
- Семенова С. А., Патраков Ю. Ф., Батина М. В. Состав продуктов озонирования в хлороформе низкометаморфизованных углей различного генетического типа // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2008. Т. 16. № 4. С. 433–439.
- Semenova S. A., Patrakov Yu. F., Batina M. V. Composition of ozonation products in chloroform of low-metamorphosed coals of various genetic types. *Chemistry for sustainable development*. 2008, V. 16, No. 4, pp. 433–439.
- Семенова С. А., Патраков Ю. Ф. Состав продуктов озонирования горючего сланца Кашпирского месторождения в хлороформе // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2010. Т. 18. № 2. С. 159–164.
- Semenova S. A., Patrakov Yu. F. Composition of ozonation products of oil shale from the Kashpirskoe deposit in chloroform. *Chemistry for sustainable development*. 2010. V. 18. No. 2. P. 159–164. (in Russian)
- Семенова С. А. Направления использования продуктов озонирования бурых углей // *Вестник КузГТУ*. 2017. № 2. С. 144–152.
- Semenova S. A. Directions for using brown coal ozonation products. *Bulletin of Kuzbass State Technical University*, 2017, No. 2, pp. 144–152. (in Russian)
- Тимошина И. Д., Иванова Е. Н. К геохимии органического вещества горючих сланцев Кашпирского месторождения Волго-Уральского бассейна // *Геохимия и петрография угля, горючих сланцев и битуминозных пород: Материалы Российской научной конференции*. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2023. С. 112–114.
- Timoshina I. D., Ivanova E. N. On the geochemistry of organic matter of oil shale of the Kashpirsky deposit of the Volga-Ural basin. *Geochemistry and petrography of coal, oil shale and bituminous rocks: Proc. of the Russian scientific conference*. Syktyvkar: IG Komi SC UB RAS, 2023, pp. 112–114. (in Russian)
- Тронов Б. В., Григорьев М. Ю. К вопросу о механизме окисления каменного угля и причинах его самовозгорания // *Известия Томского индустриального университета им. С. М. Кирова*. 1940. Т. 60. № 3. С. 37–40.
- Tronov B. V., Grigoriev M. Yu. On the question of the mechanism of oxidation of coal and the reasons for its spontaneous combustion. *News of the Tomsk Industrial University named after S. M. Kirov*, 1940, V. 60, No. 3, P. 37–40. (in Russian)
- Фомина А. С., Побуль Л. Я. Окислительная деструкция керогена кукуерита // *Известия Академии наук ЭССР*. 1953. Т. 2. № 1. С. 91–102.
- Fomina A. S., Pobul L. Ya. Oxidative destruction of kerogen kukersite. *Proceedings of the AS of the Estonian SSR*, 1953, V. 2, No. 1, pp. 91–102. (in Russian)
- Фомина А. С. Окислительная деструкция керогена кукуерита // *Известия Академии наук ЭССР*. 1955. Т. IV. № 4. С. 587–598.
- Fomina A. S. Oxidative destruction of kerogen kukersite. *Proceedings of the AS of the Estonian SSR*, 1955, V. IV, No. 4, pp. 587–598. (in Russian)
- Фрейдлин Г. Н. Алифатические дикарбоновые кислоты. М.: Химия, 1978. 263 с.
- Freidlin G. N. Aliphatic dicarboxylic acids. Moscow: Chemistry, 1978, 263 p. (in Russian)

- Хейнс А. Методы окисления органических соединений: Алканы, алкены, алкины и арены: Пер. с англ. М.: Мир, 1988. 400 с.
- Haynes A. Methods of oxidation of organic compounds: Alkanes, alkenes, alkynes and arenes: Transl. from English. Moscow: Mir, 1988, 400 p. (in Russian)
- Чурсина Н. А. Окисление бурого угля перманганатом калия в щелочной среде // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. 2016. № 3. С. 60–62.
- Chursina N. A. Oxidation of brown coal with potassium permanganate in an alkaline environment. Science, new technologies and innovations of Kyrgyzstan, 2016, No. 3, pp. 60–62. (in Russian)
- Ambles A., Djordjevic M., Vitorovic D. Multistage alkaline permanganate degradation of a type-III kerogen. Chemical Geology. 1985. Vol. 48. P. 305–312.
- Bajc S., Amble A., Largeau C., Derenne S., Vitorovic D. Precursor biostructures in kerogen matrix revealed by oxidative degradation: oxidation of kerogen from Estonian kukersite. Organic Geochemistry. 2001. Vol. 32. P. 773–784. DOI: PII: S0146-6380(01)00042-0.
- Barakat A. O., Scholz-Böttcher B. M., Rullkötter J. Ruthenium tetroxide oxidation of immature sulfur-rich kerogens from the Nördlinger Ries (southern Germany). Fuel. 2012. Vol. 96. pp. 176–184. DOI: 10.1016/j.fuel.2011.12.058.
- Blokker P., van Bergen P., Pancost R., Collinson M. E., de Leeuw J. W., Sinninghe Damste J. S. The chemical structure of *Gloeocapsomorpha prisca* microfossils: Implications for their origin. Geochimica et Cosmochimica Acta. 2001. Vol. 65. No. 6. P. 885–900.
- Boucher R. J., Standen G., Eglinton G. Molecular characterization of kerogens by mild selective chemical degradation – ruthenium tetroxide oxidation. Fuel. 1991. Vol. 70. Iss. 6. P. 695–702. DOI: 10.1016/0016-2361(91)90064-H.
- Budinova T., Razvigorova M., Tsyntsarski B., Petrova B., Ekinci E., Yardim M. F. Characterization of Bulgarian oil shale kerogen revealed by oxidative degradation. Chemie der Erde. 2009. Vol. 69. P. 235–245.
- Derenne S., Largeau C., Casadevall E., Sinninghe Damste J. S., Tegelaar E. W., De Leeuw J. W. Characterization of Estonian kukersite by spectroscopy and pyrolysis: evidence for abundant alkyl phenolic moieties in an Ordovician, marine, type II/I kerogen. Organic Geochemistry. 1990. Vol. 16. P. 873–888.
- Derenne S., Metzger P., Largeau C., van Bergen P. F., Gatellier J. P., Sinninghe Damste J. S., de Leeuw J. W., Berkloff C. Similar morphological and chemical variations of *Gloeocapsomorpha prisca* in Ordovician sediments and cultured *Botryococcus braunii* as a response to changes in salinity. Organic Geochemistry. 1992. Vol. 19. P. 299–313.
- Hayatsu, R., Scott, R. G., Winans, R. E. CHAPTER IV – Oxidation of Coal. Organic Chemistry. 1982. V. 5. Part D. P. 279–354.
- Hold I. M., Brussee N. J., Schouten S. and Sinninghe Damste J. S. Changes in the molecular structure of a Type II-S kerogen (Monterey Formation, U. S. A.) during sequential chemical degradation. Organic Geochemistry. 1998. Vol. 29. №5–7. P. 1403–1417. DOI: 10.1016/S0146-6380(98)00158-2.
- Ishiwatari R., Morinaga S., Simoneit B. R. T. Alkaline permanganate oxidation of kerogens from Cretaceous black shales thermally altered by diabase intrusions and laboratory simulations. Geochimica et Cosmochimica Acta. 1985. Vol. 49. P. 1825–1835. DOI: 10.1016/0016-7037(85)90152-8.
- Ishiwatari R., Morinaga S., Yamamoto S., Machihara T. Characteristics of kerogens from Recent marine and lacustrine sediments: GC/MS analysis of alkaline permanganate oxidation products. Journal of Southeast Asian Earth Sciences. 1991. Vol. 5. No 1–4. P. 53–60.
- Khaddor M., Ziyad M., Amble A. Structural characterization of the kerogen from Youssoufia phosphate formation using mild potassium permanganate oxidation. Organic Geochemistry. 2008. Vol. 39. P. 730–740.
- Lille U., Heinmaa I., Pehk T. Molecular model of Estonian kukersite kerogen evaluated by <sup>13</sup>C MAS NMR spectra. Fuel. 2003. Vol. 82. P. 799–804.
- Mastalerz M., Schimmelmann A., Hower J. C., Lis G., Hatch J., Jacobson S. R. Chemical and isotopic properties of kukersites from Iowa and Estonia. Org. Geochem., 2003. Vol. 34. P. 1419–1427.
- Maximov O. B., Schapovalov V. E., Shvets T. V. Alkaline permanganate oxidation of methylated humic acids. Fuel. 1972. Vol. 51. P. 185–189.
- Maximov O. B., Shvets T. V., Elkin Yu. N. On permanganate oxidation of humic acids. Geoderma. 1977. Vol. 19. Iss. 1. P. 63–78. DOI: 10.1016/0016-7061(77)90014-3.
- Petersen H. I., Rosenberg P., Nytoft H. P. Oxygen groups in coals and alginite-rich kerogen revisited. International Journal of Coal Geology 74 (2008) 93–113. DOI:10.1016/j.coal.2007.11.007
- Riboulleau A., Derenne S., Sarret G., Largeau C., Baudin F., Connan J. Pyrolytic and spectroscopic study of a sulphur-rich kerogen from the «Kashpir oil shales» (Upper Jurassic, Russian platform). Organic Geochemistry. 2000. Vol. 31. P. 1641–1661.
- Rullkötter J., Michaelis W. The structure of kerogen and related materials. A review of recent progress and future trends. Organic Geochemistry. 1990. Vol. 16. № 6. P. 829–852.
- Schouten S., Pavlovic D., Sinninghe Damste J. S., de Leeuw J. W. Nickel boride: an improved desulphurizing agent for sulphur-rich geomacromolecules in polar and asphaltene fractions // Organic Geochemistry. 1993. Vol. 20. № 7. P. 901–909. DOI: 10.1016/0146–6380(93)90101-G.
- Sinninghe Damste J. S., Rijpsma W. I. C., Kock-van Dalen A. C., de Leeuw J. W., Schenk P. A. Quenching of labile functionalised lipids by inorganic sulphur species: Evidence for the formation of sedimentary organic sulphur compounds at the early stage of diagenesis // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1989. Vol. 58. P. 1343–1355. DOI: 10.1016/0016–7037(89)90067–7.
- Vitorovic D. Structure elucidation of kerogen by chemical methods. In Kerogen. Insoluble Organic Matter from Sedimentary Rocks (Edited by Durand B.). Paris: Editions Technip. 1980. 520 p.
- Vitorovic D., Ambles A., Djordjevic M. Relationship between kerogens of various structural types and the products of their multistep oxidative degradation // Organic Geochemistry. 1984. Vol. 6. P. 333–342.
- Vitorovic D., Ambles A., Bajc S., Cvetkovic O. Characterization of kerogen from Messel shale based on multistage alkaline permanganate degradation // Fuel. 1988. Vol. 67. P. 983–993.
- Yoshioka H., Ishiwatari R. An improved ruthenium tetroxide oxidation of marine and lacustrine kerogens: possible origin of low molecular weight acids and benzenecarboxylic acids // Organic Geochemistry. 2005. Vol. 36 (1). P. 83–94. DOI: 10.1016/j.orggeochem.2004.07.002.





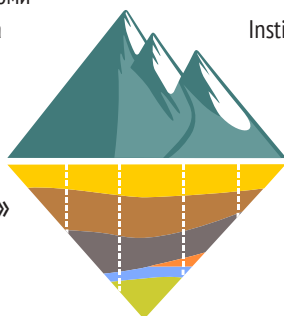
## Хроника, события, факты. История науки • Chronicle, events, facts. History of Science

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное агентство по недропользованию  
Правительство Республики Коми  
Министерство природных ресурсов Республики Коми  
Институт геологии им. академика Н. П. Юшкина  
ФИЦ Коми НЦ УрО РАН

Russian Federation Ministry of Education and Science  
Federal Agency for Mineral Resources  
Government of the Komi Republic  
Komi Republic Ministry of Natural Resources  
Institute of Geology named after Academician N. P. Yushkin  
FRC Komi SC UB RAS

**XVIII Геологический съезд Республики Коми**  
**«Геология и минеральные ресурсы**  
**Европейского Северо-Востока России»**

**10–12 апреля 2024 г.**  
г. Сыктывкар



**The 18th Geological Congress of the Komi Republic**  
**Geology and Mineral Resources**  
**of the European North-East of Russia**

**April 10–12, 2024**  
Syktvykar

### ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАБОТЫ СЪЕЗДА

- Региональная геология, тектоника, геодинамика
- Геология нефти и газа
- Месторождения стратегически и экономически важного минерального сырья
- Петрология, магматизм, геохронология
- Литология, минералогия и геохимия
- Стратиграфия, палеонтология
- Цифровые технологии и методы моделирования в геологии и горном деле
- Новые технологии добычи и переработки минерального сырья
- Экономика недропользования
- Природные и техногенные геосистемы, технологии мониторинга, снижения антропогенного воздействия
- История геологических исследований, объекты геологического наследия и памятники природы
- Геологическое образование и просвещение

### ОРГКОМИТЕТ СЪЕЗДА

#### Председатель:

**В. В. Уйба** – Глава Республики Коми

#### Заместители:

**Г. А. Машковцев** – президент Геологического общества Российской Федерации, научный руководитель ФГУП «ВИМС»

**А. Е. Растрогин** – начальник Департамента по недропользованию по Северо-Западному федеральному округу, на континентальном шельфе и в Мировом океане

#### Члены оргкомитета:

А. М. Асхабов, А. А. Барях, А. П. Боровинских, И. Н. Бурцев, О. В. Казанов, Е. А. Киселевич, Ю. В. Лисин, М. С. Панов, Е. А. Пономаренко, А. Н. Попов, М. В. Рымарь, А. Д. Саетгараев, М. Б. Тарбаев, М. В. Топорков

#### Контрольные сроки:

Представление докладов: **16 февраля**

Рассылка программы съезда: **18 марта**

#### Контакты:

Институт геологии им. акад. Н. П. Юшкина ФИЦ Коми НЦ УрО РАН

**Почтовый адрес:** ул. Первомайская, д. 54, Сыктывкар, 167982.

XVIII Геологический съезд Республики Коми

#### Телефоны:

(8212) 24-56-98 – Антропова Евгения Викторовна (ответственный секретарь оргкомитета)

(8212) 24-53-53 – приемная Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН

**Факс:** (8212) 24-09-70

**Эл. почта:** geo@geo.komisc.ru

### MAIN DIRECTIONS OF THE CONGRESS

- Regional geology, tectonics, geodynamics
- Geology of oil and gas
- Deposits of strategically and economically important mineral raw materials
- Petrology, magmatism, geochronology
- Lithology, mineralogy and geochemistry
- Stratigraphy, paleontology
- Digital technologies and modeling methods in geology and mining
- New technologies for mining and processing of mineral raw materials
- Economics of subsoil use
- Natural and technogenic geosystems, technologies of monitoring, reducing of anthropogenic impact
- History of geological researches, geological heritage sites and natural monuments
- Geological education and enlightenment

### ORGANIZING COMMITTEE OF THE CONGRESS

#### Chairman:

V. V. Uyba – the Head of the Komi Republic

#### Deputies:

**G. A. Mashkovtsev** – President of the Russian Federation Geological Society, scientific director of Federal State Unitary Enterprise "VIMS"

**A. E. Rastrogina** – Head of the Department for subsoil use in the North-Western federation district, on the continental shelf and in the world ocean

#### Members of the organizing committee:

А. М. Асхабов, А. А. Барях, А. П. Боровинских, И. Н. Бурцев, О. В. Казанов, Е. А. Киселевич, Ю. В. Лисин, М. С. Панов, Е. А. Пономаренко, А. Н. Попов, М. В. Рымарь, А. Д. Саетгараев, М. Б. Тарбаев, М. В. Топорков

#### Deadlines:

Presentation of reports: **February 16**

Mailing of the Congress program: **March 18**

#### Contacts:

Institute of Geology named after Acad. N. P. Yushkin FRC Komi SC UB RAS

**Postal address:** 54 Pervomayskaya st, Syktvykar, 167982. The 18<sup>th</sup> Geological Congress of the Komi Republic

#### Phones:

+7 (8212) 24-56-98 – Antropova Evgenia Viktorovna (executive secretary of the organizing committee)

+7 (8212) 24-53-53 – reception of the Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS

**Fax:** +7 (8212) 24-09-70

**Email:** geo@geo.komisc.ru

## Российская научная конференция «Геохимия и петрография угля, горючих сланцев и битуминозных пород» (2–5 октября 2023 г.)

### Russian scientific conference “Geochemistry and petrography of coal, oil shales and bituminous rocks” (October 2–5, 2023)

On October 2–5, 2023, the Russian scientific conference “Geochemistry and petrography of coal, oil shale and bituminous rocks” was held in Syktyvkar for the first time. Organizers of the conference: Institute of Geology named after Academician N. P. Yushkin FRC Komi SC UB RAS (IG FRC Komi SC UB RAS), Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, RAS Scientific Council on problems of geology and development of oil, gas and coal deposits, RAS Scientific Council on the chemistry of coal. The scientific session was held in a mixed online-offline format. The conference covered a wide range of topics on the geochemistry of organic matter of oil shales and bituminous rocks, and on mathematical methods, statistical analysis and computer modeling in the study of coal and bituminous rocks. Coal subjects also included studies of the microelement composition and features of the petrographic structure of coals, the organic geochemistry of coals, including the Pechora coal basin, and possibilities of obtaining ash-free types of solid fuel on their basis, developing of coal processing technology. Proceedings of the conference were published.

В начале октября этого года в Сыктывкаре впервые прошла Российская научная конференция «Геохимия и петрография угля, горючих сланцев и битуминозных пород», организаторами которой выступили Институт геологии имени академика Н. П. Юшкина ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН), Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Научный совет РАН по проблемам геологии и разработки месторождений нефти, газа и угля, Научный совет РАН по химии угля. Мероприятие являлось логиче-

ским продолжением конференции «Геохимия нефти и газа, нефтематеринских пород, угля и горючих сланцев», проведённой в 2019 году в Сыктывкаре.

Официальное открытие конференции состоялось 3 октября. С приветственным словом к участникам обратился директор Института геологии к. г.- м. н. И. Н. Бурцев. Он рассказал об истории освоения угольного бассейна региона и о вкладе учёных Института геологии в изучение геохимии и петрографии углей, горючих сланцев, битуминозных пород, а также пожелал интересных докладов, плодотворной работы и успехов всем участникам конференции. В рамках конференции был рассмотрен широкий круг вопросов, посвящённых как геохимии органического вещества горючих сланцев и битуминозных пород, так и математическим методам, статистическому анализу и компьютерному моделированию в исследованиях углей и битуминозных пород. Угольная тематика также включала исследования микроэлементного состава и особенности петрографического строения углей, органическую геохимию углей, в том числе Печорского угольного бассейна, и возможность получения на их основе беззолых видов твёрдого топлива, вопросы разработки технологии переработки углей. За три дня было заслушано 44 доклада, из них 10 — в дистанционном режиме. Также было представлено 12 стендовых докладов. Видео всех докладов транслировалось в прямом эфире на канале института.

Сотрудниками ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН были представлены сообщения по различным направлениям. Так, Н. С. Бурдельной был сделан доклад, посвященный органической геохимии ряда разновозрастных углей; Д. А. Бушнев рассказал об экспериментальном изучении газообразования органического вещества доманикового сланца. Доклады О. П. Тельновой и Л. С. Кочевой удачно дополняли друг друга и содержали информацию об этапах девонского углеобразо-







вания и изучении органического вещества фитолейм растений-углеобразователей девонских барзасских углей. А. В. Журавлев представил локальную оценку продукции органического вещества на основе компьютерного моделирования. И. С. Котик сообщил о нефтегазоматеринских породах Кортаихинской впадины Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции; А. А. Ильченко дала характеристику органического вещества поддоманикового комплекса южной части Ижма-Печорской синеклизы. Доклады Н. С. Ковальчук и Т. Г. Шумиловой затронули проблемы элементов-примесей в углеродистых сланцах окружения Карской астроблемы и геохимии продуктов высокобарного преобразования органического вещества углеродистых пород мишени Карской астроблемы.

В заключительной дискуссии был отмечен высокий уровень исследований в области органической геохимии и углехимии, проводимых в России в целом и в частности сыктывкарскими учёными. Было отмечено, что на конференции рассматривались сугубо научные вопросы, которые в дальнейшем помогут решать стратегические задачи государства. В качестве одного из плюсов конференции было названо участие значительного числа молодых специалистов.

Всего работе конференции приняли участие более 60 человек — представители крупных научно-исследовательских и производственных организаций,

а также высших учебных заведений Сыктывкара (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, СГУ им. Питирима Сорокина), Томска (АО «ТомскНИПИнефть», ФГОУ ВО НИ ТПУ»), Новосибирска (ИГД СО РАН, ИНГГ СО РАН, ИХТТМ, НГУ), Тюмени (ООО «ТННЦ», ТюмГУ), Москвы (ВНИГРИ, ГИН РАН, ИПКОН РАН, ИПНГ РАН, МГУ имени М. В. Ломоносова, НИТУ МИСИС, ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг, Сколковский институт науки и технологий), Санкт-Петербурга (ООО «Газпромнефть НТЦ»), Казани (АН РТ, КФУ), Уфы (ООО «РН-БашНИПИнефть»), Самары (ООО «СамараНИПИнефть»), Саратова (СГУ), Ростова-на-Дону (ЮФУ), Кызыла (ТувИКОПР СО РАН), Кемерово (ИУ ФИЦ УУХ СО РАН, КемГУ), Владивостока (ДВГИ ДВО РАН), Южно-Сахалинска (ИМГиГ ДВО РАН), Якутска (ИГДС СО РАН, ИПНГ СО РАН).

В рамках мероприятия состоялось знакомство участников конференции с лабораторной базой и специалистами Института геологии, а также была проведена экскурсия в Геологическом музее им. А. А. Чернова.

К конференции был подготовлен и издан сборник материалов. Ссылка на электронную версию публикации размещена на сайте ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН.

Сопредседатель конференции

д. г.-м. н. Д. А. Бушнев

Учёный секретарь конференции

к. г.-м. н. О. В. Валяева

## Указатель материалов, опубликованных в *Вестнике геонаук* в 2023 г.

### Index of publications in *Vestnik of Geosciences* in 2023

Научные статьи	Номер	Страницы
Высокобарический метаморфизм в харбейском метаморфическом комплексе (Полярный Урал) Уляшева Н. С. ....	6	3—10
Геолого-геоморфологическое районирование бассейна р. Сейды (восток Большеземельской тундры) на основе цифровой модели рельефа ArticDEM. Исаков В. А. ....	10	42—50
Геохимия органического вещества природных битумов в разрезе р. Кожвы (Тимано-Печорская провинция). Валяева О. В., Рябинкина Н. Н. ....	9	56—62
Геохимия редкоземельных элементов и цериевая аномалия в морских осадочных карбонатах: современные представления. Дуб С. А., Мизенс Г. А. ....	11	3—17
Гравитационные и магнитные аномалии, порождаемые сдвиговыми структурами в верхней части земной коры. Сенчина Н. П., Асосков А. Е. ....	2	3—9
Два эпизода надсубдукционного интрузивного магматизма в пределах Печорской зоны фундамента Печорской синеклизы. Андреичев В. Л., Соболева А. А., Довжикова Е. Г., Ронкин Ю. Л. ....	10	15—25
Из архива профессора Д. П. Григорьева: воспоминания об А. К. Болдыреве, В. А. Зильберминце, Л. Л. Иванове, В. И. Крыжановском, П. П. Сущинском и Н. М. Федоровском. Войтеховский Ю. Л. ....	5	30—39
Из архива профессора Д. П. Григорьева: к 160-летию со дня рождения В. И. Вернадского и 140-летию со дня рождения А. Е. Ферсмана. Войтеховский Ю. Л. ....	4	26—33
Из архива профессора Д. П. Григорьева: к 250-летию Горного музея. Войтеховский Ю. Л. ....	8	31—39
Из архива профессора Д. П. Григорьева: письма Е. В. Цинзерлинг. Войтеховский Ю. Л. ....	2	31—36
Из опыта преподавания. XII. Зарождение кристалла и принцип равного ближайшего окружения Войтеховский Ю. Л. ....	6	48—51
Изотопный состав и условия образования фаменских карбонатолитов Центрально-Хорейверского вала (Хорейверская впадина, Печорская плита). Матвеева Н. А. ....	11	37—47
Ископаемые кости миоцен-голоценовых верблюдов Евразии (Россия): минералого-геохимические свойства и экологические реконструкции Силаев В. И., Титов В. В., Тесаков А. С., Филиппов В. Н., Васильев Е. В., Смолева И. В., Шанина С. Н., Киселева Д. В., Хазов А. Ф., Макеев Б. А., Солошенко Н. Г., Окунева Т. Г. ....	9	3—32



Ископаемые смолы Аляски: история изучения. Мартыросян О. В. ....	5	3–13
Комплексы позвоночных и зоны верхнего живета и нижнего франа Восточно-Европейской платформы и Урала. Иванов А. О. ....	1	23–29
Литолого-генетическая характеристика верхнетриасовых дальнегорских известняков Таухинского террейна (гора Сахарная, Сихотэ-Алинь). Пунина Т. А., Малышева Е. Н. ....	7	27–35
Личная библиотека палеонтолога Д. М. Раузер-Черноусовой. Роцевская Л. П., Симакова С. А. ....	5	40–47
Метабазиты р. Лунвож (Средний Тиман): петрография, минералогия, петрохимия Шмакова А. М. ....	10	26–36
Микросферолиты в биогенно-абиогенной системе карбонатообразования (на примере нижнеэотических карбонатов, мыс Казантип, Керченский п-ов). Антошкина А. И. ....	11	26–36
Минералого-петрохимические особенности габбро-долеритов криволукского комплекса Самигуллин А. А., Савельев Д. Е. ....	1	30–41
Минералы Приполярноуральской хрусталеносной провинции в фондах Геологического музея им. А. А. Чернова. Жданова Л. Р., Астахова И. С. ....	5	14–24
Минеральный состав руд месторождения Беспантау. Сайитов С. С., Цой В. Д. ....	6	21–28
Моделирование нисходящего переноса $^{210}\text{Pb}$ на примере естественного торфяника Иласского болотного массива Европейской Субарктики России: модель IP-CRS Яковлев Е. Ю., Кудряцева А. А., Орлов А. С. ....	7	43–51
Монацит щелочных рудных метасоматитов Нижнеиземского рудного поля (Средний Тиман): Th-U-Pb-данные. Удоротина О. В., Вирюс А. А., Козырева И. В. ....	7	17–26
Научное наследие А. К. Карабанова в области наук о Земле Кухарик Е. А., Хомич В. С., Грибик Я. Г., Богдасаров М. А., Мартыросян О. В. ....	4	34–41
Некоторые детали строения северной центриклинали Косью-Уньинской синклинали (р. Илыч, Северный Урал). Шмелёва Л. А., Пономаренко Е. С. ....	11	48–58
Новые данные к истории фауны мелких растительноядных млекопитающих Северного Урала в позднеледниковье и голоцене. Кряжева И. В. ....	3	11–22
О проблеме границы среднего и верхнего девона на Восточно-Европейской платформе Евдокимова И. О. ....	1	4–15
Об относительной роли сил динамического давления и вязких напряжений в тектонически активных переходных зонах Земли. Гаврилов С. В., Харитонов А. Л. ....	12	37–44
Образование углеводородных газов доманиковым сланцем при пиролизе в автоклаве в присутствии воды. Бушнев Д. А., Бурдельная Н. С., Ильченко А. А., Сенникова Я. Д. ....	10	37–41
Окисление керогена горючих сланцев перманганатом калия в щелочной среде Бурдельная Н. С., Сенникова Я. Д., Бушнев Д. А. ....	12	45–54
Особенности накопления и миграции техногенных радионуклидов Cs-137 и Sr-90 в тундровых ландшафтах Российской Арктики (на примере бассейна реки Несь, Канинская тундра) Пучков А. В., Яковлев Е. Ю. ....	1	42–51
Особенности пространственного распределения $^{137}\text{Cs}$ , $^{40}\text{K}$ , $^{226}\text{Ra}$ , $^{232}\text{Th}$ в почвах г. Полярные Зори (Мурманская область). Игловский С. А., Баженов А. В., Яковлев Е. Ю. ....	10	51–56
Особенности фрамбоидальных пиритов Михеевского медно-порфирового месторождения (Южный Урал). Леонова Л. В., Азовскова О. Б., Сорока Е. И. ....	9	33–39
Палеопочвы кровли протерозойского фундамента территории Курской магнитной аномалии Алексеева Т. В., Любарова А. П., Алексеев А. О. ....	11	18–25
Палинокомплекс сынинской свиты (средний триас) из обнажений на реке Вёртный (Большесынинская впадина, Тимано-Североуральский регион) Ильина Н. В., Жарков В. А. ....	3	23–41
Палинологическая зональность живетско-франского стратиграфического интервала в Тимано-Североуральском регионе. Тельнова О. П., Шумилов И. Х. ....	1	16–22
Первые данные по петрохимии и минералогии месторождения плитчатого камня Талатшинское-2 (Южный Урал). Самигуллин А. А., Никонов В. Н., Савельев Д. Е. ....	4	14–25
Периодический закон Д. И. Менделеева, космогеохимическая система Ю. Г. Щербакова и перспективы развития минералого-геохимических исследований Кокин А. В., Силаев В. И., Кокин М. А., Хазов А. Ф. ....	6	29–36
Пигментные холелиты. Машина Е. В. ....	8	17–25
Подготовка тетраэтоксисилана для получения сферических частиц кремнезема. Часть 2. Примеси и их влияние на размеры формирующихся глобул. Камашев Д. В. ....	6	37–47





Позднедевонская плюмовая Цилемская дайка (Средний Тиман): обоснование геодинамической природы и возраста. Шуйский А. С., Куликова К. В., Удоратина О. В., Лебедев В. А. ....	12	30—36
Природа сфероидального золота Среднекыввожской россыпи на Среднем Тимане Сокерин М. Ю., Глухов Ю. В., Шайбеков Р. И., Макеев Б. А., Зорина С. О. ....	9	40—47
Природа эволюции магматизма в истории Земли. Шкодзинский В. С. ....	4	4—13
Разработка базы данных фондов Геологического музея им. А. А. Чернова. Попвасев К. С. ....	5	25—29
Распределение рудообразующих элементов и минералов в объеме золоторудных объектов Западного Узбекистана. Цой В. Д., Сайитов С. С. ....	2	10—25
Состояние изученности и корреляционный потенциал раннекаменноугольных брахиопод западного склона севера Урала. Ерофеевский А. В. ....	7	3—16
Сравнительная характеристика диаплектовых и расплавных силикатных стёкол Карской астроблемы. Зубов А. А., Шумилова Т. Г., Исаенко С. И. ....	9	48—55
Строматолиты в верхневизейских отложениях разреза «Пача-Ласта» (р. Илыч, Северный Урал) Шадрин А. Н., Иванова Р. М., Пономаренко Е. С. ....	12	16—23
Строматолиты из нового местонахождения на Среднем Тимане: их морфологические и структурные особенности. Антропова Е. В. ....	12	24—29
Структурные особенности докембрийских образований Приполярного и Полярного Урала: сравнительный анализ. Потапов И. Л., Попвасев К. С., Пыстин А. М. ....	10	3—14
Технология извлечения полезных компонентов из горючих сланцев месторождения Актау Холиков А. Б., Ахмедов М. Ш., Алматов И. М. ....	3	42—47
Типоморфизм рентгеноструктурных характеристик золота (на примере россыпей и рудопроявлений Тимано-Североуральского региона) Глухов Ю. В., Макеев Б. А., Сокерин М. Ю., Ефанова Л. И. ....	8	3—16
Титанониобаты и ториевые минералы в карбонатизированных флюидоэксплозивных дайках Среднего Тимана. Голубева И. И., Гракова О. В., Филиппов В. Н., Шуйский А. С., Бурцев И. Н. ....	6	11—20
Толбачинские алмазы (ТТИ-50, Камчатка): новое доказательство их вулканогенной природы Силаев В. И., Аникин Л. П., Карпов Г. А., Хазов А. Ф. ....	2	37—41
Упорядочение катионов в минералах сложного состава: РЗ-сергеванит — второй представитель группы эвдиалита с примитивной ячейкой. Расцветаева Р. К. ....	8	26—30
Условия образования кварцево-жильной минерализации Кыввожского золотороссыпного поля на Среднем Тимане (по данным изучения флюидных включений) Сокерина Н. В., Сокерин М. Ю., Глухов Ю. В., Исаенко С. И., Шайбеков Р. И., Зорина С. О. ....	3	3—10
Формации каменноугольно-нижнепермских карбонатных отложений бассейна верхней Печоры (Северный Урал). Сандула А. Н. ....	12	4—15
Cathodoluminescence of conodont elements. Zhuravlev A. V. ....	7	36—42
Electroacoustic properties of various types of quartz in the finely dispersed state Kotov L. N., Lasyok M. P., Dong Faqin, Wei Zhang ....	2	26—30

#### Конференции, семинары

15th ICAM First Circular. ....	2	43—44
15-й Международный конгресс по прикладной минералогии: трудный путь из Белгорода в Чэнду Котова О. Б. ....	10	57—59
32-я Всероссийская научная конференция «Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского сегмента» ....	7	56
IX Всероссийское совещание «Юрская система России: проблемы стратиграфии и палеогеографии» (9—15 сентября 2023 г.) ....	9	63—64
XV Российский семинар «Технологическая минералогия в оценке качества минерального сырья природного и техногенного происхождения» ....	5	56
Всероссийское совещание «Юрская система России: проблемы стратиграфии и палеогеографии» ....	3	51
К вопросу о границе среднего и верхнего девона Тельнова О. П. ....	1	55—56
Перспективы освоения Тимано-Печорской нефтегазовой провинции и планы постановки региональных геолого-разведочных работ ....	2	42
Полевая экскурсия в Национальный парк Цзяньмэнь. Голубева Ю. В. ....	10	62—63
Проект РФ-NSFC: рабочий семинар в Юго-Западном университете науки и технологий (Мяньян) и полевой выезд на рудник Баймулин-Линьхуа (провинция Сычуань). Голубев Е. А. ....	10	59—61



Российская научная конференция «Геохимия и петрография угля, горючих сланцев и битуминозных пород» (2—5 октября 2023 г.) .....	12 .....	56
Российская научная конференция «Геохимия и петрография угля, горючих сланцев и битуминозных пород» .....	3 .....	52

#### Хроника, события, факты

50 лет лаборатории литологии и геохимии осадочных формаций Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН .....	11 .....	59
50 лет лаборатории литологии и геохимии осадочных формаций.....	4 .....	42—43
55-летний юбилей Геологического музея им. А. А. Чернова. Астахова И. С. ....	1 .....	52—54
Академику А. М. Асхабову — 75 .....	8 .....	40
Вступая в 2023 год: закрепить на достигнутых рубежах и двигаться дальше. Асхабов А. М. ....	1 .....	3
Выдающийся исследователь силура и девона (к 100-летию со дня рождения Антониды Ивановны Першиной). Безносова Т. М., Жданова Л. Р. ....	3 .....	48—50
Документальное и материальное научное наследие ученых-геологов в Геологическом музее им. А. А. Чернова. Астахова И. С. ....	5 .....	48—50
Корифей угольной геологии (К 100-летию со дня рождения Юрия Васильевича Степанова) .....	5 .....	55
Новые издания.....	2 .....	42
Новые издания.....	4 .....	43—44
Произведения живописи в стенах Института геологии. Жданова Л. Р. ....	5 .....	51—54
Произведения живописи в стенах Института геологии .....	6 .....	53—56
Произведения живописи в стенах Института геологии .....	7 .....	52—55
Славный путь геолога-нефтяника (к 70-летию Н. А. Малышева) .....	10 .....	63—64
Среднеюрский плезиозавр из Мезенской синеклизы. Экспедиция-2023. Зверьков Н., Безносков П. ....	6 .....	52

#### На обложке

Средний Тиман, обн. 49, подошва устьярегской свиты на высоте 29 м от уровня реки Фото И. Х. Шумилова .....	1
Пыльцевое зерно <i>Aster sibiricus</i> L. (сем. Asteraceae). Фото Голубевой Ю. В., оператор СЭМ А. В. Кряжев ....	2
Фрагмент колонии кораллов-ругоз (находка О. Габовой). Фото Р. Шуктомова .....	3
Чёртов Палец, река Усьва, Пермский край. Фото А. Перетягина .....	4
Горный хрусталь с включениями гематита разной генерации. Якутия, Алданский щит, месторождение Перекатное — 777—891, дар В. Л. Калинина .....	5
Индукционные грани кварца на золоте. Пай-Хой. Фото Р. И. Шайбекова.....	6
Раскопки в бассейне реки Вычегды, извлечение частично сочленённого скелета плезиозавра, 2023 Фото П. Безносова.....	7
Катодолуминесцентное изображение циркона из плагиомигматитов ханмейхойской свиты (Полярный Урал). Фото А. Шуйского .....	8
Река Чуя (до Мажойского каскада), Республика Алтай. Фото А. Перетягина .....	9
Габбро (шлиф с анализатором). Место отбора: Слюдяная Горка, хребет Марун-Key, Полярный Урал. Фото Н. С. Уляшевой .....	10
Стильномелан в ассоциации с шамозитовыми ооидами. Р. Б. Косью, Северный Урал. Верхний ордовик, сандбийский ярус, большекосьюнская свита. Фото Е. С. Пономаренко .....	11
Золотой дракон (яшма, нефрит, металл, шпатель, 8 x 10 см). Коллекция А. П. Боровинских. Фото Р. Шуктомова .....	12

#### 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: 31.01.2024. Формат бумаги 60 × 84 1/8. Печать RISO. Усл. п. л. 8. Тираж 140. Заказ 1219. 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 А. Перетягина, Р. Шайбекова, С. Исаенко, Н. Уляшевой, Ю. Голубевой