Вестник

Февраль, 2019 г., № 2 (290)

Института геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН

Научно-информационное издание, основанное академиком Н. П. Юшкиным в 1995 г.

Пятилетний импакт-фактор РИНЦ журнала (2017) —0.316

Содержание

Научные статьи

Новое местонахождение юрских морских рептилий на Европейском Севере России
В. А. Салдин, Н. Г. Зверьков, П. А. Безносов, Л. А. Глинских, Л. А. Селькова, А. В. Журавлев 3

Структурные особенности марункеуского эклогит-гнейсового комплекса Полярного Урала по гравимагнитным данным
Т. А. Пономарева, А. М. Пыстин 14

Минеральный состав и геммологические характеристики интерьерно-ювелирных аммонитов Ярославской области
Д. А. Петроченков 22

Петрохимические и петрофизические свойства структурных разновидностей максовитов Зажогинского месторождения
А. В. Первунина, О. В. Мясникова 29

Изменения экологического состояния геологической среды урбанизированной территории от воздействия техногенного геофизического поля г. Сыктывкара
А. Н. Вихоть 36

Основания многомерного кластерного анализа в геологии
Ю. А. Ткачев 44

Хроника, события, факты

Многообразие минерального мира 53

Геологический музей им. О. С. Кочеткова 54

Анонс конференции 56

Главный редактор А. М. Асхабов**, зам. главного редактора** О. Б. Котова**,**
ответственный секретарь Т. М. Безносова**, тех. редактор** Г. Н. Каблис**, зав. редакцией** Т. А. Некучаева

Редакционный совет — 2019:

А. И. Антошкина, Сыктывкар, Россия
М. А. Т. М. Брокманс, Тронхейм, Норвегия
И. Н. Бурцев, Сыктывкар, Россия
Д. А. Бушнев, Сыктывкар, Россия
Ю. Л. Войтеховский, Санкт-Петербург, Россия
А. Д. Гвишиани, Москва, Россия
И. В. Козырева, Сыктывкар, Россия
М. Комак, Любляна, Словения
Р. И. Конеев, Ташкент, Узбекистан
В. А. Коротеев, Екатеринбург, Россия
С. В. Кривовичев, Санкт-Петербург, Россия
С. К. Кузнецов, Сыктывкар, Россия
М. Мартинс, Ору-Прету, Бразилия
Т. П. Майорова, Сыктывкар, Россия
Ж. К. Мелгарехо, Барселона, Испания
Ф. Мон, Пекин, Китай
П. Мянник, Таллин, Эстония
А. М. Пыстин, Сыктывкар, Россия
К. М. Соджа, Гамильтон, Нью-Йорк, США
О. В. Удоратина, Сыктывкар, Россия
М. А. Федонкин, Москва, Россия

February, No. 2 (290), 2019

Vestnik

Institute of Geology of Komi Science Center of Ural Branch RAS

Scientific information edition founded by Academician N. P. Yushkin in 1995

Five-year RSCI impact factor (2017) — 0.316

Content

Scientific articles

A new locality of Jurassic marine reptiles in the North of European Russia
V. A. Saldin, N. G. Zverkov, P. A. Beznosov, L. A. Glinskikh, L. A. Selkova, A. V. Zhuravlev 3

Structural characteristics of marunkeu eclogite-gneiss complex in the Polar Urals inferred from gravi-magnetic data
T. A. Ponomareva, A. M. Pystin 14

Mineral composition and gemological characteristics of the interior and jewellery ammonites of the Yaroslavl region
D. A. Petrochenkov 22

Petrochemical and petrophysical properties of high-carbon rocks from the Zazhogino deposit
A. V. Pervunina, O. V. Myasnikova 29

Changes of the ecological state of the geological environment of the urbanized territory from the influence of the technogenic geophysical field of Syktyvkar
A. N. Vikhot 36

Multivariate cluster analysis in geology
Yu. A. Tkachev 44

Chronicle, events, facts

Diversity of mineral world 53

Geological Museum named after O. S. Kochetkov 54

Conference Announcement 56

Chief Editor A. M. Askhabov, **Deputy Chief Editor** O. B. Kotova,
Executive Editor T. M. Beznosova, **Technical Editor** G. N. Kablis, **Managing Editor** T. A. Nekuchaeva

2019 Editorial Board:

Anna I. Antoshkina, Syktyvkar, Russia
Maarten A.T.M. Broekmans, Trondheim, Norway
Igor N. Burtsev, Syktyvkar, Russia
Dmitry A. Bushnev, Syktyvkar, Russia
Yury L. Voytekhovsky, Saint Petersburg, Russia
Alexey D. Gvishiani, Moscow, Russia
Irina V. Kozyreva, Syktyvkar, Russia
Marko Komac, Ljubljana, Slovenia
Rustam I. Koneev, Tashkent, Uzbekistan
Viktor A. Koroteev, Ekaterinburg, Russia
Sergey V. Krivovichev, Saint Petersburg, Russia
Sergey K. Kuznetsov, Syktyvkar, Russia
Maximiliano de Souza Martins, Ouro Preto, Brazil
Tatyana P. Mayorova, Syktyvkar, Russia
Joan Carles Melgarejo, Barcelona, Spain
Fancong Meng, Beijing, China
Peep Männik, Tallinn, Estonia
Constance M. Soja, Hamilton, NY, USA
Alexander M. Pystin, Syktyvkar, Russia
Oksana V. Udoratina, Syktyvkar, Russia
Mikhail A. Fedonkin, Moscow, Russia

УДК 551.762 (470.1) DOI: 10.19110/2221-1381-2019-2-3-13

НОВОЕ МЕСТОНАХОЖДЕНИЕ ЮРСКИХ МОРСКИХ РЕПТИЛИЙ НА ЕВРОПЕЙСКОМ СЕВЕРЕ РОССИИ

В. А. Салдин[1], Н. Г. Зверьков[2,3,4], П. А. Безносов[1], Л. А. Глинских[5,6], Л. А. Селькова[1], А. В. Журавлев[1]
[1]Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, *Beznosov@geo.komisc.ru*
[2]МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва; [3]ГИН РАН, Москва; [4]ПИН им. А.А. Борисяка РАН, Москва
[5]ИНГГ СО РАН, Новосибирск; [6]НГУ, Новосибирск

Приводится детальное описание разреза среднеюрских терригенных отложений на р. Яренге (Архангельская область) — нового местонахождения остатков морских рептилий. Среди находок преобладают посткраниальные элементы скелета нескольких особей плезиозавра *Muraenosaurus*, также обнаружены единичные кости плиозавра и ихтиозавра. Данные палинологического и микропалеонтологического анализов позволяют ограничить возраст вмещающих пород ранним — средним батом. Литологические особенности пород и присутствие в них редких находок фораминифер указывают на мелководные прибрежно-морские условия осадконакопления. Обсуждается значение новых находок позвоночных для изучения эволюционной истории юрских морских рептилий.

Ключевые слова: *юра, литология, плезиозавры, ихтиозавры, фораминиферы, микрофитофоссилии, сысольская свита, батский ярус, Мезенская синеклиза.*

A NEW LOCALITY OF JURASSIC MARINE REPTILES IN THE NORTH OF EUROPEAN RUSSIA

V. A. Saldin[1], N. G. Zverkov[2,3,4], P. A. Beznosov[1], L. A. Glinskikh[5,6], L. A. Selkova[1], A. V. Zhuravlev[1]
[1]Institute of Geology of Komi SC of UB of RAS, Syktyvkar, *Beznosov@geo.komisc.ru*
[2]Lomonosov Moscow State University, Moscow; [3]Geological Institute of RAS, Moscow
[4]Borissiak Paleontological Institute of RAS, Moscow;
[5]Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of SB of RAS, Novosibirsk
[6]Novosibirsk State University, Novosibirsk

A detailed description of the section of the Middle Jurassic terrigenous deposits exposed on the Yarenga River, Arkhangelsk Region, is provided. The section represents a new locality of fossil remains of Jurassic marine reptiles. Among them, the postcranial elements of the plesiosaur *Muraenosaurus* dominate. Pliosaur and ichthyosaur finds, each represented by a single bone, also occur in the assemblage. The palynological and micropaleontological data support the Early — Middle Bathonian age of the deposits. The lithological characters of the rocks and the presence of rare foraminifera indicate shallow marine environments. The significance of new discoveries for the fossil record of the Jurassic marine reptiles is briefly discussed.

Keywords: *Jurassic, lithology, plesiosaurs, ichthyosaurs, foraminifera, microphytofossils, Sysola Formation, Bathonian, Mezen Syneclise.*

Введение

Юрские отложения на севере европейской части России развиты достаточно широко. Без учета арктических архипелагов их выходы известны на территории Республики Коми, Ненецкого автономного округа, Архангельской и Кировской областей (рис. 1). Они вскрыты многочисленными руслами рек и скважинами в пределах Мезенской и Печорской синеклиз и представлены главным образом средним и верхним отделами юрской системы [2, 4, 15 и др.]. Большей частью эти отложения имеют морской генезис и довольно хорошо охарактеризованы спорово-пыльцевыми комплексами, микрофауной и остатками морских беспозвоночных, что позволяет расчленять их на ярусы и зоны [10, 20, 23 и др.]. В основании юрских отложений повсеместно, за исключением некоторых участков Печорской синеклизы, залегает преимущественно песчаная толща. Взгляды на ее возраст и генезис противоречивы [6, 9, 17, 20, 23 и др.]. Наиболее полно стратиграфия этой части разреза рассмотрена в работе С. А. Чирвы и Н. К. Куликовой [23], в которой обосновывается ее приоритетное название — сысольская свита.

В отличие от обильной и разнообразной фауны беспозвоночных, находки высших позвоночных в юрских отложениях на Европейском Северо-Востоке России редки, а сведения о них отрывочны. За исключением фрагментов скелета ихтиозавра *Arthropterygius* sp. из окрестностей д. Порожск (р. Ижма) и части передней конечности *Ophtalmosaurus* sp. из приустьевой части р. Волонги — обе находки из волжского яруса [35] — все прочие представлены малодиагностичными элементами скелета. Среди них позвонки ихтиозавра из выходов кимериджских отложений на р. Пижме [18], один позвонок из келловейской части разреза на той же реке (хранится в ЗИН РАН, № 14/26); два позвонка ихтиозавра из осыпи обнажения верхнеюрских отложений на р. Айюве ([19], хранятся в Историко-краеведческом музее г. Ухты, № 1982/1, 1982/2); позвонок ихтиозавра из разреза келловея у с. Вотча (находка Н. Г. Зверькова, 2018 г., колл. ИГ Коми НЦ, № 93/13); несколько позвонков плезиозавра из предположительно батских отложений у с. Лойно ([8], колл. СГУ № 104-а/16; сборы Л. А. Сельковой, 2012 г., колл. ИГ Коми НЦ, № 93/14, 93/15); позвонки, ребра и фаланги ихтиозавров и плезиозавров из местонахождения Ыб (Каргорт) на р. Сысоле ([1, 11], сборы П. А. Безносова, колл. ИГ Коми НЦ, № 93/4, 93/10, 93/11). К сожалению, большинство остатков высших позвоночных из ыбского местонахождения находится в частной коллекции, они недоступны для изучения и, по всей видимости, собраны из осыпи (подробней см.: [13]). Лишь один фрагмент позвонка ихтиозавра взят из коренного выхода волжского яруса [1].

Новое местонахождение остатков юрских морских рептилий было обнаружено сыктывкарцем К. Н. Романовым в сентябре 2018 г. в результате частной поездки в Архангельскую область совместно с од-

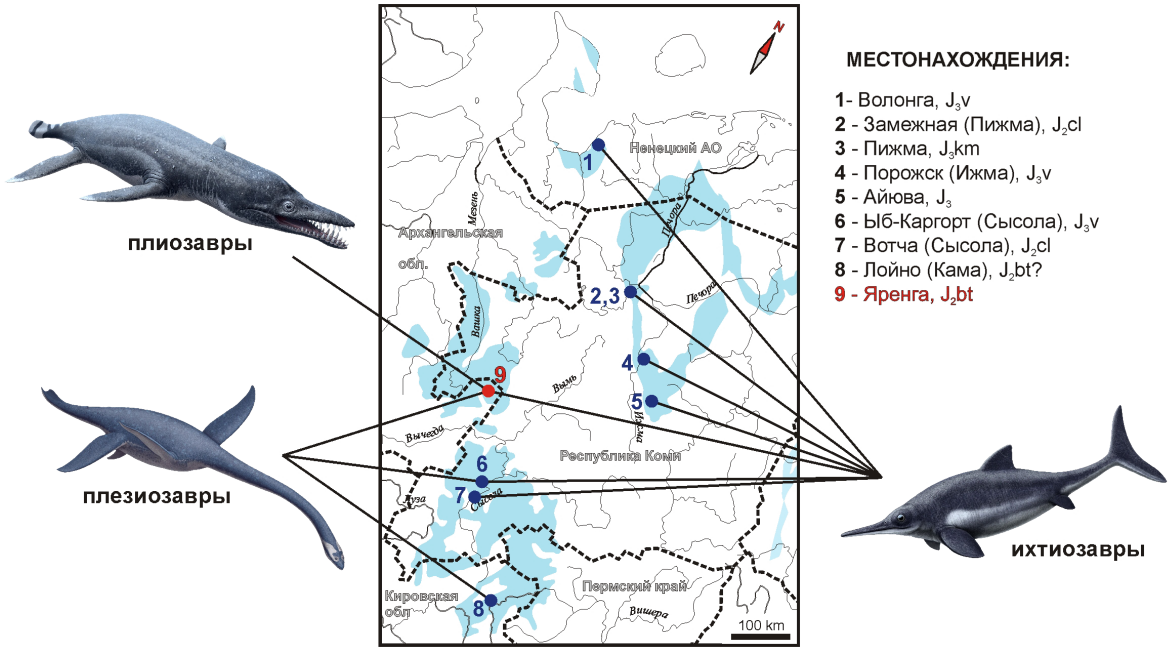


Рис. 1. Схема выходов на поверхность юрских отложений (показаны голубой заливкой) и расположения местонахождений морских рептилий на Европейском Севере России. Реконструкции ящеров выполнены А. А. Атучиным

Fig. 1. Sketch map showing the distribution of the Jurassic outcrops (filled by blue) and marine reptile localities in the European north of Russia. The restorations of prehistoric creatures are by A. A. Atuchin

ним из авторов данной статьи (В. А. Салдин). Кости конечностей, позвонки и ребра, принадлежащие плезиозаврам, были найдены в осыпи под обнажением юрских глин и песков, расположенном в среднем течении р. Яренги. Позже, в октябре того же года, местонахождение было повторно посещено В. А. Салдиным, П. А. Безносовым и А. В. Журавлевым, в результате чего было произведено детальное описание разреза, установлено точное положение в разрезе костеносного горизонта и собран дополнительный палеонтологический материал, содержащий в том числе хвостовой позвонок ихтиозавра и бедренную кость плиозавра. Все найденные экземпляры костей отпрепарированы, укреплены полимерным акриловым консолидантом и переданы на хранение в музей Института геологии Коми НЦ УрО РАН (колл. № 711).

Описание разреза

Обнажение юрских пород, вмещающих остатки позвоночных, расположено на правом берегу р. Яренги, в 10 км ниже устья р. Уктым и в 4 км выше устья руч. Мадмас. Его высота составляет около 10 м. Слои залегают субгоризонтально и прослеживаются на 200 м вдоль русла в западно-юго-западном направлении. Они были вскрыты расчистками в трех профилях, что позволило выявить линзовидную форму костеносного слоя (рис. 2). Описание слоев начато в верхней (по течению реки) части обнажения снизу вверх по склону и разрезу и продолжено в 30 м ниже, где наблюдается максимальная мощность костеносной линзы:

1. Песок кварцевый разнозернистый белый (рис. 2, f) с включениями углефицированных остатков древесины длиной до 10 см, ориентированных согласно напластованию. Основание слоя находится ниже уреза воды ..... 1—1.50 м
2. Песок полевошпат-кварцевый мелко- и среднезернистый серый и коричневато-серый с мелкой косой слойчатостью (рис. 2, f), выраженной чередованием разноцветных слойков толщиной 3—15 мм. Слойки в косых сериях падают на юго-запад. В подошве слоя встречаются редкие карманообразные углубления до 5 см, в нижней части — относительно крупные углефицированные остатки растительности (2 × 15 см) и линзы (1 × 20 см) темно-серой глины ..... 0.12—0.20 м
3. Тонкое переслаивание песков серых глинистых и глин песчаных темно-серых. Глинистые пески толщиной до 10 см, чаще 3—4 см, преобладают над глинистыми прослоями. В песках наблюдается мелкая косая слойчатость с падением на юго-запад. Прослои песчанистых глин (1—3 см) не выдержаны по мощности, а в более крупных из них иногда отмечаются линзочки (1 × 10 см) песка глинистого. Присутствуют остатки углефицированной древесины. Возможно, здесь при первом посещении обнажения был найден фрагмент ствола древесины длиной до 0.5 м и диаметром около 0.2 м ..... 0.50—0.70 м
4. Песок полевошпат-кварцевый среднезернистый коричневато-серый и зеленовато-серый с мелкой косой слойчатостью. Слойки в косых сериях падают на юго-запад. На некоторых участках присутствуют ходы *Skolithos* (рис. 2, e, j), представляющие собой трубчатые образования диаметром около 8 мм и длиной до 20 см, ориентированные субперпендикулярно к напластованию и заполненные песком крупнозернистым белым. Они часто вторично окрашены пленками гидроксидов железа в бурые цвета ..... 0.20 м
5. Песок полевошпат-кварцевый мелкозернистый коричневый сильно биотурбированный (рис. 2, e) ..... 0.08 м
6. Песок кварцевый крупно- и среднезернистый белый со следами биотурбации, выделяющейся коричневым цветом и реликтами мелкой косой слойчатости с падением слойков на юго-запад. В кровле слоя отмечается буро-ржавые плиточки толщиной до 1 см, цементированные гидроксидами железа..... 0.07—0.25 м

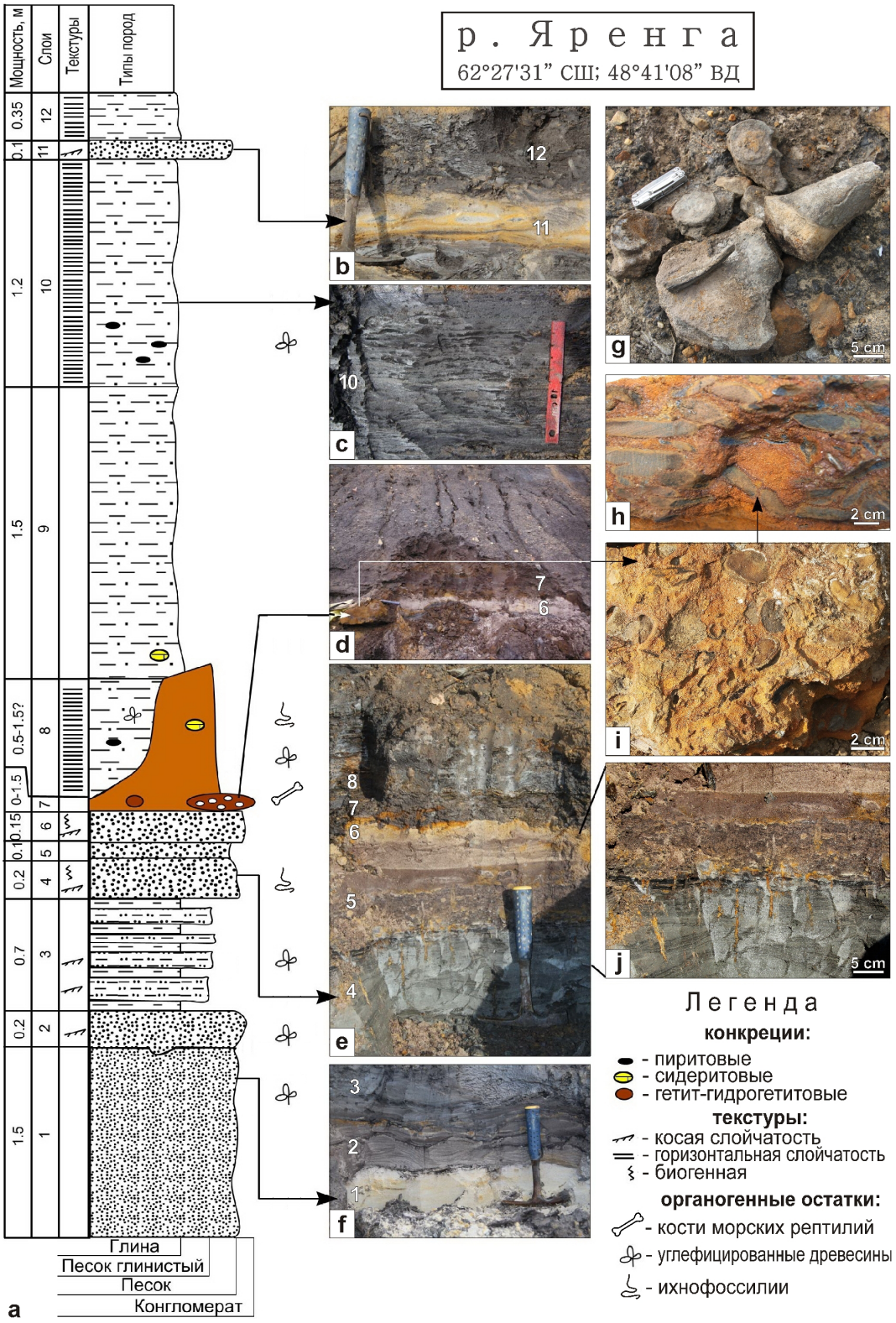


Рис. 2. Литолого-стратиграфическая колонка и детали строения среднеюрских отложений на р. Яренге, вмещающих остатки морских рептилий: a — литолого-стратиграфическая колонка; b — мелкая косая слойчатость в белых песках слоя 12; c — горизонтальная слоистость, выраженная чередованием глин разного цвета и состава; d — костеносная линза; e — интервал разреза от слоя 4 до слоя 8 в верхнем (по течению) конце обнажения; f — основание разреза, сложенное кварцевым и полевошпат-кварцевыми песками; g — посткраниальные элементы скелета плезиозавра, найденные в осыпи под обнажением; h — аргиллитовые плоскогалечные конгломераты костеносной линзы, вертикальный срез; i — то же, горизонтальный срез; j — ходы *Skolithos* в слое 4. Номера слоев на фото обозначены цифрами

Fig. 2. Geological log and sedimentological details of the Middle Jurassic bone-bearing beds on the Yarenga River: a — lithological column; b — fine lamination in the white sands of bed #12; c — horizontal bedding marked by clays of different color and composition; d — bone-bearing lens; e — general view of beds #4–#8 in the upstream part of the outcrop; f — basal beds of the section represented by quartz and feldspar-quartz sands; g — postcranial elements of plesiosaurs found in a scree close to the outcrop; h — mudstone flat pebble conglomerates of the bone-bearing lens in cross section; i — the same rock of the lens in horizontal section; j — bed #4 with the *Skolithos* burrows. The bed numbers are indicated on photos by digits

7. Глинисто-алевритово-песчаная порода, пятнистая коричнево-бурая, залегающая в виде линзовидного прослоя и вмещающая остатки рептилий. Максимальная мощность слоя наблюдается ближе к верхнему (по течению) концу обнажения. Выше и ниже по реке мощность уменьшается и, возможно, слой выклинивается. Местонахождение костей приурочено примерно к средней части обнажения, где мощность линзы составляет около 0.3 м. Здесь же распространены конкреции гетит-гидрогетитовые и сидеритовые, линзовидные стяжения плоскогалечных конгломератов (рис. 2, d, h, g). В одной из сидеритовых конкреций обнаружена створка пелециподы. В слое обильны остатки углефицированной древесины анатомической сохранности. По простиранию глинисто-песчаная линза замещается слоистыми глинами (слой 8). Встречаются участки с ходами *Paleophycus* диаметром 3—5 мм, приуроченными к более плотным разностям пород и выполненными глинистым материалом, а также с ходами, предварительно отнесенными к *Arenicolites*. Последние представляют собой вертикальные сдвоенные трубчатые образования U-образной формы, заполненные ожелезненным песком. Диаметр трубок составляет 5—8 мм, стенки их неровные и слегка оплывшие, чем подчеркивается горизонтальная слоистость вмещающего осадка. Вертикальные участки хода сближены между собой, так что ширина всего хода составляет 1—2.5 см, максимальная зафиксированная длина хода — 10 см.....0.1 —1.5 м
8. Тонкое переслаивание (первые миллиметры) глин темно-серых и светло-серых песчанистых. Наблюдается чередование в разрезе интервалов (2—5 см), в которых темно-серые разности превалируют, и интервалов (1.5—3 см) с преобладанием глин светло-серых песчанистых.....0.50—1.5 м
9. Глина серая комковатая (?) с включениями конкреций сидеритовых. Комки (?) глины размером первые сантиметры слабо выделяются коричневатым цветом и отделяются друг от друга пленкой глины зеленовато-серой, толщиной в несколько миллиметров .....1.10 м
10. Переслаивание (0.5—1.5 см) глины алевритопесчанистой светлой и темно-серой без обломочной примеси (рис. 2, c). Наблюдаются интервалы мощностью до 7 см с преобладанием то светлых, то темных разностей. В нижней части слоя распространены конкреции пиритов удлиненно-округлой формы размером до 10 см.....1.20 м
11. Песок кварцевый крупно- и среднезернистый белый с косой слоистостью (падение слойков на юго-запад) (рис. 2, b). Мощность слоя выдержана, слой прослеживается вдоль всего обнажения и образует уступ в верхней части склона.....0.10 м
12. Глины, сходные с глинами слоя 10, с линзами песка в основании .....0.35 м
13. Галечники (0.2 м) и пески (~ 2 м) четвертичной системы.

Общая вскрытая мощность разреза среднеюрских отложений около 7 м.

Краткая характеристика пород

В изученном разрезе распространены кварцевые пески и алевритово-песчаные глины, встречаются линзовидные тела плоскогалечных конгломератов, пиритовые, сидеритовые и гетит-гидрогетитовые конкреции. *Пески* по составу обломочной части представлены двумя типами: мономиктовыми кварцевыми и полевошпат-кварцевыми (по класификации В. Д. Шутова). Среди них можно выделить разновидности по сортировке, окатанности и наличию цемента. *Глины* темно-серого цвета слагают около половины разреза. На некоторых интервалах в них наблюдается тонкая горизонтальная слойчатость, выраженная чередованием более светлых слойков толщиной в несколько миллиметров, обогащенных алевритово-песчаной примесью, и темно-серых глин с меньшим количеством обломочной примеси. Среди глинистых минералов преобладают каолинит и иллит, распространен железистый хлорит, а также присутствует незначительное количество смешанослойных образований типа иллит/смектит и редко иллит/хлорит. В костеносном, разнородном по составу интервале разреза распространены *плоскогалечные конгломераты* в виде линз мощностью 0.2 м и 0.6 м по удлинению (рис. 2, d, i, h). Обломки галек уплощенно-округлой формы диаметром 3—4 см сложены темно-серым алевритовым аргиллитом (визуальное определение) и содержат углефицированные остатки растений (до 5 см). Заполнителем служит песчаный материал, сцементированный гидроксидами железа. *Пиритовые конкреции* встречены в слоях 8 и 10 в виде уплощенно-округлых образований диаметром 3—7 см и толщиной 1—1.5 см. Содержание пирита по визуальным оценкам составляет 50—70 % объема конкреций, остальная часть сложена углеродисто(?)-глинистым веществом. *Сидеритовые* конкреции серого цвета на свежем сколе округлой формы и размером не более 10 см. Они встречены в костеносном слое и в вышележащих глинах. Сидерит образует микроглобулы диаметром 0.01—0.02 мм, радиально-лучистого строения. Среди сидеритовой микроглобулярной основной массы отмечаются аутигенные минералы дисульфидов железа и песчано-алевритово-глинистый материал вмещающей породы. В некоторых из них распространены ходы илоедов, заполненные песчаным кварцевым материалом, и, что важно отметить, обнаружены многокамерные однорядные фораминиферы, а также, вероятно, остатки водорослей. *Стяжения гидроксидов железа* разнообразны по форме и также связаны с костеносной линзой. Стяжения (до 10—15 см в диаметре) полые и сходны по форме с жеодами. Стенки их толщиной 1—3 см сложены песчаным материалом, сцементированным гидроксидами железа. Внутри стяжений находятся темно-серые комки (размеры до первых сантиметров) слаболитифицированных алевритово-песчаных пород.

Условия осадконакопления

Изученные отложения удалось сопоставить со стратиграфическими подразделениями, выделенными в этом районе ранее. Разрез по р. Яренге впервые изучался М. П. Раюшкиным (1938 г.), который составил сводное описание и установил среднеюрский возраст отложений (келловейский ярус в то время относился к верхнему отделу юрской системы). Согласно этому описанию, в исследованном нами обнажении вскрывается средняя (вторая) толща докелловейской части юрского разреза, предположительно слои 7—8 по [2]. Согласно расчленению среднеюрских отложений бассейна р. Яренги В. И. Теодоровичем, изученный нами разрез отвечает по составу пород нижнему глинистому «горизонту» сысольской свиты [20, 21].

Чередование в разрезе глин и песков указывает на частую смену спокойно- и активно-водных режи-

мов. Вверх по разрезу отмечается тенденция преобладания спокойноводных условий осадконакопления. Мелкая однонаправленная косая слойчатость желобообразной формы в песках указывает на ее формирование под действием небольших потоков, распространенных в приливно-отливной полосе, на мелководье, в речных, а также морских глубоководных осадках [14, 21]. Измерение падений косой слоистости показало устойчивость юго-западного направления потоков. Обнаруженные ихнофоссилии и единичные раковины бентосных двухстворчатых моллюсков указывают на насыщенность придонных вод кислородом. Находки фораминифер и собственно рептилий уверенно свидетельствуют о морских условиях образования изученных отложений. Многочисленные остатки растительности, включая фрагменты стволов деревьев (причем как в глинах, так и в песках), а также обогащенность пород железом (сульфидная, карбонатная и гидроксидная минеральные фазы) косвенно указывают на близость суши, а каолинит, один из основных породообразующих минералов глин — на гумидный климат. Предположительно рассматриваемые отложения формировались в прибрежно-морской обстановке. Характерное строение разреза с уменьшением зернистости вверх по разрезу, состав пород и их текстурные особенности (биотурбация, слойчатость мелкой ряби течений, горизонтальная и линзовидная) имеют наибольшее сходство с отложениями приливно-отливной равнины. Формирование аргиллитовых окатышей (в гипергенных условиях сцементированных гидроксидами железа) характерно для обстановок русловых промоин.

Микропалеонтологическая характеристика

Проведен микропалеонтологический анализ образцов пород из слоев 3, 7—10, 12. Микрофауна обнаружена в глинах и конкрециях слоя 9, а также в палинологических препаратах из слоев 7 и 9. Выявлен комплекс фораминифер, представленный агглютинированными и секреционно-известковыми формами. Раковины характеризуются различной степенью сохранности. Встречаются относительно целые экземпляры, обломки, ядра, а также отдельные камеры. Некоторые агглютинированные раковины разрушаются непосредственно в процессе обработки. В комплексе установлены следующие таксоны: *Hyperammina* sp., *Kutsevella* sp., (рис. 3, e), *Recurvoides* sp., *Trochammina* cf. *jakovlevae* Glinsk. et Nik., *Trochammina* sp. (рис. 3, f), *Reophax* sp. (рис. 3, a), *Nodosaria* sp. (рис. 3, g), *Globulina praecircumphlua* Gerke (рис. 3, b—d).

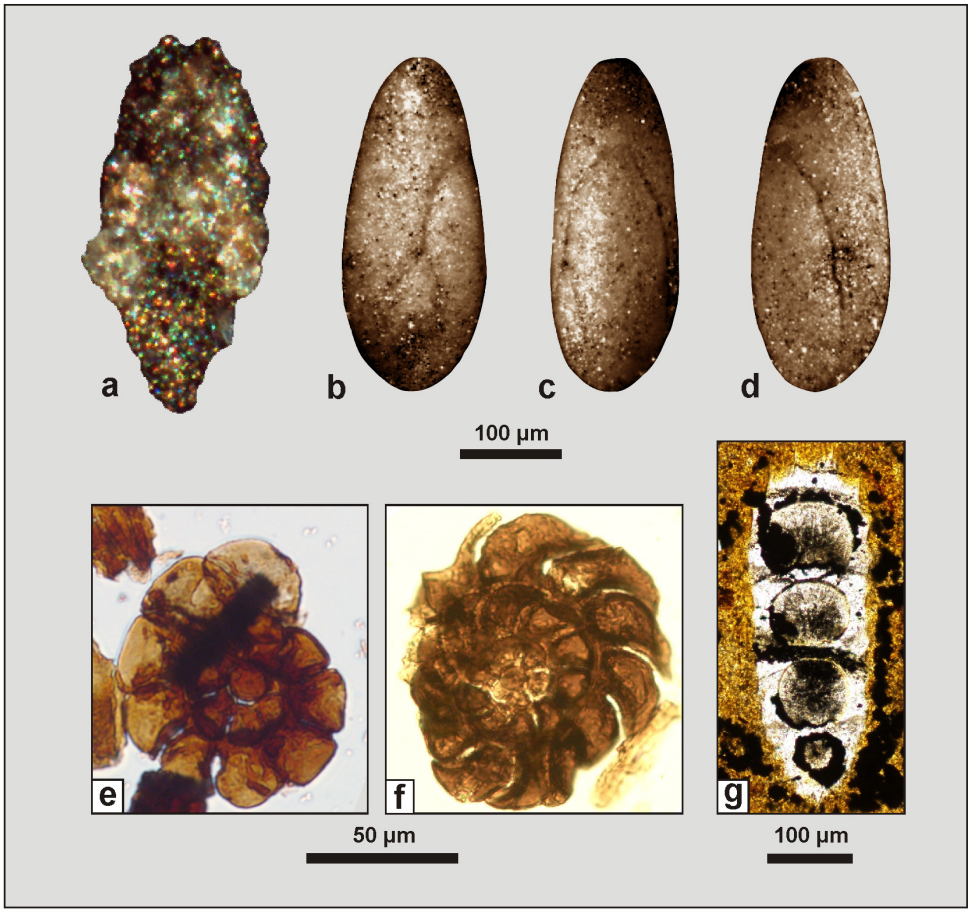


Рис. 3. Фораминиферы из разреза среднеюрских отложений по р. Яренге, Архангельская область: a — *Reophax* sp., слой 9; b, c, d — *Globulina praecircumphlua* Gerke, слой 9; e — *Kutsevella* sp., слой 7; f — *Trochammina* sp., слой 9; g — *Nodosaria* sp., слой 9, сидеритовая конкреция, шлиф. Образцы, изображенные на фото a—d, хранятся в лаборатории микропалеонтологии ИНГГ СО РАН

Fig. 3. Foraminifera from the Middle Jurassic deposits of the Yarenga River section (Arkhangelsk Region): a — *Reophax* sp., bed #9; b, c, d — *Globulina praecircumphlua* Gerke, bed #9; e — *Kutsevella* sp., bed #7; f — *Trochammina* sp., bed #9; g — *Nodosaria* sp., bed #9, cross-section of the siderite concretion. Specimens shown in photos a—d are stored in the Laboratory of micropaleontology of Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS

Выявленный комплекс фораминифер по таксономическому составу близок к таковому из среднеюрских отложений бассейна р. Ижмы и характерен для фораминиферовой зоны Trochammina jakovlevae (=T. “aff. praesquamata”) [3, 22, 32]. Учитывая, что *G. praecircumphlua* Gerke не встречается в самых низах этой зоны [12], стратиграфическое положение фораминиферового комплекса предлагается рассматривать не в полном ее объеме, а сопоставлять с интервалом, ограниченным верхами верхнего байоса — средним батом.

Палинологическая характеристика

На палинологический анализ были отобраны образцы из слоев 3, 7, 9, 10 и 12. Изученные образцы насыщены спорами и пыльцой плохой сохранности. Во всех образцах отмечается небольшое количество диноцист, в образце из слоя 9 они встречаются чаще. Спектры, полученные из образцов, можно рассматривать в качестве единого палинокомплекса. Основной фон выделенного комплекса составляет пыльца голосеменных растений с доминированием двухмешковых молодого облика Pinaceae и Podocarpaceae. Единично встречается пыльца древнего облика Pseudopicea, Protopicea, многочисленная в отложениях байоса — бата [7]. Характерно постоянное присутствие небольшого количества *Sciadopityspollenites mesozoicus* Coup. (рис. 4, l), *S. multiverrucosus* Sach. et Il. Отмечено наличие единичных зерен безмешковой пыльцы *Classopollis classoides* (Pflug), *C. minor* Poc. Основную долю споровой части составляют *Leiotriletes, Cyathidites.* Немногочисленны споры плаунов и мхов *Lycopodiumsporites subrotundum* K.-M., *Neoraistrickia rotundiformis* K.-M. (рис. 4, g), *Stereisporites congregatus* (Bolch.) (рис. 4, c). Присутствуют единичные споры папоротников *Gleicheniidites laetus* (Bolch.), *G. senonicus* (Ross), *G. umbonatus* (Bolch.) (рис. 4, d), первое появление которых отмечается в батское время. Также в палиноспектрах посто-

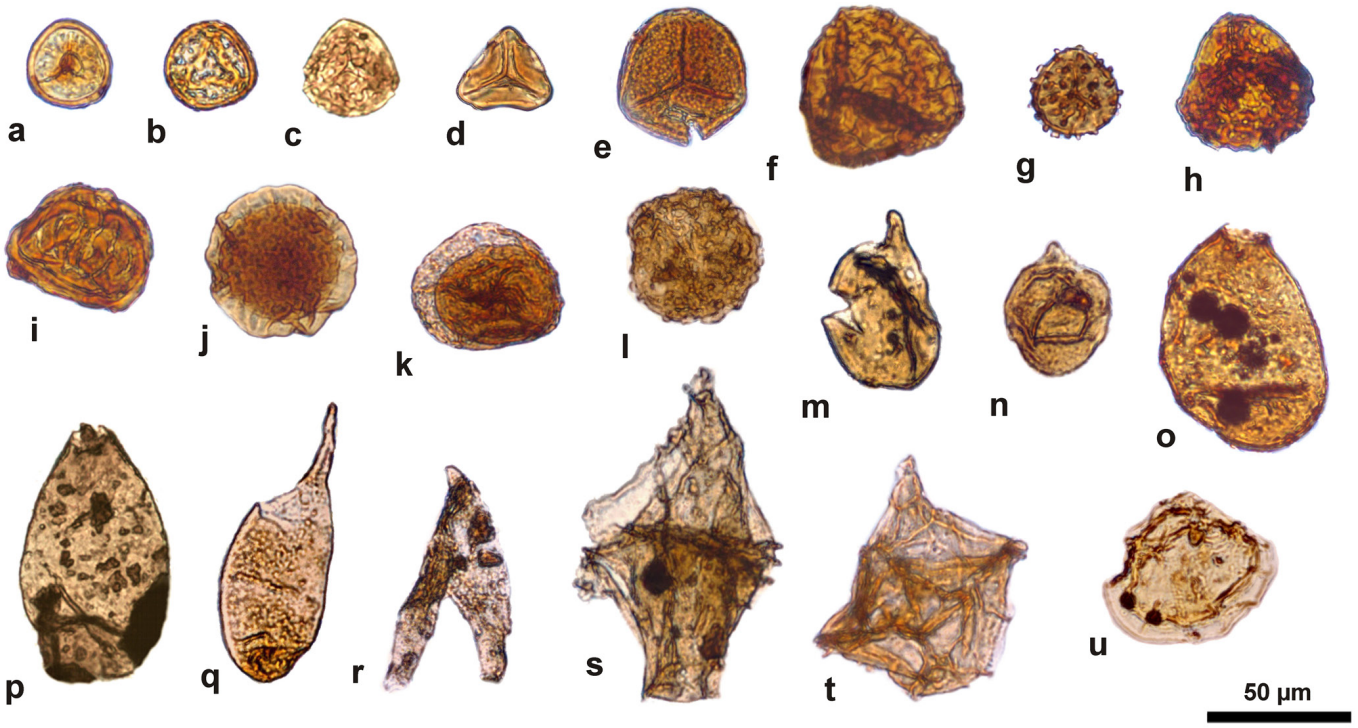


Рис. 4. Микрофитофоссилии из разреза среднеюрских отложений по р. Яренге, Архангельская область: a — *Stereisporites bujargiensis* (Bolchovitina) Schulz, слой 3; b — *Stereisporites(*?), слой 10; c — *Stereisporites congregatus* (Bolchovitina) Schulz, слой 3; d — *Gleicheniidites umbonatus* (Bolchovitina), слой 7, e — *Sestroisporites pseudoalveolatus* (Couper), слой 7; f — *Campotriletes cerebriformis* Naumova, слой 7; g — *Neoraistrickia rotundiformis* Kara-Mursa, слой 7; h — *Klukisporites variegatus* (Couper), слой 7; i — *Duplexisporites anagrammensis* (Kara-Mursa), слой 7; j — *Callialasporites dampieri* Balme, слой 12; k — *Perinopollenites elatoides* Couper, слой 10; l — *Sciadopityspollenites mesozoicus* Couper, слой 7; m — *Pareodinia ceratophora* Deflandre, слой 3; n — *Evansia* sp., слой 9; o — *Fromea tornatilis* (Drugg) Lentin et Williams, слой 7; p — *Fromea tornatilis* (Drugg) Lentin et Williams, слой 12; q — cf. *Imbatodinium* sp., слой 9; r — *Nannoceratopsis pellucida* Deflandre, слой 7; s — *Gonyaulacysta jurassica* (Deflandre), слой 9; t — *Rhynchodiniopsis cladophora* (Deflandre), слой 7; u — *Sirmiodinium grossi* Alberti, слой 9

Fig. 4. Microphytofossils from the Middle Jurassic deposits of the Yarenga River section (Arkhangelsk Region): a — *Stereisporites bujargiensis* (Bolchovitina) Schulz, bed #3; b — *Stereisporites*?, bed #10; c — *Stereisporites congregatus* (Bolchovitina) Schulz, bed #3; d — *Gleicheniidites umbonatus* (Bolchovitina), bed #7, e — *Sestroisporites pseudoalveolatus* (Couper), bed #7; f — *Campotriletes cerebriformis* Naumova, bed #7; g — *Neoraistrickia rotundiformis* Kara-Mursa, bed #7; h — *Klukisporites variegatus* (Couper), bed #7; i — *Duplexisporites anagrammensis* (Kara-Mursa), bed #7; j — *Callialasporites dampieri* Balme, bed #12; k — *Perinopollenites elatoides* Couper, bed #10; l — *Sciadopityspollenites mesozoicus* Couper, bed #7; m — *Pareodinia ceratophora* Deflandre, bed #3; n — *Evansia* sp., bed #9; o — *Fromea tornatilis* (Drugg) Lentin et Williams, bed #7; p — *Fromea tornatilis* (Drugg) Lentin et Williams, bed #12; q — cf. *Imbatodinium* sp., bed #9; r — *Nannoceratopsis pellucida* Deflandre, bed #7; s — *Gonyaulacysta jurassica* (Deflandre), bed #9; t — *Rhynchodiniopsis cladophora* (Deflandre), bed #7; u — *Sirmiodinium grossi* Alberti, bed #9

янны споры папоротников *Microlepidites crassirimosus* Timosh., *Osmundacidites jurassicus* K.-M., *Klukisporites variegatus* (Coup.) (рис. 4, h), *Sestroisporites pseudoalveolatus* (Coup.) (рис. 4, e), *Campotriletes cerebriformis* Naum. (рис. 4, f), *Duplexisporites anagrammensis* (K.-M.) (рис. 4, i). Важной чертой является присутствие небольшого количества зерен морского микрофитопланктона, представленного *Nannoceratopsis deflandrei* Evitt., *N. gracilis* Alb., *N. pellucida* Defl. (рис. 4, r), *Gonyaulacysta jurassica* (Defl.) (рис. 4, s), *Rhynchodiniopsis cladophora* (Defl.) (рис. 4, t), *Pareodinia ceratophora* Defl. (рис. 4, m), *Chytroeisphaeridia* sp., *Fromea amphora* Cook. et Eis., *F. tornatilis* (Drugg) Lent. et Will. (рис. 4, o, p), *Sirmiodinium grossi* Alb. (рис. 4, u), *Leiofusa* sp.

Данный палинокомплекс имеет общие черты с батским комплексом, установленным в среднеюрских отложениях северных районов Русской платформы [7], отличаясь наличием в нем диноцист. Большое сходство выделенный палинокомплекс имеет с комплексом *Cingulatisporites pseudoalveolatus, Sciadopitys mesozoicus* бат-келловейского возраста, установленным в юрских отложениях бассейна р. Сысолы [23], и комплексом, описанным из отложений очейской пачки сысольской свиты в бассейнах рек Яренги и Сысолы позднебатского-раннекелловейского возраста [16, 17]. В этих комплексах также отмечается широкое распространение пыльцы двухмешковых молодого облика, присутствие небольшого количества *Sciadopityspollenites*, единичных зерен *Classopollis*, наличие спор глейхениевых папоротников, а также постоянное участие небольшого количества морского фитопланктона.

Изученный комплекс сходен с комплексом с *Fromea tornatilis, Nannoceratopsis pellucida, Pareodinia ceratophora, Sirmiodinium grossi* из отложений нижнего — среднего бата бассейна р. Пижмы [33]. Первое появление *Fromea tornatilis*, *Sirmiodinium grossi* отмечается в верхах нижнего бата, а *Nannoceratopsis gracillis* не поднимается выше нижней части верхнего бата [33], и это позволяет ограничить интервал изученного палинокомплекса верхней частью нижнего — нижней частью верхнего бата.

Также описанный комплекс обнаруживает сходство с палинокомплексом с *Sestroisporites pseudoalveolatus, Sciadopityspollenites macroverrucosus* в интервале от среднего бата до низов келловея, выделенным из отложений Восточно-Европейской платформы [22], и по составу диноцист соответствует диноцистовой зоне *Dichadogonyaulax sellwoodi — Protobatioladinium elatmaensis*, относящейся к верхней части нижнего бата — нижней части верхнего бата Восточно-Европейской платформы [22].

Яренгский комплекс близок к комплексам миоспор и диноцист батского возраста, установленных А. А. Горячевой в темно-серых глинах на р. Ижме [5]. Общим для них является состав и количественное соотношение основных групп миоспор: доминирование двухмешковой пыльцы голосеменных растений, присутствие таких спор и пыльцы, как *Sciadopityspollenites*, *Classopollis classoides, Gleicheniidites, Sestroisporites pseudoalveolatus, Klukisporites variegatus, Neoraistrickia rotundiformis* и др., а также наличие небольшого количества диноцист *Nannoceratopsis pellucida, N. gracillis, Pareodinia ceratophora, Fromea tornatilis, Sirmiodinium grossi, Evansia sp.* и др.

Таким образом, таксономический состав палинокомплекса указывает на возраст вмещающих отложений не моложе бата. Учитывая данные по комплексу диноцист и фораминифер, изученный интервал разреза может быть ограничен верхами нижнего — средним батом.

Остатки рептилий и их значение

Всего на местонахождении обнаружено более двух десятков костей. Значительная их часть принадлежит длинношеим плезиозаврам рода *Muraenosaurus*, для которых в отличие от других среднеюрских представителей отряда характерны платицельные позвонки (найдено 4 грудных позвонка и один туловищный) и массивные укороченные проподиальные кости — найдены плечевая кость взрослой особи (32 см длиной) и плечевая кость молодой особи (26 см длиной) [28]. Также найдены неполная седалищная кость, фаланги, фрагменты ребер и фрагмент плечевой кости плезиозавров средних-крупных размеров, которые сами по себе невозможно определить точнее чем Plesiosauria indet. Тем не менее ребра и седалищная кость наряду с упомянутыми выше позвонками, судя по их размерам, могут принадлежать тому же экземпляру, что и крупная плечевая кость. Неподалеку от основной костеносной линзы, но выше по реке были найдены относительно крупная, хоть и неполная, бедренная кость молодого плиозавра (39 см длиной) и небольшой хвостовой позвонок ихтиозавра. Все найденные в коренном залегании костные остатки встречены в глинисто-песчаной линзе, в которой присутствуют сидеритовые и гетит-гидрогетитовые стяжения и линзы плоскогалечных конгломератов. Вероятно, местонахождение сформировалось за счет сгруживания и достаточно быстрого захоронения трупов или частично скелетизированных остатков морских рептилий в крупной промоине на крайнем мелководье. Отсутствие следов сортировки костных остатков по размеру и форме позволяет предположить их захоронение без существенной транспортировки. Корродированная поверхность костей, скорее всего, является результатом преимущественно химического выветривания в хорошо проницаемых для растворов (включая современные грунтовые воды) песчаных отложениях. Минеральная компонента костных тканей характеризуется относительно хорошей сохранностью при наличии микротрещиноватости и частичным заполнением внутренних полостей гипсом и сульфидами железа. Степень сохранности иллюстрируется результатами изучения поперечного среза фаланги плезиозавра (рис. 5, a). В шлифе видно, что кортекс большей частью разрушен (рис. 5, b, c), сохранившаяся губчатая кость пронизана многочисленными микротрещинами, полости в ней частично заполнены сульфидами и развивающимся по сульфидам гипсом (рис. 5 , c).

Современные сведения о разнообразии и эволюции морских рептилий мезозоя неполны. Их ископаемая летопись мозаично охарактеризована «окнами» с высокой частотой находок и интервалами, в которых остатки редки либо их нет совсем [26, 27, 29, 34]. Такие «окна» с обилием находок появились благодаря уникальным местонахождениям с благоприятными тафономическими условиями. Для средней юры

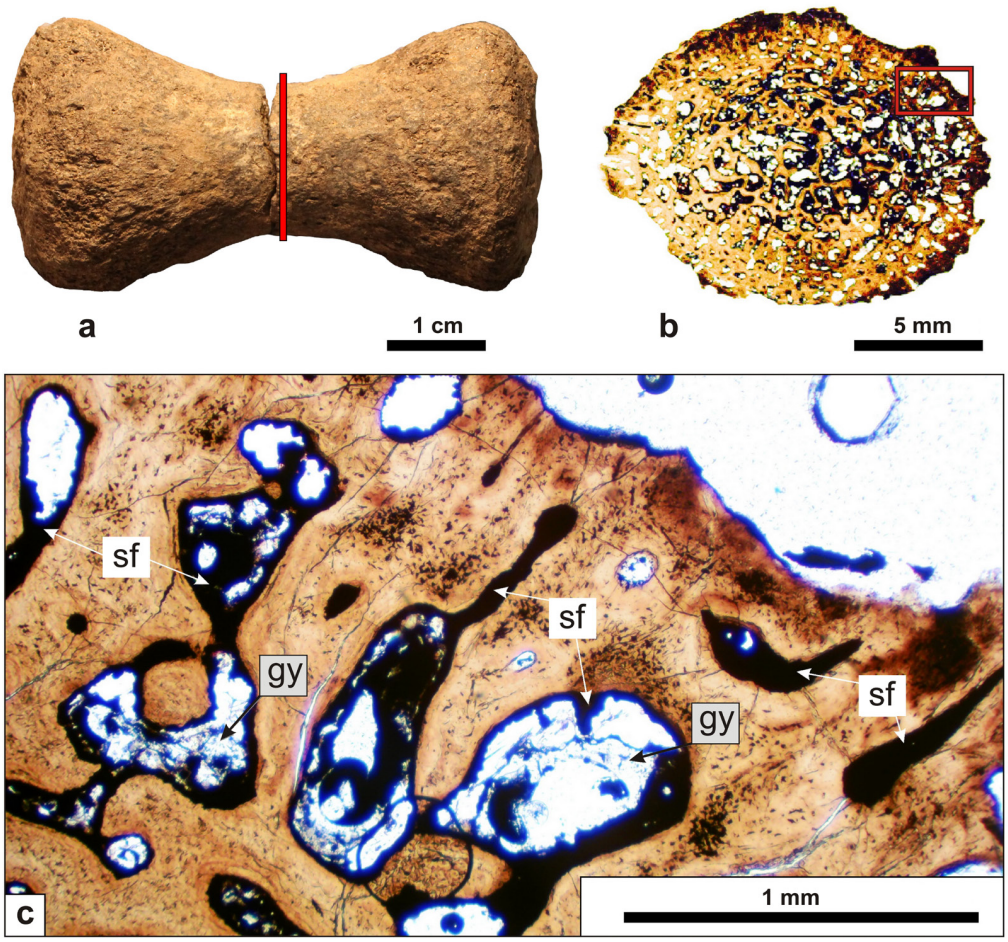


Рис. 5. Фаланга плезиозавра из костеносной линзы (слой 7): a — общий вид, красной линией обозначена плоскость шлифа; b — поперечный шлиф, прямоугольником обозначен фрагмент, показанный на рисунке 5, c; c — фрагмент шлифа в проходящем свете, sf — выделения сульфидов; gy — выделения гипса; видны многочисленные трещины и разрушенная внешняя поверхность кости

Fig. 5. Plesiosaur phalanx from the bone-bearing lens (bed #7): a — general view, red line marks the position of the thin-section; b — transverse thin-section, frame shows the fragment shown in figure c; c — fragment of the thin-section in the transmitted light, sf — sulfides, gy — gypsum; numerous cracks and decomposed outer surface can be observed

местонахождения подобного рода сосредоточены в Англо-Парижском бассейне и приурочены к свите «оксфордских глин» (Oxford Clay Formation), из среднекелловейской части которых известны многочисленные находки скелетов плезиозавров и ихтиозавров [24, 25, 28, 30, 31]. В то же время интервал с конца тоара и до начала среднего келловея (аален-батский интервал и низы келловея) охарактеризован остатками морских рептилий значительно беднее, а находки диагностичных образцов, первые из которых были описаны лишь в конце прошлого века, можно пересчитать по пальцам. Подобная ситуация затрудняет понимание эволюционной истории морских рептилий в течение большей части средней юры и осложняет анализ динамики их таксономического состава и разнообразия [27, 29, 34].

Новое местонахождение среднеюрских морских рептилий на р. Яренге частично заполняет этот пробел в знаниях. С учетом того, что на относительно небольшом участке выходов были обнаружены части скелетов как минимум пяти различных животных, данное местонахождение имеет большие перспективы. Надеемся, что дальнейшее более детальное изучение найденных скелетных остатков откроет нам новые подробности о морских рептилиях, обитавших в среднеюрских морях севера Европейской России.

Выводы

Вещественный состав костеносных отложений нового местонахождения среднеюрских морских позвоночных на р. Яренге характеризуется присутствием сидеритовых и гетит-гидрогетитовых стяжений, а также линз плоскогалечных аргиллитовых конгломератов. Полученные данные указывают на ранний—средний батский возраст вмещающих отложений и их морской генезис. Собранные остатки морских рептилий имеют большое значение для понимания их эволюции в среднеюрскую эпоху.

Авторы признательны сотрудникам Института геологии Коми НЦ УрО РАН Ю. С. Симаковой и Б. А. Макееву за проведение рентгеноструктурного анализа, А. Е. Шмырову — за изготовление шлифов, З. Г. Скок — за мацерацию палинологического материала, а также иллюстратору А. А. Атучину (Кемерово) — за воз-

можность использования его рисунков. Ценные советы и важные замечания при написании статьи были получены авторами от А. П. Ипполитова (ГИН РАН, Москва), А. И. Антошкиной (ИГ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар) и О. В. Шурековой («Геолразведка», Санкт-Петербург).

Работа выполнена в соответствии с планами научно-исследовательской работы ИГ Коми НЦ УрО РАН (темы № АААА-А17-117121140081-7, № АААА-А17-117121270034-3), ГИН РАН (тема № 0135-2018-0035) и при частичной поддержке РФФИ (проекты № 18-35-00221, № 19-05-00130), программ ПРАН №17 (№ 0135-2018-0050), ПРАН №19 (№ 0135-2018-0042) и проекта ФНИ № 0331-2019-0005.

Литература

1. Безносов П. А. Новая находка остатков юрского морского ящера на территории Республики Коми // Вестник Института геологии. 2000. № 11. С. 12.

2. Бодылевский В. И. Юрская система / Геология СССР. Архангельская, Вологодская области и Коми АССР. М.: Госгеолтехиздат, 1963. Т. 2. Ч. 1. С. 631—666.

3. Глинских Л. А., Никитенко Б. Л. Представители рода *Trochammina* (Foraminifera) из средней юры арктических и бореальных районов // Палеонтологический журнал. 2018. № 3. С. 3—9.

4. Горючие сланцы Европейского Севера СССР / Коми научный центр Уральского отделения Академии наук СССР. 1989. 152 с.

5. Горячева А. А. Палинологическая характеристика батских отложений на р. Ижма / Юрская система России: Проблемы стратиграфии и палеогеографии. Махачкала, 2015. С. 68—71.

6. Дедеев В. А., Молин В. А, Розанов В. В. Юрская песчаная толща Европейской России. Сыктывкар: Геопринт, 1997. 80 с.

7. Добруцкая Н. А. Спорово-пыльцевые комплексы юрских и нижнемеловых отложений северных районов Русской платформы и их значение для стратиграфии и палеофлористики // Палинология мезофита. М.: Наука, 1973. С. 106—112.

8. Дубейковский С. Г., Очев В. Г. Об остатках плезиозавров из юрских и меловых отложений бассейна верхнего течения р. Камы // Вопросы геологии Южного Урала и Поволжья. Саратов: Изд. Саратовского университета, 1967. Вып. 4. Ч. 1. С. 97—103.

9. Ивашов П. В. Континентальные юрские отложения северо-востока Русской платформы. М.: Наука, 1981. 176 с.

10. Лыюров С. В. Юрские отложения севера Русской плиты. Екатеринбург: УрО РАН, 1996. 139 с.

11. Мальков Б. А., Лысюк А. Ю., Иванова Т. И. Минеральный состав и микроэлементы окаменелых костей морских ящеров местонахождения Каргорт (Республика Коми) // Вестник Института геологии. 2004. № 1. С. 12—16.

12. Никитенко Б. Л. Стратиграфия, палеобиогеография и биофации юры Сибири по микрофауне (фораминиферы и остракоды). Новосибирск: Параллель, 2009. 680 с.

13. Попов Е. В., Безносов П. А. Остатки химер (Holocephali: Chimaeroidei) из верхнеюрских отложений Республики Коми // Современная палеонтология: классические и новейшие методы. Москва: ПИН, 2006. С. 55—64.

14. Рейнек Г.-Э., Сингх И. Б. Обстановки терригенного осадконакопления (с рассмотрением терригенных кластических осадков): Пер. с англ. М.: Недра, 1981. 439 с.

15. Репин Ю. С. Новые данные по стратиграфии юры Печорской синеклизы // Бюл. МОИП. Отдел геол. 2005. Т. 80. Вып. 3. С. 17—25.

16. Розанов В. И. Новые данные о стратиграфии юры севера Московской синеклизы // Юрские отложения Русской платформы: Сб. науч. тр. Л.: ВНИГРИ, 1986. С. 87—102.

17. Розанов В. И. О возрасте толщи белых кварцевых песков в бассейне р. Яренги // Советская геология. 1968. Вып. 5. С. 121—122.

18. Рябинин А. Н. Позвонки ихтиозавра из кимериджа Печорского края // Труды геологического музея Петра Великого. 1912. Т. 6. Вып. 2. С. 42—47.

19. Седых К.Ф. По Южному Тиману. Сыктывкар, 1963. 80 с.

20. Теодорович В.И. Обоснование возраста среднеюрско-нижнекеловейской толщи Притиманья // Бюлл. МОИП. Отдел геол. 1980. Т.55. Вып.6. С.74—83.

21. Теодорович В. И. Состав, строение разреза и происхождение среднеюрско-нижнекелловейской толщи Притиманья // Бюлл. МОИП. Отдел геол. 1979. Т.54. Вып. 6. С.77—91.

22. Унифицированная региональная стратиграфическая схема юрских отложений Восточно-Европейской платформы: Объяснительная записка. М.: ПИН РАН — ФГУП «ВНИГНИ», 2012. 64 с. + 14 л.

23. Чирва С. А. Куликова Н. К. Сопоставление среднеюрских-келловейских песчаных отложений бассейнов рек Сысолы, Яренги и Печоры // Юрские отложения Русской платформы. Сб. науч. тр. Л.: ВНИГРИ, 1986. С. 102—109.

24. Andrews C. W. A descriptive catalogue of the marine reptiles of the Oxford Clay. Part I. British Museum (Natural History). London, 1910. 205 pp.

25. Andrews C. W. A descriptive catalogue of the marine reptiles of the Oxford Clay. Part II. British Museum (Natural History). London, 1913. 202 pp.

26. Bardet N. Extinction events among Mesozoic marine reptiles // Historical Biology. 1994. V. 7. P. 313—324.

27. Benson R. B. J., Butler R. J., Lindgren J., Smith A. S. Mesozoic marine tetrapod diversity:mass extinctions and temporal heterogeneity in geological megabiases affecting vertebrates // Proceedings of the Royal Society B. 2010. V. 277. P. 829—834.

28. Brown D. S. The English Upper Jurassic Plesiosauroidea (Reptilia) and a review of the phylogeny and classification of the Plesiosauria // Bulletin of the British Museum of Natural History (Geology). 1981. V. 35. № 4. P. 253—347.

29. Cleary T. J., Moon B. C., Dunhill A. M., Benton M. J. The fossil record of ichthyosaurs, completeness metrics and sampling biases // Palaeontology. 2015. V. 58. P. 521—536.

30. Ketchum H. F., Benson R. B. J. A new pliosaurid (Sauropterygia, Plesiosauria) from the Oxford Clay Formation (Middle Jurassic, Callovian) of England: evidence for a gracile, longirostrine grade of Early–Middle Jurassic pliosaurids / In: Barrett P. M. and Milner A. R. (eds.) Studies on Fossil Tetrapods. Special Papers in Palaeontology. 2011. V. 86. P. 109—129.

31. Martill D. M. The preservation of marine vertebrates in the Lower Oxford Clay (Jurassic) of central England // Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B. 1985. V. 311. P. 155—165.

32. Mitta V., Glinskikh L., Kostyleva V., Dzyuba O., Shurygin B., Nikitenko B. Biostratigraphy and sedimentary settings of the Bajocian-Bathonian beds of the Izhma River basin (European North of Russia) // Neues Jahrbuch fur Geologie und Paldontologie. Abhandlungen. 2015. V. 277. № 3. P. 307—335.

33. Riding J. B., Fedorova V. A., Ilyina V. I. Jurassic and lowermost Cretaceous dinoflagellate cyst biostratigraphy of the

Russian Platform and northern Siberia, Russia // American Association of Stratigraphic Palynologists Contributions Series. 1999. №. 36. 179 p.

34. Tutin S. L. and Butler R. J. The completeness of the fossil record of plesiosaurs, marine reptiles from the Mesozoic // Acta Palaeontologica Polonica. 2017. V. 62. № 3. P. 563—573.

35. Zverkov N. G., Arkhangelsky M. S., Pardo Perez J. M., Beznosov P. A. On the Upper Jurassic ichthyosaur remains from the Russian North // Proceedings of the Zoological Institute RAS. 2015. V. 319. P. 81—97.

References

1. Beznosov P. A. *Novaya nahodka ostatkov yurskogo morskogo yaschera na territorii Respubliki Komi* (New find of the remains of Jurassic marine reptile in the Komi Republic). Vestnik of Institute of geology, 2000, No. 11, pp. 12.

2. Bodylevskii V. I. *Yurskaya sistema. Geologiya SSSR. Arhangel'skaya, Vologodskaya oblasti i Komi ASSR* (Jurassic System. Geology of the USSR. Arkhangelsk and Vologda regions and Komi ASSR). Moscow: Gosgeoltehizdat, 1963, V. 2, Ch. 1, pp. 631—666.

3. Glinskih L. A., Nikitenko B. L. *Representatives of the Genus Trochammina (Foraminifera) from the Middle Jurassic of the Arctic and Boreal Regions*, Paleontological Zhurnal, 2018, No. 3, pp. 221—230.

4. Goryuchie slantsy evropeiskogo Severa SSSR (Oil shales of the European North of the USSR). Komi SC UB RAS, 1989, 152 pp.

5. Goryacheva A. A. *Palinologicheskaya harakteristika batskih otlozhenii na r. Izhma. Yurskaya sistema Rossii: Problemy stratigrafii i paleogeografii* (Palynological characteristics of the Bathonian section of Izhma River. In: Jurassic System of Russia: Problems of Stratigraphy and Paleogeography). Makhachkala, 2015, pp. 68—71.

6. Dedeev V. A., Molin V. A, Rozanov V. V. *Yurskaya peschanaya tolscha evropeiskoi Rossii* (Jurassic sandy formation of European Russia). Syktyvkar: Geoprint, 1997, 80 p.

7. Dobrutskaya N. A. *Sporovo-pyltsevye kompleksy yurskih i nizhnemelovyh otlozheniy severnyh rayonov Russkoy platformy i ih znachenie dlya stratigrafii i paleofloristiki* (Spore-pollen assemblages of the Jurassic and Lower Cretaceous deposits of the northern regions of Russian Platform and their significance for stratigraphy and paleofloristics). Palinologiya mezofita. Moscow: Nauka, 1973, pp.106—112.

8. Dubeikovskii S. G., Ochev V. G. *Ob ostatkah pleziozavrov iz yurskih i melovyh otlozheniy basseina verhnego techeniya r. Kamy. Voprosy geologii Yuzhnogo Urala i Povolzh'ya* (On the remnants of plesiosaurs from the Jurassic and Cretaceous deposits of the basin of the upper stream of Kama River. In: Geological issues of the South Urals and Volga region), 4, Ch. 1, Saratov: Saratov University, 1967, pp. 97—103.

9. Ivashov P. V. *Kontinentalnye yurskie otlozheniya severovostoka Russkoy platformy* (Continental Jurassic deposits of the northeast of Russian platform). Moscow: Nauka, 1981, 176 p.

10. Lyyurov S. V. *Yurskie otlozheniya severa Russkoy plity* (Jurassic deposits of the north of Russian plate.). Ekaterinburg: UB RAS, 1996, 139 p.

11. Mal'kov B. A., Lysyuk A. Yu., Ivanova T. I. *Mineralnyy sostav i mikroelementy okamenelyh kostey morskih yascherov mestonahozhdeniya Kargort (Respublika Komi)* (Mineral composition and trace elements of the fossilized bones of marine reptiles of Kargort Locality (Komi Republic)). Vestnik of Institute of geology, 2004, No. 1, pp. 12—16.

12. Nikitenko B. L. *Stratigrafiya, paleobiogeografiya I biofatsii yury Sibiri po mikrofaune* (Stratigraphy, paleobiogeography and biofacies of the Jurassic of Siberia based on microfauna data (foraminifera and ostracods). Novosibirsk: Parallel, 2009, 680 p.

13. Popov E. V., Beznosov P. A. *Remains of chimaeroid fishes (Holocephali: Chimaeroidei) from the Upper Jurassic deposits of Komi Republic, Russia*. In: Modern paleontology: classical and newest methods. Moscow, 2006, pp. 55—64.

14. Reineck H.-E., Singh I. B. *Depositional Sedimentary Environments with reference to Terrigenous clastics*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1975, 440 p.

15. Repin Yu. S. *Novye dannye po stratigrafii yury Pechorskoy sineklizy* (New data on the Jurassic stratigraphy of Pechora Syneclise). Bulletin of Moscow Society of Naturalists, Geological series, 2005, V.80, 3, pp.17—25.

16. Rozanov V. I. *Novye dannye o stratigrafii yury severa Moskovskoi sineklizy. Yurskie otlozheniya Russkoi platformy* (New data on the Jurassic stratigraphy of the northern part of Moscow Syneclise. In: Jurassic deposits of the Russian platform.). Leningrad: VNIGRI, 1986, pp.87—102.

17. Rozanov V. I. *O vozraste tolschi belyh kvartsevyh peskov v basseyne r. Yarengi* (On the age of white quartz sands in the Yarenga River basin). Sovetskaya geologiya, 1968, 5, pp.121—122.

18. Riabinin A. N. *Pozvonki ihtiozavra iz kimeridzha Pechorskogo kraya* (Ichthyosaur vertebrae from the Kimmeridgian of Pechora area). *Trudy geologicheskogo muzeya Petra Velikogo* (Proceedings of the Peter the Great Geological Museum), 1912, V. 6, 2, pp. 42—47.

19. Sedyh K. F. *Po Yuzhnomu Timanu* (Traveling the South Timan). Syktyvkar, 1963, 80 p.

20. Teodorovich V. I. *Obosnovanie vozrasta sredneyursko-nizhnekelloveiskoy tolschi Pritiman'ya* (Age confirmation of the Middle Jurassic — Lower Callovian deposits of Pre-Timan area). Byull. MOIP. geol., 1980, V.55, 6, pp.74—83.

21. Teodorovich V. I. *Sostav, stroenie razreza i proishozhdenie sredneyursko-nizhnekelloveiskoi tolschi Pritimanya* (Composition, structure of the section and the origin of the Middle Jurassic-Lower Callovian Timan rocks).). Bulletin of Moscow Society of Naturalists, Geological series, 1979, V.54, 6, pp.77—91.

22. Unifitsirovannaya regionalnaya stratigraficheskaya skhema yurskih otlozheniy Vostochno-Evropeiskoy platformy. Obyasnitelnaya zapiska. (Unified regional stratigraphic chart of the Jurassic of East European Platform. Explanatory notes). Moscow: PIN RAN — VNIGNI, 2012, 64 p. + 14 s.

23. Chirva S. A., Kulikova N. K. *Sopostavlenie sredneyurskih-kelloveiskih peschanyh otlozhenii basseynov rek Sysoly, Yarengi i Pechory* (Correlations of the Middle Jurassic — Callovian sections of the sandy deposits in the Sysola, Yarenga and Pechora river basins). *Yurskie otlozheniya Russkoy platformy* (Jurassic deposits of the Russian Platform). Leningrad: VNIGRI, 1986, pp. 102—109.

24. Andrews C. W. A descriptive catalogue of the marine reptiles of the Oxford Clay. Part I. British Museum (Natural History), London, 1910, 205 pp.

25. Andrews C. W. A descriptive catalogue of the marine reptiles of the Oxford Clay. Part II. British Museum (Natural History), London, 1913, 202 pp.

26. Bardet N. Extinction events among Mesozoic marine reptiles. Historical Biology, 1994, 7, pp. 313—324.

27. Benson R. B. J., Butler R. J., Lindgren J. & Smith A. S. Mesozoic marine tetrapod diversity:mass extinctions and temporal heterogeneity in geological megabiases affecting vertebrates. Proceedings of the Royal Society B. 2010, 277, pp. 829—834.

28. Brown D. S. The English Upper Jurassic Plesiosauroidea (Reptilia) and a review of the phylogeny and classification of the

Plesiosauria. Bulletin of the British Museum of Natural History (Geology), 1981, 35(4), pp. 253—347.

29. Cleary T. J., Moon B. C., Dunhill A. M., Benton M. J. The fossil record of ichthyosaurs, completeness metrics and sampling biases. Palaeontology, 2015, 58: 521—536.

30. Ketchum H. F. and Benson R. B. J. A new pliosaurid (Sauropterygia, Plesiosauria) from the Oxford Clay Formation (Middle Jurassic, Callovian) of England: evidence for a gracile, longirostrine grade of Early–Middle Jurassic pliosaurids. In: Barrett P.M. and Milner A.R. (eds.) Studies on Fossil Tetrapods. Speicial Papers in Palaeontology, 86, 2011, pp. 109—129.

31. Martill D. M. The preservation of marine vertebrates in the Lower Oxford Clay (Jurassic) of central England. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B, 1985, 311, pp. 155—165.

32. Mitta V., Glinskikh L., Kostyleva V., Dzyuba O., Shurygin B., Nikitenko B. Biostratigraphy and sedimentary settings of the Bajocian-Bathonian beds of the Izhma River basin (European North of Russia). Neues Jahrbuch fur Geologie und Palaontologie. Abhandlungen, 2015, V. 277, No. 3, pp. 307—335.

33. Riding J. B., Fedorova V. A., Ilyina V. I. Jurassic and lowermost Cretaceous dinoflagellate cyst biostratigraphy of the Russian Platform and northern Siberia, Russia. American Association of Stratigraphic Palynologists Contributions Series, 1999, No. 36, 179 p.

34. Tutin S. L. and Butler R. J. The completeness of the fossil record of plesiosaurs, marine reptiles from the Mesozoic. Acta Palaeontologica Polonica, 2017, 62(3), pp. 563—573.

35. Zverkov N. G., Arkhangelsky M. S., Pardo Perez J. M. & Beznosov P. A. On the Upper Jurassic ichthyosaur remains from the Russian North. Proceedings of the Zoological Institute RAS, 2015, 319, pp. 81—97.

Арктический вектор геологических исследований
Arctic vector of geological research

УДК 550.83:552.016 DOI: 10.19110/2221-1381-2019-2-14-21

СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МАРУНКЕУСКОГО ЭКЛОГИТ-ГНЕЙСОВОГО КОМПЛЕКСА ПОЛЯРНОГО УРАЛА ПО ГРАВИМАГНИТНЫМ ДАННЫМ

Т. А. Пономарева, А. М. Пыстин
Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар
taponomareva@inbox.ru, pystin@geo.komisc.ru

Проанализированы физические свойства полиметаморфических образований марункеуского эклогит-гнейсового комплекса Полярного Урала. Выявлены закономерности распределения плотности и магнитной восприимчивости пород. Дана оценка степени влияния на физические свойства метаморфических пород их первичного минералогического состава и последующих минеральных преобразований при полиметаморфизме. Выполнена качественная интерпретация материалов магнитной и гравитационной съемок. Показано, что широкий спектр магнитных свойств пород марункеуского комплекса не обнаруживает отражения в магнитном поле, что связано с нивелирующей ролью полиметаморфизма. Установлено, что более стабильной петрофизической характеристикой, меньше зависящей от метаморфических преобразований пород, является их плотность. Она в основном определяется составом протолитов. Поэтому гравиметрические данные являются определяющими для установления структуры и особенностей глубинного строения марункеуского комплекса. На основе интерпретации гравиметрических материалов показано, что толщи, обогащенные высокоплотностными породами (метаперидотиты, эклогиты и апоэклогитовые амфиболиты), погружаются на север и относятся к нижней части разреза марункеуского комплекса.

Подтверждено представление о субширотном структурном плане марункеуского комплекса. Это является дополнительным аргументом в пользу отнесения рассматриваемого объекта к раннедокембрийским образованиям и его трактовки как тектонически перемещенного фрагмента нижнедокембрийского кристаллического основания, вовлеченного в структуру уралид.

Ключевые слова: Полярный Урал, марункеуский эклогит-гнейсовый комплекс, глубинное строение, петрофизическая характеристика, удельная магнитная восприимчивость, плотностные неоднородности.

STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF MARUNKEU ECLOGITE-GNEISS COMPLEX IN THE POLAR URALS INFERRED FROM GRAVI-MAGNETIC DATA

T. A. Ponomareva, A. M. Pystin
Institute of Geology Komi SC UB RAS, Syktyvkar

The physical properties of the polymetamorphic formations of the Marunkeu eclogite-gneiss complex in the Polar Urals were analyzed. The patterns of density distribution and magnetic susceptibility of rocks were revealed. We assessed how primary mineralogical composition of metamorphic rocks and subsequent mineral transformations during polymetamorphism influenced the physical properties of rocks. A qualitative interpretation of materials of magnetic and gravitational surveys was performed. We showed that a wide range of magnetic properties of rocks of the Marunkeu complex were not reflected in a magnetic field, which was associated with the leveling role of polymetamorphism. It was established that a more stable petrophysical characteristic, less dependent on metamorphic transformations of rocks, was their density. It was mainly determined by the composition of the protoliths. Therefore, gravimetric data were crucial for establishing the geology and characteristics of the deep structure of the Marunkeu complex. Based on the interpretation of gravimetric materials, we showed that the formations enriched with high-density rocks (metaperidotites, eclogites and apoeclogitic amphibolites) sank to the north and belong to the lower formation of the Marunkeu complex. It supported an idea of the sublatitudinal structural plan of the Marunkeu complex. This was an additional argument in favor of referring the object under consideration as to early Precambrian formations and interpreting it as a tectonically displaced fragment of the Lower Precambrian crystalline base involved in the structure of rocks of Uralian orogeny.

Keywords: Polar Urals, Marunkeu eclogite-gneiss complex, deep structure, petrophysical characteristic, specific magnetic susceptibility, density inhomogeneities.

Введение

Марункеуский эклогит-гнейсовый комплекс расположен в крайней северной (полярной) части Уральской складчатой области в пределах Харбейско-Марункеуского блок-антиклинория (рис. 1). Он расположен к западу от Сыумкеуского гипербазитового массива, входящего в состав палеозойской офиолитовой ассоциации. На юге комплекс по Лонгот-Юганскому разлому глубокого заложения граничит с нижнепротерозойскими образованиями харбейского полиметаморфического комплекса, на западе и северо-западе — с вулканогенно-осадочными отложениями верхнего докембрия. На востоке между марункеуским комплексом и Сыумкеуским массивом выделяется узкая (в несколько сотен метров) полоска относительно слабометаморфизованных пород, которая условно сопоставляется с верхнедокембрийскими вулканогенно-осадочными отложениями западного и северо-западного обрамления марункеуского комплекса.

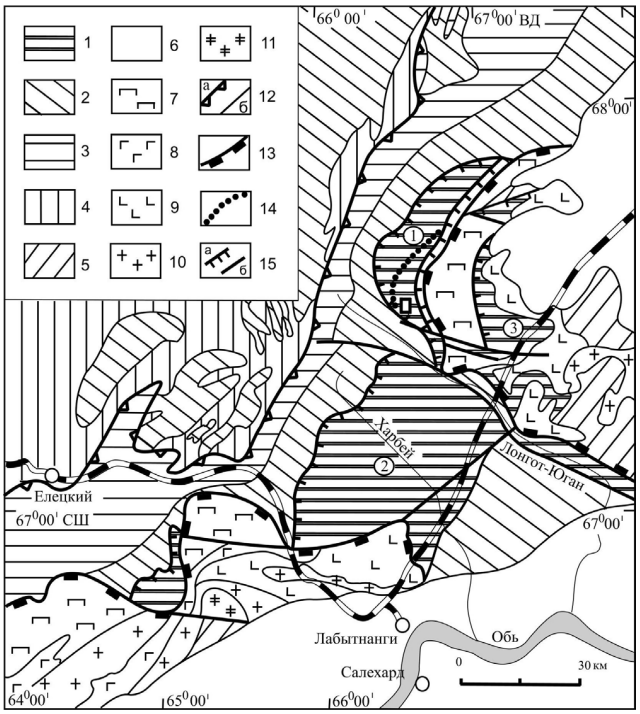


Рис. 1. Геологическая карта Собского поперечного поднятия (Полярный Урал) (по [4] с дополнениями):

1 — архейско-нижнепротерозойские комплексы; 2 — верхнедокембрийские комплексы; 3 — вулканогенно-осадочные комплексы ($Є_3$-P_1) Лемвинской структурно-фациальной зоны; 4 — терригенно-карбонатные комплексы ($Є_3$-C) Елецкой структурно-фациальной зоны; 5 — осадочно-вулканогенные комплексы (O_3-S_1) Щучьинской структурно-фациальной зоны; 6 — плитный комплекс (Mz); 7 — райизско-войкарский дунит-гацбургитовый комплекс (O_1—$_2$?); 8 — кершорский габброидный комплекс (O_3-S_1); 9 — хоймпэйский габбро-плагиогранитный комплекс (S_2); 10 — собский диорит-плагиогранитный комплекс (S_2-D_1); 11 — конгорский габбро-диоритовый комплекс (D_3-C_1); 12 — геологические границы: а — надвиговая граница Лемвинской и Елецкой структурно-фациальных зон, б — границы комплексов, свит; 13 — Главный Уральский глубинный разлом (надвиг); 14 — граница между двумя блоками марункеуского комплекса: юго-восточным «эклогитовым» и северо-западным «амфиболитовым» по [5]; 15 — другие разломы: а — надвиги и взбросы, б — крутопадающие разломы.

Прямоугольником выделен район Слюдяной горки. Цифрами в кружках обозначены полиметаморфические комплексы: 1 — марункеуский эклогит-гнейсовый, 2 — харбейский гнейсомигматитовый, 3 — малыкский гранулит-метабазитовый

Fig. 1. Geological map of Sob' transverse uplift (Polar Urals) (according to [4] with changes):

1 — Archean-Lower Proterozoic complexes; 2 — Upper Precambrian complexes; 3 — volcanic-sedimentary complexes ($Є_3$—P_1) Lemva structural-facies zone; 4 — terrigenous-carbonate complexes ($Є_3$ — C) Elets structure-facies zone; 5 — sedimentary-volcanogenic complexes (O_3-S_1) Schuch'ya structural-facies zone; 6 — plate complex (Mz); 7 — Rayiz-Voykar dunite-harzburgite complex (O_1—$_2$?); 8 — Kershor gabbroid complex (O_3-S_1); 9 — Khoympey gabbro-plagiogranite complex (S_2); 10 — Sob' diorite-plagiogranite complex (S_2-D_1); 11 — Kongor gabbro-diorite complex (D_3-C_1); 12 — geological boundaries: a — thrust border between Lemva and Elets structural-facies zones, b — borders between complexes, suites; 13 — the Main Uralian deep fault (thrust); 14 — boundary between two blocks of the Marunkeu complex: southeastern «eclogite» and northwestern «amphibolite» according to [5]; 15 — other faults: a — thrusts and reverse faults, b — steeply dipping faults.

Rectangle highlights the area of Slyudyanaya Gorka. Numbers in circles are polimetamorphic complexes: 1 — Marunkeu eclogite-gneiss, 2 — Harbei gneiss-migmatitic, 3 — Malyk granulite-metabasitic

В схеме последнего Уральского межведомственного стратиграфического совещания [14] комплекс пород, который мы выделяем под названием «марункеуский», обозначен в ранге свиты в составе нижнепротерозойского харбейского метаморфического комплекса. В соответствии с упомянутой схемой марункеуская свита занимает нижнее положение в разрезе комплекса и наращивается (снизу вверх): лаптаюганской (амфиболиты и гнейсы), ханмейхойской (амфиболиты, гнейсы, мраморы, кварциты) и париквасьшорской (гнейсы, кристаллические сланцы и кварциты) свитами. Однако работами Э. Н. Сычевой и др. [15], В. И. Ленных [6], А. М. Пыстина [10] и других исследователей было показано, что породы разрозненных в пространстве метаморфических толщ, в составе которых существенную роль играют метабазиты лаптаюганской и ханмейхойской свит в Харбейском блоке, с одной стороны, и марункеуской свиты в Марункеуском блоке — с другой, сформировались в разных геодинамических обстановках, палеоконтинентальных и палеоокеанических соответственно. Поэтому харбейский и марункеуский комплексы должны принадлежать разным тектоническим структурам. Подтверждением этой точки зрения являются данные Н. С. Уляшевой [3, 17], которая на основе анализа петрогеохимических особенностей метабазитов ханмейхойской свиты пришла к выводу, что их протолитами послужили базальты, сформировавшиеся в платформенных и окраинно-морских условиях, а в целом харбейский комплекс представляет собой фрагмент краевой части древней континентальной области. Петрохимическое подтверждение получил также тезис о палеоокеанической (островодужной) природе протолитов метаморфических пород марункеуского комплекса [18].

При проведении геологической съемки масштаба 1:200000 [4] в состав марункеуского комплекса (свиты, согласно авторам съемки) были включены только те толщи метаморфитов, в которых установлены находки эклогитов. Они занимают восточную и южную части Марункеуского блока (рис. 1). Залегающие в его северо-западной части амфиболиты, плагиогнейсы, гнейсы и мигматиты по ним были отнесены к ханмейхойской свите. По нашему мнению, это неверно. Отсутствие эклогитов в северо-западной части Марункеуского блока связано с более интенсивным проявлением здесь процессов диафтореза (почти полным преобразованием эклогитов в амфиболиты), на что ранее указывал В. И. Ленных [6], выделяя в составе комплекса два блока: юго-восточный «эклогитовый» и северо-западный «амфиболитовый». Поэтому в нашем понимании марункеуский комплекс — это вся полоса полиметаморфических образований Марункеуского блока, прослеживающаяся к северо-северо-востоку от бассейна р. Логот-Юган до р. Бол. Щучья на расстоянии около 60 км при ширине 10—17 км.

Особенности геологического строения

В строении марункеуского комплекса участвуют эклогиты, симплектит-эклогиты и апоэклогитовые амфиболиты в ассоциации с метаультрабазитами, а также плагиогнейсы и гнейсы, слюдистые кристаллические сланцы, плагиомигматиты и K-Na-мигматиты.

Наиболее хорошо комплекс обнажен в южной части хребта Марун-Кеу по руч. Марун-Шор, Няро-Шор, Няагар-Нео-Шор, а также на возвышенности Слюдяная горка. Схема геологического строения марункеуского комплекса в районе Слюдяной горки приведена на рис. 2. На рисунке видно, что эклогиты и апоэклогитовые амфиболиты залегают в виде пластообразных и линзовидных интрузий, ориентированных согласно с простиранием вмещающих их плагиогнейсов. Небольшие высотки на относительно пологой Слюдяной горке сложены метаперидотитами (выс. Перидотитовая и выс. Рыжая) и апогаббровыми массивными эклогитами (выс. Коническая и небольшие высотки за северной границей схемы на рис. 2). Судя по тому, что апогаббровые эклогиты слагают конусообразные, изометричные в плане высотки, они, скорее всего, представлены небольшими интрузиями. Габбро имеют гипидиоморфно-зернистую, келифитовую структуру. В апогаббровых эклогитах отмечаются реликты магматических структур, а также реликты исходных габброидов.

Преобладающие среди эклогитов полосчатые (гнейсовидные или сланцеватые) разности слагают пониженные участки Слюдяной горки, ее склоны и долины протекающих под горкой ручьев. Наряду с омфацитом и гранатом они содержат в своем составе кианит, роговую обманку, цоизит, слюды. Эти породы часто амфиболизированы и обнаруживают взаимопереходы с амфиболитами.

Судя по химическому составу, протолитами полосчатых эклогитов и амфиболитов послужили умеренно- и высокоглиноземистые натриевые и калиево-натриевые базальты, андезитобазальты и андезиты нормальной щелочности. Плагиогнейсы и гнейсы образовались за счет средних и кислых магматических пород: известково-щелочных калиево-натриевых гранитов, гранодиоритов и диоритов нормального ряда. Химический состав пород, их геохимические особенности и соотношение в разрезах позволяет предполагать, что они сформировались на месте островодужных образований. Метаморфизованные плутонические породы мафит-ультрамафитового состава, представленные апогаббровыми эклогитами и метаперидотитами, представляют собой самостоятельный метаинтрузивный комплекс. Геохимические данные указывают на формирование этих пород в надсубдукционной обстановке, возможно с контаминацией континентального вещества, на что указывают повышенные содержания Ba, Sr и Rb [18].

Изучение метаморфизма показало, что эклогиты являются продуктами наиболее ранних эндогенных процессов преобразования пород марункеуского комплекса [9]. На высокобарические метаморфические парагенезисы накладываются более низкобарные и низкотемпературные минеральные ассоциации, и в целом смена парагенезисов в метабазитах (во времени) выглядит следующим образом: омфацит + гранат (метаморфизм эклогитовой фации) → омфацит + гранат + плагиоклаз + фенгит (высокобарическая метаморфическая дифференциация в связи с процессами плагиогранитизации и кислотного выщелачивания) → роговая обманка + гранат + плагиоклаз (диафторез амфиболитовой фации) → актинолит + хлорит + альбит (диафторез зеленосланцевой фации).

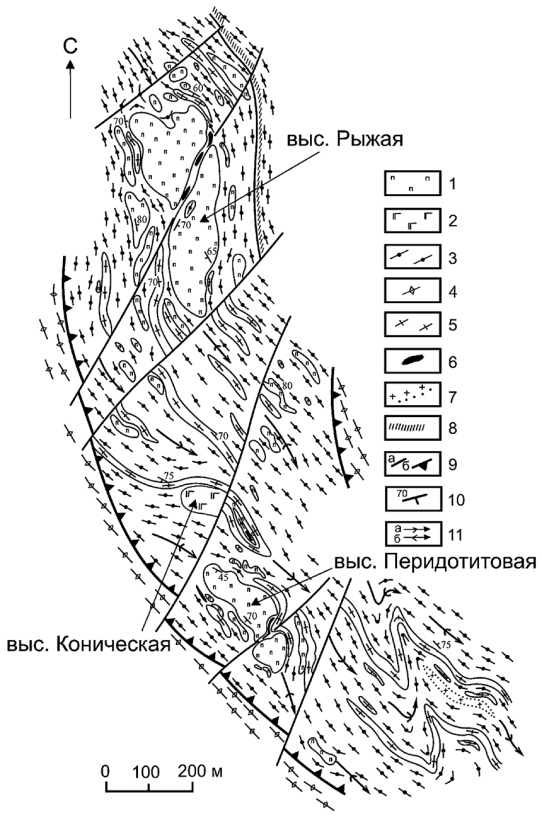


Рис. 2. Геологическое строение района Слюдяной горки. Южная часть марункеуского комплекса (по [12]):

1 — метаультрабазиты; 2 — габбро, эклогитизированные габбро; 3 — эклогиты; 4 — амфиболизированные эклогиты, апоэклогитовые амфиболиты; 5 — гранат-слюдяные гнейсы и кристаллические сланцы; 6 — кварцевые и кварц-полевошпатовые жилы; 7 — гранитизированные породы; 8 — интенсивно кианитизированные породы; 9 — разрывные нарушения: а — крутопадающие разломы, б — надвиги; 10 — элементы залегания контактов пород, полосчатости и сланцеватости; 11 — оси: а — антиклиналей, b — синклиналей

Fig. 2. Geological structure of the Slyudyanaya Gorka area. The southern part of the Marunkeu complex (according to [12])

1 — metaultramafic rocks; 2 — gabbro, eclogitizied gabbro; 3 — eclogites; 4 — amphibolitised eclogites, apoeclogitic amphibolites; 5 — garnet-mica gneisses and crystalline schists; 6 — quartz and quartz-feldspar veins; 7 — granitizied rocks; 8 — intense kianitizied rocks; 9 — faults: a — steeply dipping faults, b — thrusts; 10 — orientation of rocks, slaty and schistose; 11 — axes: a — anticline, b — syncline

При проведении структурных исследований установлено [12], что эклогиты участвуют в самых ранних этапах складчатости и подвержены всем последующим деформациям. Ранние складки представлены умеренно и сильно сжатыми формами. Шарниры этих складок полого погружаются на юго-восток, преимущественно по азимуту 120°. Складки второй генерации характеризуются асимметричным строением и крутопадающими шарнирами. Осевые поверхности этих складок простираются по азимуту 320—340°. Третий этап складчатости проявляется в ундуляции шарниров складок более ранних генераций и образовании сланцеватости и полосчатости северо-восточной ориентировки. То есть только поздние структурные элементы в породах этой части марункеуского

комплекса конкордантны с уральскими структурами, а более ранние резко дискордантны с ними и в целом хорошо соотносятся с северо-западным структурным планом доуралид в северной части Уральской складчатой области.

Поскольку структуры ранних генераций (северо-западной ориентировки) хорошо сохранились только на ограниченной территории хр. Марун-Кеу, примыкающей к Слюдяной горке, а их реконструкция на остальной площади распространения метаморфических образований при геолого-съемочных работах не проводилась, вопрос о корреляции и стратиграфической последовательности отдельных разрезов марункеуского комплекса остается открытым. Условно к низам разреза относятся существенно метабазитовые толщи с эклогитами и метаультрабазитами, которые распространены в юго-восточной части комплекса. А к верхней части разреза принадлежат толщи переслаивающихся амфиболитов и плагиогнейсов, которыми сложены западные и северо-западные части комплекса.

Степень геохронологического обоснования времени проявления эклогитового метаморфизма (судя по приведенным выше данным — наиболее раннего метаморфического события в марункеуском комплексе) остается невысокой. Среди имеющихся датировок преобладают значения в интервале 352—366 млн лет [19, 20], которые, скорее всего, указывают на время одного из поздних этапов метаморфического преобразования эклогитов [2], связанного, например, с их эксгумацией [12]. Максимальные значения возраста пород, определенные путем K-Ar- и Pb-Pb-датирования минералов из эклогитов, составляют 1.70; 1. 56; 1.54 млрд лет [16]. Сопоставимые цифры (1.68 ± 0.07, 1.61 ± 0.07, 1.54 ± 0.15, 1.54 ± 0.14 млрд лет) получены на основе Rb-Sr- и Sm-Nd-изохронных систем по породе в целом и по метаморфогенным породообразующим минералам из эклогитов [2]. Кроме того, для циркона из этих же пород получен конкордантный U-Pb-возраст, равный 1.86 млрд лет [1]. Эти данные дают основание считать, что высокобарический метаморфизм в породах марункеуского комплекса проявился в раннедокембрийское время, более чем 1.86 млрд лет назад. Приведенная датировка является верхним ограничением времени формирования протолитов полиметаморфических образований марункеуского комплекса. Вопрос о нижней возрастной границе образования протолитов пока остается открытым. Можно лишь предположительно ограничить его ранним протерозоем и таким образом признать наиболее обоснованной точку зрения о принадлежности рассматриваемого комплекса к нижнепротерозойским образованиям [14].

Методика исследований

Для установления особенностей глубинного строения марункеуского комплекса использован системный подход, который состоял из ряда последовательных, ранее отработанных приемов. На первом этапе выполнялись петрофизические исследования, в результате которых были получены данные о физических параметрах пород и выявлены корреляционные связи между физическими свойствами. Это позволило оценить степень влияния на физические свойства метаморфических пород, которыми сложен марункеуский комплекс, их первичного минералогического состава и последующих минеральных преобразований при полиметаморфизме.

Для анализа магнитного поля использовался метод аналогии при широком использовании петрофизических и геологических данных. Наше внимание прежде всего было направлено на изучение влияния магнитных свойств пород, на интенсивность магнитного поля геологических объектов, расположенных в верхнем слое земной коры (первые километры).

С помощью качественной интерпретации гравитационного поля решались следующие задачи:

— построение карт локальных аномалий, полученных в результате трансформации гравитационного поля, отражающих распределение аномалеобразующих источников на различной глубине в земной коре. В основу расчета трансформированных карт положен метод геологической редукции [7], т. е. послойного исключения аномальных составляющих из наблюденного гравитационного поля масштаба 1:1000000 [13].

— установление связи локальных аномалий гравитационного поля с особенностями строения марункеуского комплекса. При этом учитывались интенсивность аномалий, форма, размеры, линейная направленность и глубинное размещение их в земной коре.

Результаты и обсуждение

При анализе физических параметров пород марункеуского комплекса основное внимание уделялось плотности (σ) и удельной магнитной восприимчивости (χ). При этом наряду с вновь полученными данными использовалась выборка из многочисленных геолого-геофизических рукописных отчетов и опубликованных материалов, приведенных в нашей более ранней публикации [8].

По петрофизическим характеристикам марункеуский комплекс относится к сильно дифференцированному типу разреза [8], что хорошо коррелируется с его геологическим строением. Нижняя часть марункеуского комплекса характеризуется преимущественным распространением в ее составе эклогитов и в значительно меньшей степени амфиболитов, плагиогнейсов и мигматитов. Характерной особенностью этой части разреза является присутствие метаультрабазитов. Верхняя часть разреза представлена переслаивающимися пачками амфиболитов и плагиогнейсов, иногда с преобладанием плагиогнейсов. Эклогитовые парагенезисы в метабазитах встречаются только в реликтах, метаультрабазиты отсутствуют. Породы часто мигматизированы.

Плотностные характеристики пород комплекса следующие: метаперидотиты имеют $\sigma_{ср.} = 3.18 \times 10^3$ кг/м^3, габбро — $\sigma_{ср.} = 3.07 \times 10^3$ кг/м^3, эклогиты — $\sigma_{ср.} = 3.14 \times 10^3$ кг/м^3, амфиболиты — $\sigma_{ср.} = 3.03 \times 10^3$ кг/м^3, плагиогнейсы — $\sigma_{ср.} = 2.68 \times 10^3$ кг/м^3, мигматизированные породы и мигматиты — $\sigma_{ср.} = 2.85 \times 10^3$ кг/м^3[1].

[1] Средние плотности по метаперидотитам и габбро приводятся по материалам Комигеолфонда (отчет отв. исполнителя Е. Ю. Уколовой, 1991 г.)

Таким образом, средняя плотность пород марункеуского комплекса, учитывая, что в его составе преобладают метабазиты (эклогиты, симплектит-эклогиты и амфиболиты), превышает 3.00×10^3 кг/м^3. В то же время этот показатель резко понижается до $(2.85—2.68) \times 10^3$ кг/м^3 в тех участках, где породы подвержены процессам мигматизации или в разрезе преобладают плагиогнейсы. Дефицит плотности измененных пород составляет 0.15×10^3 кг/м^3.

Удельная магнитная восприимчивость пород в данном комплексе варьирует в широких пределах (см. таблицу). Наиболее магнитными являются метаперидотиты, значения $\chi_{уд}$ которых варьируют в интервале от 1513 до 290×10^{-8} м^3/кг. Наиболее высокое значение удельной магнитной восприимчивости обнаруживает серпентинизированный образец метаперидотита, содержащий вкрапления новообразованного магнетита. Удельная магнитная восприимчивость основных пород изменяется от 340 до 13.43×10^{-8} м^3/кг. При этом интервал значений $\chi_{уд}$ неизмененных или слабоизмененных первичных магматических пород — габброидов $((340—95) \times 10^{-8}$ м^3/кг) перекрывается с интервалом значений $\chi_{уд}$ метаперидотитов, что является дополнительным подтверждением принадлежности этих образований к одной плутонической серии [18]. Метаморфические породы основного состава, представленные эклогитами и амфиболитами, характеризуются относительно небольшими вариациями $\chi_{уд}$: $(28—13) \times 10^{-8}$ м^3/кг. При этом массивные апогаббровые эклогиты отличаются от исходных габбро низкой удельной магнитной восприимчивостью $((17—14) \times 10^{-8}$ м^3/кг). Несколько выше этот показатель имеют полосчатые эклогиты $((22—17) \times 10^{-8}$ м^3/кг). Значения удельной магнитной восприимчивости амфиболитов $((28—13) \times 10^{-8}$ м^3/кг) перекрывают вариационные интервалы $\chi_{уд}$ массивных и полосчатых эклогитов. Это может быть связано с тем, что в выборке присутствуют амфиболиты, образовавшиеся как по массивным (апогаббровым), так и по полосчатым (апобазальтовым) эклогитам. Для пород кислого состава, плагиогнейсов и мигматитов характерны наиболее низкие значения $\chi_{уд}$, укладывающиеся в интервал $(15—6) \times 10^{-8}$ м^3/кг.

Из приведенных данных, с учетом результатов ранее выполненных исследований [8] видно, что наиболее отчетливо породы марункеуского комплекса севера дифференцированы по плотности. Их плотностные свойства, очевидно, определяются в первую очередь составом протолитов. Среди пород, слагающих рассматриваемый комплекс, повышенную плотность относительно протолитов могут иметь только эклогиты, богатые гранатом — породообразующим ми-

Магнитные свойства пород марункеуского комплекса

Magnetic features of rocks of Marunkeyusky complex

№ n/n	Номер образца Sample No.	Название пород Rocks	Удельная магнитная восприимчивость (χ) м^3/кг Specific magnetic susceptibility m^3/kg
Породы ультраосновного состава / Ultrabasic rocks			
1	409-02	Метаперидотит / Metaperidotite	290.00×10^{-8}
2	409-01	Метаперидотит / Metaperidotite	726.00×10^{-8}
3	406-01	Метаперидотит / Metaperidotite	1513.00×10^{-8}
Породы основного состава / Basic rocks			
4	404-01	Габбро / Gabbro	188.32×10^{-8}
5	505-01	Габбро / Gabbro	95.45×10^{-8}
6	505-10	Габбро / Gabbro	339.66×10^{-8}
7	404-03	Массивный эклогит / Massive eclogite	13.99×10^{-8}
8	404-02	Массивный эклогит / Massive eclogite	16.42×10^{-8}
9	404-04	Массивный эклогит / Massive eclogite	17.49×10^{-8}
10	110-10	Полосчатый эклогит / Massive eclogite	21.33×10^{-8}
11	110-23	Полосчатый эклогит / Massive eclogite	17.60×10^{-8}
12	419-01	Полосчатый эклогит Massive eclogite	22.00×10^{-8}
13	414-01	Полосчатый эклогит Massive eclogite	20.40×10^{-8}
14	409-03	Амфиболит / Amphibolite	28.49×10^{-8}
15	414-02	Амфиболит / Amphibolite	13.43×10^{-8}
16	414-02	Амфиболит / Amphibolite	22.56×10^{-8}
17	414-06	Амфиболит / Amphibolite	20.00×10^{-8}
Породы кислого состава / Acid rocks			
18	408-01	Биотитовый плагиогнейс / Biotite plagiogneiss	8.73×10^{-8}
19	408-01	Биотит-мусковитовый плагиогнейс / Biotite-muscovite plagiogneiss	7.56×10^{-8}
20	408-02	Биотитовый плагиогнейс / Biotite plagiogneiss	10.89×10^{-8}
21	408-03	Гранат-мусковитовый гнейс / Garnet-vuscovite gneiss	4.57×10^{-8}
22	408-04	Биотит-мусковитовый гнейс / Biotite-muscovite gneiss	9.10×10^{-8}
23	414-07	Мусковитовый гнейс / Muscovite gneiss	14.97×10^{-8}
24	418-01	Мигматит / Migmatite	6.56×10^{-8}

Примечание. Образцы пород из коллекции лаборатории региональной геологии ИГ Коми НЦ УрО РАН.
Note. Rock samples from the collection of the laboratory of regional geology, IG Komi SC UB RAS.

нералом, имеющим аномально высокую плотность. Наложенные локальные процессы (гранитизация, диафторез и др.) могут привести к некоторому снижению плотности пород.

Магнитная восприимчивость полиметаморфических образований является менее стабильной их характеристикой. Магнитные свойства пород при полиметаморфизме могут сильно изменяться. Так, при эклогитизации габбро удельная магнитная восприимчивость снижается на порядок. Гранитизация, как правило, также приводит к снижению магнитной восприимчивости. Процессы низкотемпературного диафтореза чаще всего сопровождаются повышением магнитной восприимчивости, особенно это характерно для ультраосновных пород. Напротив, при средне- и высокотемпературном диафторезе магнитная восприимчивость метаморфитов может практически не изменяться, что мы видим при сравнении $\chi_{уд.}$ эклогитов и апоэклогитовых амфиболитов. Влияние метаморфических процессов, особенно низкотемпературных, на магнитные свойства пород находит отражение в физических полях. В целом слабомагнитные метаморфические породы (эклогиты, амфиболиты, плагиогнейсы, мигматиты) создают над марункеуским комплексом отрицательное магнитное поле. Магнитная аномалия, вытянутая в плане в северо-северо-восточном направлении, имеет интенсивность до минус 400 нТл [4, 5]. Основной вклад в северо-северо-восточную ориентировку магнитных аномалий вносят зоны низкотемпературных диафторитов, образование которых связано с процессами формирования уралид. На восточной границе этой аномалии слабомагнитные породы марункеуского комплекса резко контрастируют с сильномагнитными породами гипербазитового массива Сыум-Кеу, создавая магнитные аномалии интенсивностью свыше 2000 нТл [4, 5].

На карте аномалий гравитационного поля (рис. 3, а) марункеуский комплекс расположен на западной периферии так называемого Уральского супермаксимума интенсивностью свыше 100 мГал, наличие которого обусловлено в основном базит-гипербазитовыми массивами уральской офиолитовой ассоциации, обнажающимися в зоне Главного Уральского разлома. Марункеуский комплекс расположен в области пониженного (относительно супермаксимума) гравитационного поля, характеризующегося наличием локальных аномалий. Фрагмент рисунка приведен на врезке, демонстрирующей наличие локального максимума широтной ориентировки. Конфигурация этого максимума подтверждает геологические данные о субширотном структурном плане марункеуского комплекса, а его пространственное положение — об ошибочности отнесения метаморфических толщ западной части Марункеуского блока к ханмейхойской свите. Центральная часть этого максимума интенсивностью 70 мГал, несомненно, связана с высокоплотными породами, которые на данной широте доминируют в разрезе рассматриваемого ком-

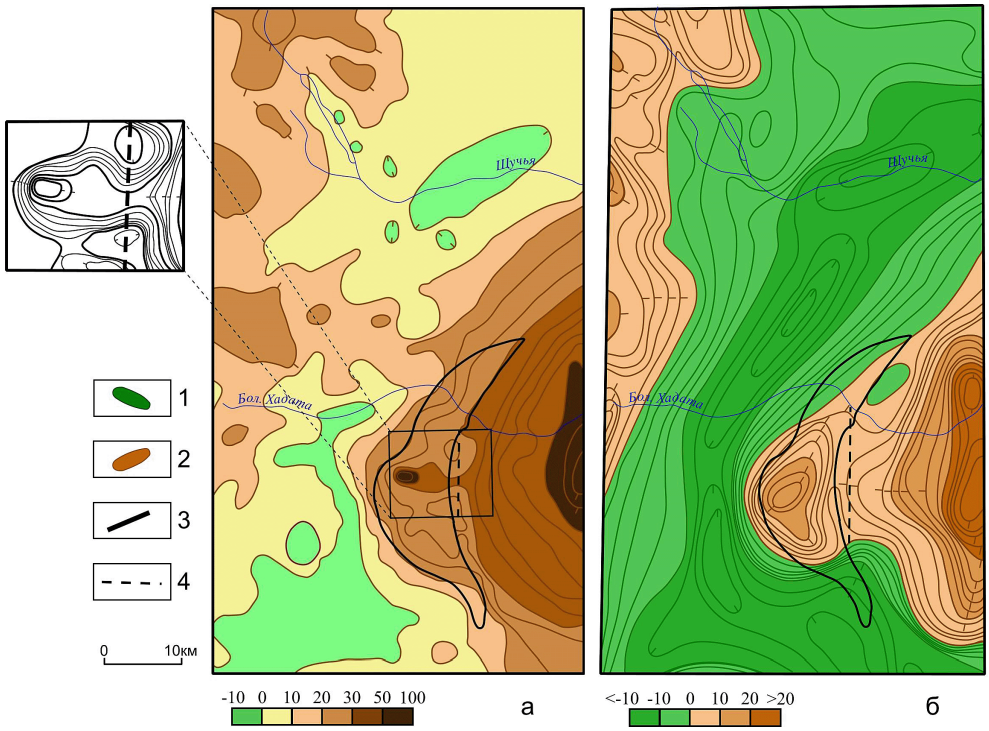


Рис. 3. Отображение марункеуского эклогит-гнейсового комплекса в гравитационном поле:

а — карта аномального гравитационного поля (отдельно выделен фрагмент положительной аномалии над марункеуским комплексом) [13]; b — карта локальных аномалий средней коры. 1—2 — аномалии: 1 — положительные; 2 — отрицательные; 3 — границы марункеуского комплекса; 4 — линия «пережима» изоаномал

Fig. 3. Representation of Marunkeu eclogite-gneiss complex in the gravitational field:

A — map of the anomalous gravitational field (fragment of positive anomaly over the Marunkeu complex is shown separately) [13]; b — map of local anomalies of the middle crust. 1—2 — anomalies: 1 — positive; 2 — negative; 3 — the boundaries of the Marunkeu complex; 4 — position of «pinch» of contour lines

плекса. На поверхности вещественный ансамбль наиболее высокоплотных пород (метаперидотиты, эклогиты и апоэклогитовые амфиболиты) обнажен в южной части Марункеуского блока, примыкающего к Слюдяной горке. Из этого можно сделать предположение, что толщи, обогащенные высокоплотными породами, погружаются на север и относятся к низам разреза марункеуского комплекса. Этот тезис находит подтверждение при построении карты, отражающей распределение аномалеобразующих источников на уровне средней коры (рис. 3, б): высокоинтенсивные аномалии в контурах марункеуского комплекса тяготеют к ее южной половине и отсутствуют в северной части, где в разрезе существенная роль принадлежит кислым породам — плагиогнейсам, гнейсам — и продуктам их мигматизации.

Выводы

Широкий спектр магнитных свойств пород марункеуского комплекса не обнаруживает отражения в магнитном поле, что связано с нивелирующей ролью полиметаморфизма. Метаморфизм пород в целом привел к снижению их удельной магнитной восприимчивости, поэтому над марункеуским комплексом наблюдается отрицательное аномальное магнитное поле. Северо-северо-восточная ориентировка магнитных аномалий определяется наличием относительно высокомагнитных пород в зонах низкотемпературных диафторитов, образование которых связано с процессами формирования уралид.

Более стабильной петрофизической характеристикой, меньше зависящей от метаморфических преобразований пород, является их плотность. Она в основном определяется составом протолитов. Среди пород, слагающих рассматриваемый комплекс, повышенную плотность относительно протолитов могут иметь только эклогиты. К некоторому снижению плотности пород могут привести наложенные локальные процессы, такие как гранитизация и диафторез.

Гравиметрические данные являются определяющими для установления структуры и особенностей глубинного строения. На основе интерпретации гравиметрических материалов показано, что толщи марункеуского комплекса, обогащенные высокоплотными породами (метаперидотиты, эклогиты и апоэклогитовые амфиболиты), погружаются на север и относятся к низам разреза марункеуского комплекса. Подтверждено представление о субширотном структурном плане марункеуского комплекса, что является дополнительным аргументом в пользу отнесения этого объекта к раннедокембрийским образованиям [12] и его трактовки как тектонически перемещенного фрагмента нижнедокембрийского кристаллического основания, вовлеченного в структуру уралид.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований РАН № 15-18-5-17.

Литература

1. *Андреичев В. Л., Родионов Н. В., Ронкин Ю. Л.* U-Pb- и Sm-Nd-датирование эклогитов Марункеуского блока Полярного Урала: новые данные // Метаморфизм, космические, экспериментальные и общие проблемы петрологии: Материалы Международного (X Всероссийского) петрографического совещания. Том 4. Апатиты: Изд-во Кол. НЦ РАН, 2005. С. 17—19.

2. *Андреичев В. Л., Ронкин Ю. Л., Серов П. А. и др.* Новые данные о докембрийском возрасте эклогитов Марун-Кеу (Полярный Урал) // Докл. РАН. 2007. Т. 413. № 4. С. 503—506.

3. *Глубинное* строение Тимано-Североуральского региона / Отв. редактор А. М. Пыстин. Сыктывкар: Геопринт, 2011. 261 с.

4. *Душин В. А., Сердюкова О. П., Малюгин А. А. и др.* Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200000. Издание второе. Серия Полярно-Уральская. Листы Q—42-I, II. Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2007. 340 с.

5. Карта аномально магнитного поля $(\Delta T)_a$ России и прилегающих акваторий. СПб.: ВСЕГЕИ, 2004 г.

6. *Ленных В. И.* Доуралиды зоны сочленения Восточно-Европейской платформы и Урала // Метаморфизм и тектоника западных зон Урала. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1984. С.21—42.

7. Маловичко А. К., Татунина О. Л. использование высших производных при обработке и интерпретации результатов геофизических наблюдений. М.: Недра, 1981. 186 с.

8. *Пономарева Т. А., Пыстин А. М.* Петрофизическая характеристика пород полиметаморфических комплексов севера Урала // Известия Коми НЦ УрО РАН. 2014. № 2. С. 68—74.

9. *Пономарева Т. А.* Петрофизическая зональность в структурно-вещественных комплексах севера Урала // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН, 2017. № 1. С. 8—15.

10. *Пыстин А. М.* Полиметаморфические комплексы западного склона Урала. СПб.: Наука, 1994. 208 с.

11. *Пыстина Ю. И., Пыстин А. М.* Цирконовая летопись Уральского докембрия // Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 168 с.

12. *Пыстин А. М., Пыстина Ю. И., Потапов И. Л., Панфилов А. В.* Раннедокембрийская история метаморфизма пород гранулитовых и эклогитовых комплексов палеоконтинентальной зоны Урала. Сыктывкар: Геопринт, 2012. 46 с.

13. *Сводная* гравиметрическая карта Северного, Приполярного и Полярного Урала в редукции Буге с $\sigma = 2.67$ г/см^3 масштаба 1:200000 (второе поколение). Свердловск: УГУ,1974.

14. *Стратиграфические* схемы Урала (докембрий, палеозой). Екатеринбург: Уралгеолком, 1993.

15. *Сычева Э. Н., Макаров А. Б., Душин В. А.* Формационный анализ глубокометаморфизованных горных пород на примере Харбейской серии Полярного Урала // Метаморфические комплексы Урала. Свердловск, 1982. С. 15—17.

16. *Удовкина Н. Г.* Эклогиты СССР. М.: Наука, 1985. 286 с.

17. Уляшева Н. С. Метабазиты харбейского комплекса (Полярный Урал). Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 2012. 99 с.

18. Уляшева Н. С., Пыстин А. М., Панфилов А. В., Потапов И. Л. Две серии первично-магматических пород в марункеуском эклогит-гнейсовом комплексе (Полярный Урал) // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2015. № 11. С. 3—12.

19. *Шацкий В. С., Симонов В. А., Ягоутц Э. и др.* Новые данные о возрасте эклогитов Полярного Урала // Докл. РАН. 2000. Т. 371. № 4. С. 519—523.

20. *Glodny J., Austreim H., Molina J. F. et al.* Protolith ages of eclogites, Marun-Keu Complex, Polar Urals, Russia: implica-

tions for the pre- and early Uralian evolution of the northeastern European continental margin // Geological Society of London Memoir. 2004. P. 87—105.

References

1. Andreichev V. L., Rodionov N. V., Ronkin Yu. L. *U-Pb and Sm-Nd datirovanie eklogitov Marunkeuskogo bloka Polyarnogo Urala: novye dannye* (U-Pb and Sm-Nd dating of eclogites of the Marunke block of the Polar Urals: new data). Metamorphism, cosmic, experimental and general problems of petrology. Materials of the International (X All-Russian) petrographic meeting, V. 4, Apatity. Kolsky SC RAS, 2005, pp. 17—19.

2. Andreichev V. L., Ronkin Yu. L., Serov P. A. et al. *Novye dannye o dokembriyskom vozraste eklogitov Marunkeu (Polyarny Ural)* (New data on the Precambrian age of the eclogites of Marunkeu (Polar Urals). Doklady Earth Sciences, 2007, V. 413, No. 4, pp. 503—506.

3. *Glubinnoe stroenie Timano-Severoural'skogo regiona* (The deep structure of the Timan-North-Uralian region. A. M. Pystin (Ed.). Syktyvkar: Geoprint, 2011, 261 p.

4. Dushin V. A., Serdyukova O. P., Malyugin A. A. et al. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoj Federacii masshtaba 1:200000. Izdanie vtoroe. Seriya Polyarno-Ural'skaya. Listy Q-42-I, II. Ob'yasnitel'naya zapiska*. (State geological map of Russian Federation, scale 1:200000. Second edition. Series Polar Ural. Sheets Q-42-I, II. Explanatory note.) St. Petersburg: VSEGEI, 2007, 340p.

5. *Karta anomalnogo magnitnogo polya rossii i prilegayushikh akvatory* (Map of anomalous magnetic field of Russia and adjacent territories). St. Petersburg: VSEGEI, 2004.

6. Lennyh V. I. *Douralidy zony sochleneniya Vostochno-Evropejskoj platform i Urala* (Rocks of Pre-Uralian orogeny of the zone of articulation of the Eastern European platform and Urals). Metamorfizm i tektonika zapadnyh zon Urala. Sverdlovsk. USC AS USSR, 1984, pp. 21—42.

7. Malovichko A. K., Tarunina O. L. *Ispolzovanie vysshih proizvodnyh pri obrabotke i interpretacii rezultatov geofizicheskih nabljudeniy* (The use of the higher derivatives in processing and interpreting the results of geophysical observations). Moscow: Nedra, 1981, pp. 186.

8. Ponomareva T. A., Pystin A. M. *Petrofizicheskaya harakteristika porod polimetamorficheskih kompleksov severa Urala* (Petrophysical characteristics of rocks of the polymetamorphic complexes in the north of the Urals). Proceedings of the Komi Science Centre UB RAS, 2014, No 2 (18), pp. 68—74.

9. Ponomareva T. A. *Petrofizicheskaya zonal'nost' v strukturno-veshchestvennyh kompleksah severa Urala* (Petrophysical zonation in structural-material complexes in the North of the Urals). Vestnik IG Komi SCUB RAS, 2017, V. 1, pp. 8—15.

10. Pystin A. M. *Polimetamorficheskie kompleksy zapadnogo sklona Urala* (Polymetamorphic complexes in the western slope of the Urals). St. Petersburg: Nauka, 1994, pp. 208.

11. Pystina Yu. I., Pystin A. M. *Tsirkonovaya letopis' Ural'skogo dokembriya* (Zircon record of the Uralian Precambrian). Ekaterinburg, UB RAS, 2002, 168 p.

12. Pystin A. M., Pystina Yu. I., Potapov I. L., Panfilov A. V. *Rannedokembrijskay istoriya metamorfizma porod granulitovyh i ehklogitovyh kompleksov paleokontinental'noj zony Urala* (Early Precambrian history of metamorphism of rocks of granulite and eclogite complexes of paleocontinent zone of the Urals) Syktyvkar: Geoprint, 2012, 46 p.

13. *Svodnaya gravimetricheskaya karta v redukcii Buge s* $\sigma = 2.67$ *g/sm*^{3} *masshtaba 1:200000 (vtoroe pokolenie)* (Consolidated gravimetric map in Bougue reduction with $\sigma = 2.67$ g/cm^3 of scale 1:200000 (second generation)). Sverdlovsk: USU, 1974.

14. *Stratigraficheski eshemy Urala (dokembrij, paleozoj). Objasnitel'naja zapiska* (Stratigraphic charts of the Urals (Precambrian, Paleozoic). Explanatory note. Materials and decisions of the 4th Urals interdepartmental stratigraphic meeting. Ekaterinburg, 1993, 152 p.

15. Sycheva Eh. N., Makarov A. B., Dushin V. A. *Formacionnyj analiz gluboko metamorfizovannyh gornyh porod na primere Harbejskoj serii Polyarnogo Urala* (Formation analysis of deeply metamorphisized rocks on the example of the Harborean series of the Polar Urals. Metamorphic complexes of the Urals). Sverdlovsk, 1982, pp. 15—17.

16. Udovkina N. G. *Eklogity SSSR* (Eclogites of the USSR). Moscow: Nauka, 1985, 286 p.

17. Ulyasheva N. S. *Metabazity harbejskogo kompleksa* (Polyarnyj Ural) (Meta-mafic rocks of Harbei complex (Polar Urals)). Syktyvkar. Komi SC UB RAS, 2012, 99 p.

18. Ulyasheva N. S., Pystin A. M., Panfilov A. V., Potapov I. L. *Dve serii pervichno-magmaticheskih porod v marunkeuskom ehklogit-gnejsovom komplekse (Polyarnyj Ural)* (Two series of primary igneous rocks in Marunkeu eclogite-gneiss complex (Polar Urals)). Vestnik IG Komi SC UB RAS, 2015, V. 11, pp. 3—12.

19. Shatskiy V. S., Simonov V. A., Yagouts E. et al. *Novye dannye o vozraste ehklogitov Polyarnogo Urala* (New data on the age of eclogites of the Polar Urals). Doklady Earth Sciences, 2000, V. 3 (71), Issue 4, pp. 519—523.

20. Glodny J., Austreim H., Molina J. F. et al. Protolith ages of eclogites, Marun-Keu Complex, Polar Urals, Russia: implications for the pre- and early Uralian evolution of the northeastern European continental margin. Geological Society of London Memoir, 2004, pp. 87—105.

УДК 553.5:549 (470.316) DOI: 10.19110/2221-1381-2019-2-22-28

МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ И ГЕММОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНТЕРЬЕРНО-ЮВЕЛИРНЫХ АММОНИТОВ ЯРОСЛАВСКОЙ ОБЛАСТИ

Д. А. Петроченков
Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, Москва
p-d-a@mail.ru

Изделия из аммонитов пользуются в настоящее время повышенным спросом. Аммониты интерьерного качества известны и в Ярославской области. Автором впервые детально изучены минеральный состав и геммологические характеристики интерьерно-ювелирных аммонитов Ярославской области. Аммониты имеют позднеюрский возраст, но заключены в водно-ледниковых отложениях четвертичного возраста. Для аммонитов характерен перламутровый слой с яркой разноцветной иризацией.

Комплекс исследований аммонитов включал определение микротвёрдости, плотности, люминесценции, оптико-петрографический анализ, определение минерального и химического состава, электронно-зондовые и электронно-микроскопические исследования. Аммониты состоят преимущественно из апатита (42—67 мас. %) и кальцита (16—48 мас. %). Присутствуют: кварц, глауконит, каолинит, гидрослюда, гётит, пирит и рентгеноаморфная фаза. Из элементов-примесей фиксируются высокие содержания (мас. %): Sr — 0.170 и Ba — 0.028. Содержания радиоактивных и канцерогенных элементов находятся на уровне фоновых.

Стенки и перегородки раковины аммонита полностью утратили первоначальный арагонитовый состав и состоят из апатита, кальцита с включениями гётита и пирита. Иризация перламутрового слоя связана с пластинчатыми слоями преимущественно апатита, унаследовавшими структуру пластинчатых слоёв арагонита. Цвет иризации определяется размером и упорядоченностью пластин и не зависит от их минерального состава.

Аммониты Ярославской области представляют коммерческий интерес в качестве интерьерных образцов. Фрагменты перламутрового слоя с яркой иризацией могут использоваться для изготовления кабошонов аммолита.

Ключевые слова: *аммонит, арагонит, апатит, иризация, аммолит, ювелирные материалы, Ярославская область.*

MINERAL COMPOSITION AND GEMOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE INTERIOR AND JEWELLERY AMMONITES OF THE YAROSLAVL REGION

D. A. Petrochenkov
Russian State Geological Prospecting University named after Sergo Ordzhonikidze, Moscow
p-d-a@mail.ru

Products from ammonites are currently in high demand. The author for the first time studied in detail the mineral composition and gemological characteristics of the interior and jewellery ammonites of the Yaroslavl region. Late Jurassic ammonites redeposited in the water-glacial Quaternary sediments. Ammonites are characterized by a nacre layer with bright multi-colored iridescence.

The complex of ammonite studies included the determination of microhardness, specific gravity, luminescence, optical-petrographic analysis, determination of the mineral and chemical composition, electron-probe and electron-microscopic studies. Ammonites consisted mainly of apatite (42—67 wt. %) and calcite (16—48 wt. %). Quartz, glauconite, kaolinite, hydromica, goethite, pyrite and x-ray amorphous phase were present. The following elements-admixture had high content, wt. %: Sr — 0,170 and Ba — 0,028. The contents of radioactive and carcinogenic elements were at the level of background.

The walls and partitions of the ammonite shell completely lost the original aragonite composition and consisted of apatite, calcite with inclusions of goethite and pyrite. The iridescence of the pearlescent layer was associated with lamellar layers of predominantly apatite, which inherited the structure of lamellar layers of aragonite. The color of irisation was determined by the size and orderliness of the plates and did not depend on their mineral composition.

Ammonites of the Yaroslavl region are of commercial interest as interior samples. Fragments of the pearl layer with bright iridescence can be used to make ammolite cabochons.

Keywords: *ammonite, aragonite, apatite, irization, ammolite, jewelry materials, Yaroslavl region.*

Аммониты, а также изделия из них пользуются в настоящее время повышенным спросом. Аммониты как поделочный и ювелирный материал входят в группу гидрогенных биоминеральных образований [1]. Аммониты характеризуются разнообразием цветовых оттенков, форм и размеров, структурными и текстурными особенностями внутреннего строения, положительными технологическими характеристиками, что позволяет изготавливать широкий спектр сувенирных и ювелирных изделий. Несомненно, каждое изделие из аммонитов является индивидуальным. На мировой рынок аммониты поступают преимущественно из Мадагаскара [10], Марокко [5, 8], Канады [9], а также России [3, 4]. Аммониты интерьерного качества известны и в Ярославской области.

Местонахождение аммонитов расположено в Рыбинском административном районе на левом берегу р. Черёмухи от южного края д. Ивановское до южного края д. Михалёво. Для аммонитов характерен перламутровый слой с яркой красной, оранжевой и зелёной окраской (рис. 1, а). Аммониты позднеюрского возраста [2, 6, 7], переотложены в водно-ледниковых четвертичных отложениях, обнажающихся в береговых обрывах. Аммониты часто находятся в русле реки, где их и собирают.

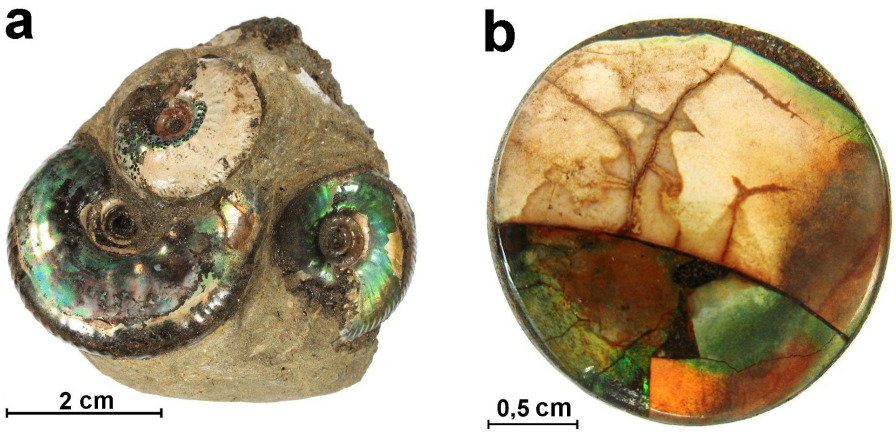


Рис. 1. Фосфоритовая конкреция с верхневолжскими аммонитами рода *Craspedites* из водно-ледниковых плейстоценовых отложений в бассейне реки Черёмухи (a); кабошон аммолита (b)

Fig. 1. Phosphorite concretion with Upper Valanginian ammonites of the genus *Craspedites* from the fluvioglacial Pleistocene sediments in the basin of the river Cheremukha (a); Ammolite cabochon (b)

Четвертичная система (Q) представлена слоями разнозернистого песка и суглинком. Выделяется 3 слоя.

Нижний слой (Q_2) состоит из мелкозернистого тёмно-серого песка с конкрециями фосфоритов и галькой магматических пород. Мощность слоя 0.2 м.

Средний слой (Q_2) залегает с размывом на нижнем слое и представлен среднезернистым голубовато-серым песком с редкими фосфоритовыми конкрециями, мелкозернистым слюдистым светло-серым песком, среднезернистым серовато-бурым песком с редкой галькой кристаллических пород. Мощность слоя 0.6 м.

Верхний слой (Q_3) залегает с размывом на среднем слое и представлен суглинком с большим количеством гальки и крупных валунов кристаллических пород. Мощность слоя 1.2 м.

Аммониты интерьерного и ювелирного качества сосредоточены преимущественно в нижнем слое. Тёмная окраска песка обусловлена обильной примесью глинистых частиц, образованной при размывании подстилающей нижнекимериджской глины. Слой переполнен округлыми конкрециями фосфоритов мелкозернистого песчаника. Конкреции изобилуют ископаемой фауной верхневолжского подъяруса, в которой присутствуют аммониты: *Kachpurites, Craspedites, Garniericeros* [2].

Методы исследований

Комплекс исследований аммонитов ювелирно-поделочного качества проведен на кафедре минералогии и геммологии МГРИ-РГГРУ, в ВИМС, ИГЕМ РАН. Он включал определение микротвёрдости, плотности, люминесценции, оптико-петрографический анализ, определение минерального и химического состава, электронно-зондовые и электронно-микроскопические исследования.

Количественное определение химического состава аммонитов выполнено методом рентгеновского флуоресцентного анализа (РФА) на вакуумном спектрометре последовательного действия Axios MAX Advanced. Оптико-петрографический и минерагра-

фический анализы выполнены с использованием микроскопа «Полам Р-112». Микротвёрдость определялась на микротвердомере «ПМТ-3» с нагрузкой 50 г и выдержкой 15 сек. Плотность образцов была выявлена гидростатическим методом на электронных весах Sartorius Gem G 150D. Люминесценция изучалась под ультрафиолетовой лампой Multispec System Eickhorst с $\lambda = 254$ и 365 нм. Минеральный состав определялся рентгенографическим количественным фазовым анализом (РКФА) на дифрактометре X'Pert PRO MPD. Электронно-зондовые исследования выполнены на микроанализаторе Jeol JXA-8100, позволяющем получить химический состав по данным рентгеноспектрального микроанализа (РСМА), провести анализ образцов в обратнорассеянных электронах (ОРЭ) и характеристическом рентгеновском излучении (ХРИ). Содержание кислорода рассчитывалось по стехиометрии. Электронно-микроскопическое изучение образцов проведено на растровом электронном микроскопе (РЭМ) Tesla BS-301, оснащённом рентгеновским спектрометром с дисперсией по энергии, позволяющем определить элементный состав от Mg до U. Детальное минералогическое изучение аммонитов Ярославской области интерьерно-ювелирного качества с использованием современных методов исследования проведено впервые.

Геммологические характеристики

Изученные геммологические характеристики включали минеральный состав (рассмотрен ниже), размер, цвет, плотность, микротвёрдость, люминесценцию аммонитов. Размер хорошо сохранившихся аммонитов колеблется от 1 до 5 см.

Перламутровый слой у небольших по размерам раковин незначительной (десятые доли мм) толщины легко разрушается. В разрушенных участках могут проявляться лопастные линии серовато-белого цвета на чёрной поверхности раковины. Встречаются фрагменты более крупных раковин, перламутровый слой которых достигает толщины 1 мм, он пригоден для изготовления кабошонов аммолита. В аммолите представлены преимущественно оранжевые и ко-

ричневые цвета, реже сочетание оранжевых и зелёных (рис. 1, b). Аммолит, за редким исключением, невысокого качества. Микротвёрдость перламутрового слоя в аммолите 180 кг/мм^2, а торцевой поверхности стенки — 143 кг/мм^2. Люминесценция не наблюдается.

Внутренняя часть раковин выполнена преимущественно фосфоритом чёрного, реже тёмно-серого цвета. Часто камеры остаются незаполненными. Фосфорит содержит большое количество пор, легко разламывается в руках. Излом неровный, раковистый, с мелкими кавернами. Фосфорит плохо полируется, и без предварительной пропитки смолами получить зеркальную поверхность невозможно. Неразрушенные газовые камеры раковин частично или полностью выполнены кальцитом. В неполностью выполненных камерах (жеодах) на поверхности внутренних стенок образуются щёточки мелких, до 3 мм, бесцветных и светло-серых кристаллов кальцита копьевидной формы. Реже встречаются камеры, полностью выполненные кальцитом. Кальцит в них полупрозрачный, бесцветный и просвечивающий, светло-серого и белого с желтоватым оттенком цвета. Плотность фосфорита в среднем — 2.5 г/см^3. Микротвёрдость фосфорита в среднем 256 кг/мм^2, кальцита — 182 кг/мм^2. Люминесценция не проявлена. Люминесцируют оранжевым цветом в фосфорите фрагменты раковин фоссилий.

Основной объём аммонитов представляет интерес в качестве интерьерных образцов, в том числе и на естественной породе. Небольшие аммониты размером 1—2 см с хорошо сохранившимся перламутровым слоем могут использоваться для изготовления кулонов и колец, но их объём невелик.

Минеральный, химический состав и структурные особенности аммонитов

По данным РКФА, аммониты состоят преимущественно из апатита (42—67 мас. %) и кальцита (16—48 мас. %). В аммонитах установлены также содержания (мас. %): кварца — 2—10, гётита — 1—2, пирита — 1—2, каолинита — 2, глауконита — 1, гидрослюды — 1, фиксируется рентгеноаморфная фаза (РАФ) < 1. Содержание минералов находится в широком диапазоне и зависит от минерализации камер. Стенки и перегородки раковин содержат (мас. %): апатит — 70—76, кальцит — 23—27, гётит — 1, пирит — 1, РАФ < 1. Арагонит, образующий исходные стенки и перегородки раковин аммонитов, не фиксируется. Ненарушенные газовые камеры аммонита выполнены преимущественно кальцитом — 97 мас. %, присутствует апатит — 3 мас. %. Фосфорит, выполняющий жилые и разрушенные газовые камеры, состоит (мас. %): из кальцита — 50, апатита — 30, кварца — 12, каолинита — 3, глауконита — 2, пирита — 1, гётита — 1, гидрослюды — 1, РАФ < 1.

Химический состав аммонитов по данным РФА подтверждают результаты РКФА. Высокие содержания CaO, ППП, P_2O_5 связаны с кальцитом и апатитом; повышенные Na_2O, Al_2O_3, SiO_2, K_2O — с кварцем и алюмосиликатами; Mg, Mn и Fe входят в структуру кальцита, Fe связан с гётитом, Fe и S — с пиритом. Отметим присутствие TiO_2, указывающее на минералы титана (табл. 1). Из элементов-примесей фиксируются высокие содержания (мас. %): Sr — 0.170, Ba — 0.028; низкие — Cr, V, Co, Ni, Zn, Rb, Zr, Y и As. Содержание радиоактивных и канцерогенных элементов находится на уровне фоновых (табл. 1).

Структурные особенности и минеральный состав аммонитов изучен в прозрачных шлифах. В строении аммонитов выделяются стенки и перегородки раковины, камеры, выполненные фосфоритом и кальцитом (рис. 2). Ширина стенок 0.15—0.2 мм, перегородок — 0.05—0.08 мм (рис. 2, b). Кальцит выполняет центральные части стенок и более широких перегородок раковин. Кристаллы пластинчатой формы размером до 0.02 мм. Апатит выполняет краевые части стенок и перегородок раковины в виде узких зон (около 0.01 мм) со скрытокристаллической структурой. Узкие перегородки раковины замещены апатитом полностью. Апатит совместно с кальцитом присутствует и в центральных частях стенок раковины. Здесь кальцит наблюдается в виде пластинчатых кристаллов размером около 0.08 мм. В стенках имеются выделения пирита округлой формы размером до 0.015 мм, часто образующие цепочки (рис. 2, c).

Кальцит, выполняющий неразрушенные камеры, крупнопризматический, размером 1—3 мм по длинной оси с ровным угасанием и отчётливо проявленной спайностью. Форма кристаллов слабоудлинённая, изометричная. Соседние кристаллы преимущественно имеют разный угол угасания. В крупных кристаллах наблюдаются вростки кальцита, определяемые по другому углу угасания. Кальцитом выполнены и трещинки шириной до 0.5 мм. Кальцит содержит большое количество мелких пор, связанных с его выщелачиванием (рис. 2, a, d).

Фосфорит состоит из большого количества включений размером 0.1—0.5 мм, сцементированных апатитом и кальцитом. Включения представлены преимущественно кварцем как округлой, так и угловатой формы. Встречаются включения алюмосиликатов, часто частично или полностью замещаемые апатитом. Замещение начинается по микротрещинкам, захваты-

Таблица 1. **Химический состав (1) и содержание элементов-примесей (2) в аммоните по данным РФА**

Table 1. **Chemical composition (1) and the content of elements-admixture (2) in ammonite according to XFA data**

1	Содержание компонента, мас. % / Component content, wt. %															
	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	K_2O	CaO	TiO_2	MnO	Fe_2O_3	P_2O_5	S	ППП*				
	0,76	0,58	2,92	16,42	0,67	34,59	0,14	0,04	4,27	27,33	1,28	10,62				
2	Содержание элемента, мг/кг ($\times 10^{-4}$ мас. %) / Element content, mg/kg ($\times 10^{-4}$ wt. %)															
	Cr	V	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Zr	Ba	U	Th	Y	Nb	Pb	As
	29	19	13	55	13	57	24	1695	26	284	<5	<5	49	7	<10	38

Примечания: ППП* — потери при прокаливании. *Note:* ППП* — loss on ignition.

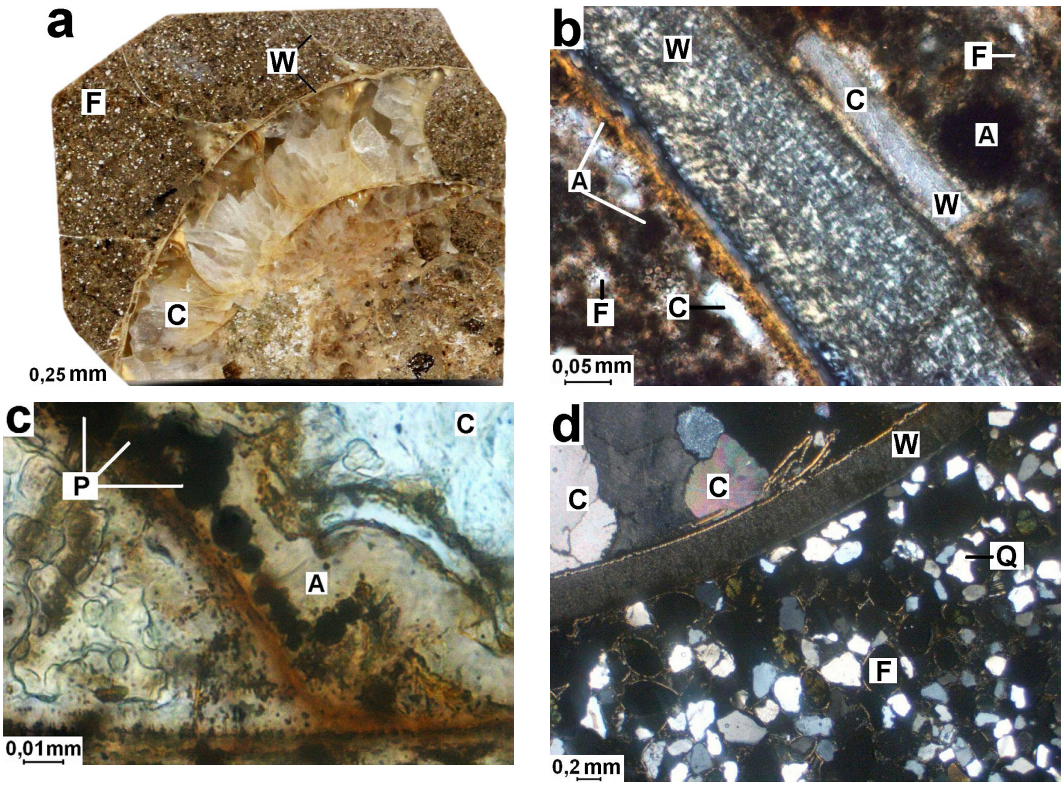


Рис. 2. Аншлиф (a) и прозрачные шлифы (b—d) фрагментов аммонитов, включающие стенку (b, c), перегородку (d), камеры, выполненные кальцитом и фосфоритом. Николи: X — b, d; || — c. W — перегородка и стенка аммонита, C — кальцит, F — фосфорит, A — апатит, Q — кварц, P — пирит

Fig. 2. Solid section (a) and transparent thin sections (b—d) of ammonite fragments, including a wall (b, c), a partition (d), chambers filling with calcite and phosphate. Nicols: X — b, d; || — c. W — partition and wall of ammonite, C — calcite, F — phosphorite, A — apatite, Q — quartz, P — pyrite

вая в дальнейшем весь минерал. Апатит часто образует каёмки вокруг включений (рис. 2, b, d).

Электронно-зондовые исследования

В ОРЭ кальцит, выполняющий неразрушенные камеры, однородного цвета с различным количеством пор. Бесцветный полупрозрачный кальцит содержит небольшое количество мелких пор (рис. 3, a), в просвечивающем кальците их количество возрастает. Участок с непрозрачным кальцитом серого, желтовато-серого цвета содержит большое количество разноразмерных пор. Размер крупных пор достигает 360 мкм. Они частично выполнены мелкими (1—5 мкм) кристаллами апатита, образующими протяженные цепочки и изометричные, сложной формы выделения размером до 40 мкм (рис. 3, b). Это указывает на то, что апатит образовался позднее кальцита, выполняет в нём поры, трещинки. В порах, по данным ХРИ, фиксируются высокие содержания Si, связанные с кварцем, вероятно в гелеобразном состоянии.

Фосфорит состоит из сцементированных окатанных и угловатых зёрен полиминерального состава размером 50—400 мкм. В ОРЭ и ХРИ отражается минеральный состав фосфорита (рис. 3, c, d). По высоким содержаниям Si выделяется кварц, Ca — кальцит, Fe — гётит; по сочетанию высоких содержаний P и Ca — апатит, Fe и S — пирит, Si и Al — алюмосиликаты (рис. 3, d). Кальцит является цементом в фосфорите, занимая пространство между включениями, а также выполняет центральную часть отдельных включений. В ОРЭ кальцит имеет однородную серую окраску. Апатит окаймляет включения узкими (2—4 мкм) слоями, выполняет в отдельных из них центральные части, образует выделения сложной формы с большим количеством мелких пор. Кварц встречается в виде угловатых обломков размером до 50 мкм, а также округлых мелких (1—10 мкм) включений. Как правило, крупные включения кварца обрамляются апатитом.

Более детальное изучение включений алюмосиликатов позволяет выделить по химическому составу глауконит и каолинит. Алюмосиликат округлой формы размером 300—500 мкм обрамляется прерывистой каймой апатита с большим количеством пор (рис. 4, a). По алюмосиликату развиваются с образованием корочек гётит и пирит. Частично гётит с включениями пирита замещает и окаймляющий апатит. Корочки часто имеют зональное строение. Основная их часть выполнена гётитом, имеющим в ОРЭ светло-серую окраску. Краевая их часть в виде прерывистых цепочек выполнена мелкими, около 4 мкм, кристаллами пирита, часто глобулярной формы. Пирит в ОРЭ белого цвета (рис. 4, a). Включения глауконита могут быть почти полностью замещены гётитом и пиритом, при слиянии которых образуются корочки и слои с большим количеством пор (рис. 4, b). Форма выделений гётита и пирита указывает на их развитие по микротрещинкам в глауконите и апатите. Включения каолинита лентовидной формы, длиной до 100 мкм и шириной до 3 мкм в апатите и каль-

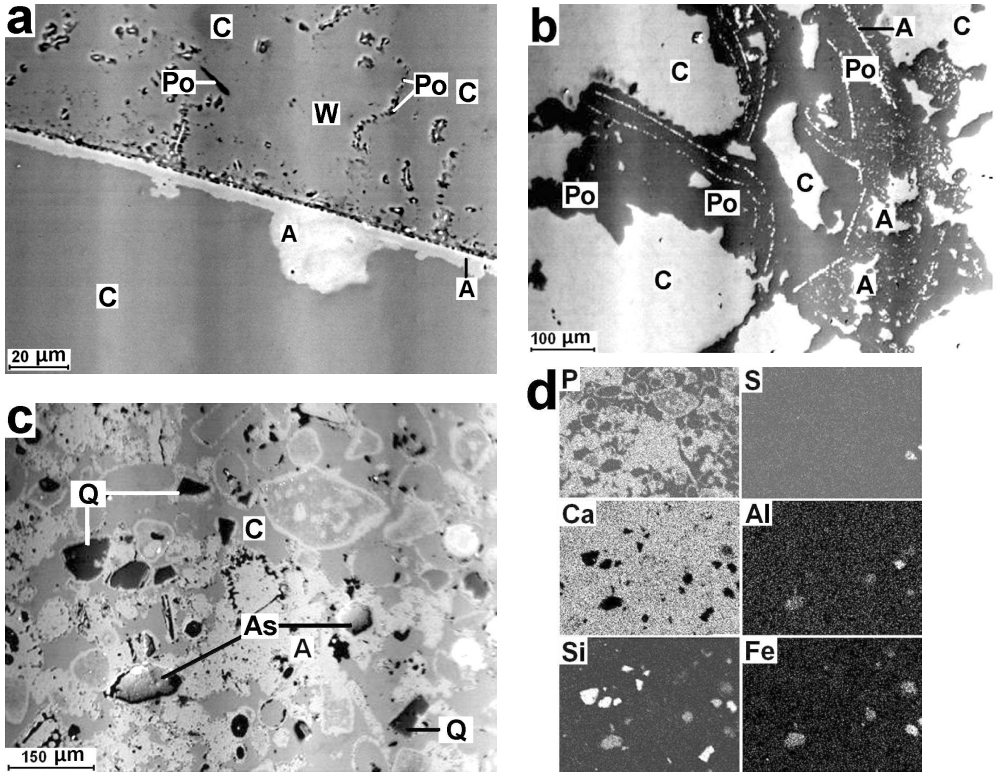


Рис. 3. Стенка (W) и камера аммонита, выполненные кальцитом (C) с тонкими слоями апатита (A) и мелкими порами (Po) — a; непрозрачный кальцит (C), выполняющий камеру, с большим количеством крупных пор (Po) и мелкими включениями апатита (A) — b; фрагмент фосфорита, состоящего из кальцита (C), апатита (A), кварца (Q) и алюмосиликатов (As) в ОРЭ — c и ХРИ — d. Микрозонд

Fig. 3. A wall (W) and an ammonite chamber filling with calcite (C) with thin layers of apatite (A) and small pores (Po) — a; opaque calcite (C) filling the chamber, with a large number of large pores (Po) and small inclusions of apatite (A) — b; a fragment of phosphorite, consisting of calcite (C), apatite (A), quartz (Q) and aluminosilicates (As) in the BSE — c and CXRE — d. Microprobe

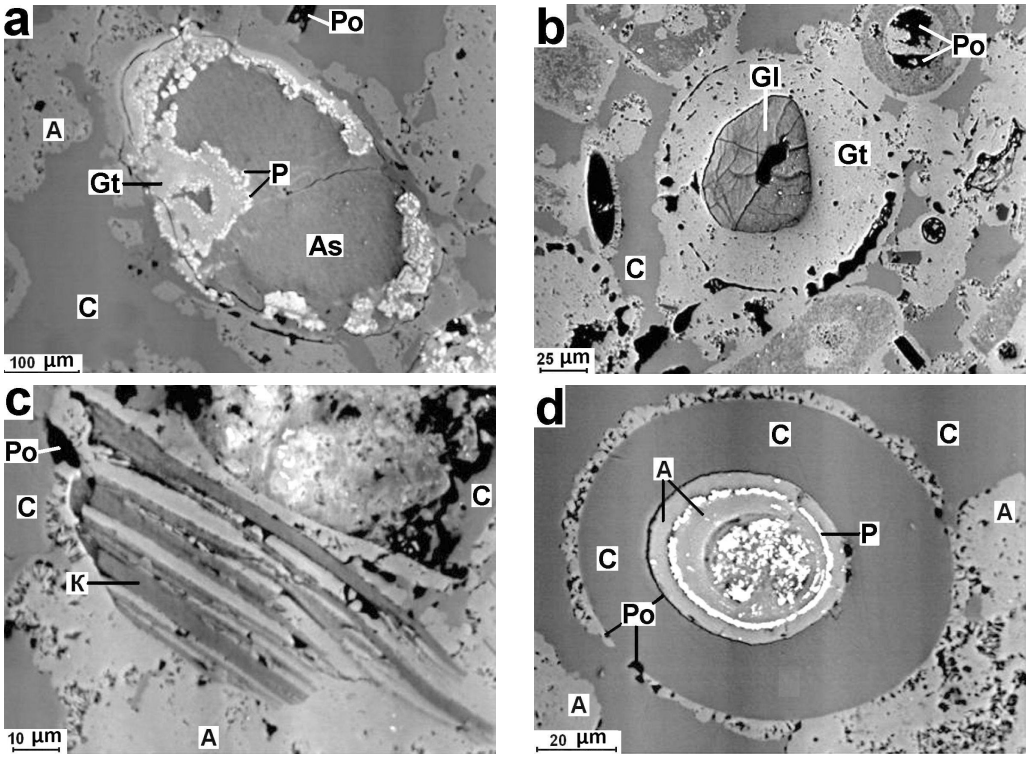


Рис. 4. Фосфорит с включениями: алюмосиликата (As), гётита (Gt), пирита (P) — a; глауконита (Gl), гётита (Gt) — б; каолинита (K) — c; полиминеральное зональное включение, образованное апатитом, кальцитом, пиритом — d. Микрозонд, ОРЭ. A — апатит, C — кальцит, P — пирит, Po — поры

Fig. 4. Phosphorite with inclusions: aluminosilicate (As), goethite (Gt), pyrite (P) — a; glauconite (Gl), goethite (Gt) — b; kaolinite (K) — c; polymineral zone inclusion formed by apatite, calcite, pyrite — d. Microprobe, BSE. A — apatite, C — calcite, P — pyrite, Po — pores

Таблица 2. **Химический состав кальцита в аммонитах по данным РСМА**

Table 2. **The chemical composition of calcite in ammonites according to X-ray microanalysis**

Содержание элемента, мас. % / Element content, wt. %				
Mg	Mn	Fe	Ca	O
0.11—0.35*	0.10—0.32	1.11—1.96	35.12—37.95	14.85—16.13
0.22	0.21	1.44	36.71	15.54

Примечания: * — в числителе — крайние значения, в знаменателе — средние по 36 спектрам.
Note: * — in the numerator, the minimum and maximum values, in the denominator — the average of 36 spectra.

ците (рис. 4, c). В таких комплексных образованиях присутствует большое количество пор.

В фосфорите наблюдаются округлые, размером до 100 мкм полиминеральные включения с зональной структурой (рис. 4, d). Внешнюю зону включения образует слой апатита шириной около 3 мкм с большим количеством пор. Линия контакта с кальцитом с внешней стороны неровная, волнообразная, мелкозубчатая, с внутренней — ровная. Далее следует кольцевая зона кальцита шириной около 20 мкм. Кальцит однороден по строению и не содержит пор. Ядро включения овальной формы, размер 50 мкм по длинной оси, выполнено апатитом. Апатит часто замещён пиритом, образующим прерывистые кольцевые слои шириной до 1.5 мкм и небольшие (до 5 мкм) изометричные выделения.

По данным РСМА, кальцит различных участков аммонитов однороден. Из элементов-примесей в нём фиксируются (ср., мас. %): Mg — 0.22, Mn — 0.21 и Fe — 1.44 с небольшими колебаниями значений (табл. 2). Апатит из элементов-примесей содержит в среднем (мас. %): Na — 0.64, Mg — 0.21, S — 0.19, Fe — 0.25 и Sr — 0.57 и по химическому составу относится к гидроксиапатиту. Содержания S и Fe связаны с микровключениями пирита и гётита. В пирите из элементов-примесей фиксируется As — от 0.45 до 1.31 мас. %.

Электронно-микроскопические исследования

Изучена внешняя стенка аммонита с тёмно-красной и зелёной иризацией. В верхней части слоя выделяется клиновидный прослой шириной 50—200 мкм, в пределах которого наблюдается зеленая иризация. Для прослоя характерна чётко выраженная пластинчатая структура (рис. 5, a). Ширина пластин колеблется в значительных пределах. Наряду с мелкими пластинами шириной 2—3 мкм и толщиной 0.3—0.6 мкм, что соответствует размерам первоначального арагонита, присутствуют более крупные, шириной 10—15 мкм и толщиной около 2 мкм, с нечёткими контурами. Крупные пластины образованы в результате перекристаллизации мелких. Для прослоя характерно большое количество пор вытянутой формы, а также фрагменты, образованные изометричными округлыми образованиями размером 4—8 мкм. Спектрограмма фиксирует высокие содержания P, Ca и повышенные Al, Si, Sr, K и Fe, что указывает на полиминеральный, преимущественно апатитовый состав прослоя.

Перламутровый слой с тёмно-красной иризацией состоит из пластин шириной 3—4 мкм при толщине 0.6—0.8 мкм. При срастании пластины формируют вертикальные колонны. В других фрагментах слой состоит из округлых образований сложной формы размером до 8 мкм. Для слоя характерно большое количество мелких пор (рис. 5, b). Спектрограмма фиксирует высокие содержания Ca, P и повышенные Si, Sr, K и Fe, что указывает преимущественно на апатитовый состав слоя.

Перламутровый слой с отсутствием иризации состоит преимущественно из округлых изометричных образований со сложным, нечётко выраженным контуром (рис. 5, c). Размер образований колеблется от 2 до 8 мкм. Характерно большое количество пор. Исходная структура арагонита полностью утрачена. Спектрограмма фиксирует те же элементы, что и в слоях с тёмно-красной и зелёной иризацией, указывая на аналогичный минеральный состав.

Таким образом, верхняя часть перламутрового слоя, с которой связана иризация, частично сохраняет исходную пластинчатую структуру при полном за-

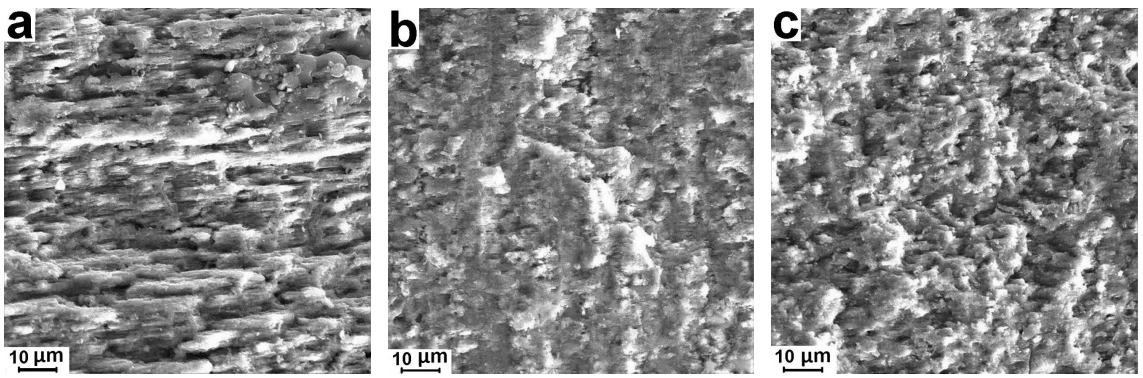


Рис. 5. Структура перламутрового слоя с зелёной (a) и тёмно-красной (b) иризацией, а также без иризации (c). РЭМ

Fig. 5. The structure of the nacre layer with green (a) and dark red (b) iridescence, without iridescence (c). SEM

мещении арагонита преимущественно апатитом. Цвет иризации определяется размером и упорядоченностью пластин и не зависит от их минерального состава.

Выводы

Аммониты Ярославской области коммерческого качества состоят преимущественно из апатита и кальцита. Присутствуют: кварц, глауконит, каолинит, гидрослюда, гётит, пирит, РАФ. Перегородки и стенки аммонитов полностью утратили первоначальный арагонитовый состав и состоят из апатита, кальцита с включениями гётита, пирита и РАФ.

Для аммонитов характерен перламутровый слой с разноцветной яркой иризацией. Иризация связана с пластинчатыми слоями преимущественно апатита, унаследовавшими структуру пластинчатых слоёв арагонита. Цвет иризации определяется размером и упорядоченностью пластин и не зависит от их минерального состава.

Аммониты Ярославской области представляют коммерческий интерес преимущественно в качестве интерьерных образцов. Фрагменты перламутрового слоя с яркой иризацией могут использоваться для изготовления кабошонов аммолита.

Литература

1. Буканов В. В. Цветные камни и коллекционные минералы: Энциклопедия. СПб., 2014. 464 с.

2. Киселев Д. Н., Баданов В. Н., Муравин Е. С. и др. Атлас геологических памятников природы Ярославской области. Ярославль: ЯГПУ, 2003. 121 с.

3. Петроченков Д. А. Структурные особенности и минеральный состав раковин готеривских аммонитов Ульяновской области // Изв. вузов. Геология и разведка. 2006. № 5. С. 26—30.

4. Петроченков Д. А., Быховский Л. З. Ювелирно-поделочные аммониты: проблемы оценки и перспективы добычи // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2018. № 4. С. 15—22.

5. Петроченков Д. А. Особенности отработки верхнедевонских ювелирно-поделочных аммонитов Марокко // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 2. С. 34—41.

6. Рогов М. А. Стратиграфия нижневолжских отложений Русской плиты // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2002. Т. 10. № 4. С. 35—51.

7. Рогов М. А., Барабошкин Е. Ю., Гужиков А. Ю. и др. Границы юры и мела в Среднем Поволжье // Международная научная конференция по проблеме границы юрской и меловой системы: Путеводитель экскурсии. Самара: ФГОБУ СамГТУ, 2015. 130 с.

8. Bockwinkel J., Becker R. T., Ebbighausen V. Late Givetian ammonoids from Hassi Nebech (Tafilalt Basin, Anti-Atlas, Southern Morocco) // Fossil Record. 2013. Vol. 01.16 (1) 2013. pp. 5—65.

9. Mychluk K. Update on ammonite production from Southern Alberta, Canada // Gems & Gemology. 2009. Vol. 45. № 3. pp. 192—196.

10. Walaszczyk I., Kennedy W. J., Dembicz K., Gale A. S., Praszlier T., Rasoamiaramanana A. H., Randrianaly H. Ammonite and inoceramid biostratigraphy and biogeography of the Cenomanian through basal Middle Campanian (Upper Cretaceous) of the Morondava Basin, western Madagascar // Journal of African Earth Sciences, 2014. Vol. 89. pp. 79—132.

References

1. Bukanov V. V. *Colored stones and collection minerals. Encyclopedia*. Saint Petersburg, 2014, 464 p.

2. Kiselev D. N., Badanov V. N., Muravin E. S., et al. *Atlas of Geological Monuments of Nature of the Yaroslavl Region*. Yaroslavl: YAGPU, 2003, 121 pp.

3. Petrochenkov D. A. *Struktural features and mineral composition of Hauterivian ammonite shells from the Ulyanovskaya area*. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya I Razvedka. V. 5, 2006, pp. 26—30.

4. Petrochenkov D. A., Bykhovsky L. Z. *Jewellery/ornamental ammonites: problems of valuation and production prospects*. Mineral resources of Russia. Economics and Management. V. 4, 2018, pp. 15—22.

5. Petrochenkov D. A. *Features of production of the upper devonian jewelery-ornamental ammonites of Morocco*. Mining informational and analytical bulletin. Moscow, 2018. V. 2, pp. 34—41.

6. Rogov M. A. *Stratigraphy of the Lower Volga sediments of the Russian Plate*. Stratigraphy. Geological correlation. 2002, V. 10, No. 4, pp. 35—51.

7. Rogov M. A., Baraboshkin E. Yu., Guzhikov A. Yu., Efimov V. M. *The Jurassic-Cretaceous boundary in the Middle Volga region*. Field guide to the «International meeting on the Jurassic/Cretaceous boundary». 2015, Samara, Samara STU Publ., 130 p.

8. Bockwinkel J., Becker R. T., Ebbighausen V. *Late Givetian ammonoids from Hassi Nebech (Tafilalt Basin, Anti-Atlas, Southern Morocco)*. Fossil Record, 2013. V. 01.16 (1) 2013, pp. 5—65.

9. Mychluk K. *Update on ammolite production from Southern Alberta, Canada*. Gems & Gemology. 2009, V. 45, No 3, pp. 192—196.

10. Walaszczyk I., Kennedy W. J., Dembicz K., Gale A. S., Praszlier T., Rasoamiaramanana A. H., Randrianaly H. *Ammonite and inoceramid biostratigraphy and biogeography of the Cenomanian through basal Middle Campanian (Upper Cretaceous) of the Morondava Basin, western Madagascar*. Journal of African Earth Sciences, 2014. V. 89, pp. 79—132.

УДК 553.9:552.08 DOI: 10.19110/2221-1381-2019-2-29-35

ПЕТРОХИМИЧЕСКИЕ И ПЕТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТРУКТУРНЫХ РАЗНОВИДНОСТЕЙ МАКСОВИТОВ ЗАЖОГИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

А. В. Первунина, О. В. Мясникова
Институт геологии Карельского научного центра РАН, Петрозаводск
aelita@krc.karelia.ru, okmyasn@krc.karelia.ru

Предметом исследования являются уникальные полезные ископаемые — шунгитсодержащие породы. Актуальность исследования петрофизических параметров пород на разрабатываемых месторождениях обусловлена меняющимися требованиями к свойствам материалов в зависимости от сферы применения. Приведены результаты исследования максовитов — сапробитумолитовых пород ($C_{св}$ 35—45 %) Максовской залежи Зажогинского месторождения северо-восточной части Фенноскандинавского щита (Карелия). Объект исследования приурочен к заонежской свите людиковийского надгоризонта нижнего протерозоя. На месторождении выявлены силлы габбро-долеритов, которые способствовали проявлению контактовых преобразований в максовитах, влияющих на состав и свойства пород. Исследование петрофизических параметров, применение оптической и электронной микроскопии, а также методов химического (силикатного) анализа и рентгенофлуоресцентной спектрометрии позволили авторам оценить качественные характеристики различных структурных разновидностей максовитов как нерудного полезного ископаемого для строительной индустрии.

Ключевые слова: *сапробитумолиты, шунгитовое вещество, максовиты, экзоконтактная зона, плотность, водопоглощение, пористость, прочность.*

PETROCHEMICAL AND PETROPHYSICAL PROPERTIES OF HIGH-CARBON ROCKS FROM THE ZAZHOGINO DEPOSIT

A. V. Pervunina, O. V. Myasnikova
Institute of Geology, Karelian Research Centre, RAS, Petrozavodsk

The goal of the project was to study shungite-bearing rocks — unique commercial minerals. We need better understanding of the petrophysical parameters of the rocks at mined deposits to meet the changing requirements for the properties of the materials, depending on their application. The results of the study of maksovites, saprobitumolitic rocks (carbon free 35—45 %) from the Maksovo body of the Zazhogino deposit located in the northeastern Fennoscandian Shield, Karelia, were reported. The object of study is confined to the Trans-Onega suite of the Ludicovian superhorizon of the Lower Proterozoic unit. Gabbro-dolerite sills, which contributed to the contact alteration of the maksovites that affected the composition and properties of the rocks at the deposit, were identified. To assess the qualitative characteristics of the structural varieties of maksovite as a non-metalliferous commercial mineral for the building industry, their petrophysical parameters were studied using optical and electron microscopy, chemical (silicate) analysis and X-ray fluorescent spectrometry.

Keywords: *saprobitumolites, shungite matter, maksovites, exocontact zone, density, water absorption, porosity, strength.*

Введение

Шунгитсодержащие породы Карелии являются уникальным полезным ископаемым, интерес к которому не ослабевает сотни лет. Нерешенная проблема генезиса шунгитового вещества (ШВ), а также меняющиеся требования к свойствам материалов в зависимости от сферы применения и совершенствование методов исследования открывают новые возможности использования шунгитсодержащих пород. Комплексы шунгитсодержащих пород развиты преимущественно в пределах Онежской палеопротерозойской структуры в составе людиковийского (1920—2100 млн лет) и калевийского (1800—1920 млн лет) надгоризонтов [4]. Первые находки «углистых» и «графитовых» черных пород Олонецкого края в районе п. Шуньга Заонежского полуострова известны с начала XVIII века. А. А. Иностранцев первым определил понятие «шунгитовое вещество» — органическое вещество, входящее в состав горных пород, «крайний член в ряду аморфного углерода» [3]. Дальнейшие генетические исследования шунгитсодержащих пород позволили определить ШВ как протерозойское сапропелитовое и миграционное органическое вещество, находящееся на метаантрацитовой стадии углефикации (метаморфизма) и являющееся минералоидом [1]. В работе используется классификация шунгитоносных пород М. М. Филиппова [5].

Объектом исследования послужили максовиты — сапробитумолитовые породы Максовской залежи Зажогинского месторождения. Характерной особенностью геологического строения месторождения являются невыдержанные по мощности силлы габбро-долеритов в центральной и западной частях залежи. Предыдущими исследователями изучались структура и вещественный состав максовитов [7, 10], однако физические свойства контактовой зоны силла, а также термальное воздействие на изменение петрофизических свойств высокоуглеродистых пород не исследовались. Особый интерес вызывает определение петрофизических свойств пород из зоны верхнего экзоконтакта субпластовой части силла, сравнение свойств различных структурных разновидностей пород залежи и определение путей их возможного применения.

Методы исследования

Изучение петрохимического состава образцов шунгитсодержащих пород Максовской залежи проведено с применением метода химического (силикатного) анализа и рентгенофлуоресцентной спектроме-

трии (волновой рентгенофлуоресцентный спектрометр последовательного анализа ARL ADVANT"X). Структурно-текстурные особенности разновидностей пород месторождения исследовались с применением оптической и электронной микроскопии. Электронно-микроскопическое исследование проведено с использованием системы рентгеновского энергодисперсионного микроанализа Oxford INCA Energy350, интегрированного с электронным микроскопом VEGA II LSH. Определение петрофизических параметров (плотность, пористость, водопоглощение, прочность) пород выполнено на образцах правильной кубической формы с применением методов гидростатического взвешивания, определения прочности при одноосном сжатии (машина для испытаний на сжатие МС-1000). Исследования выполнены в Центре коллективного пользования КарНЦ РАН и в отделе минерального сырья ИГ КарНЦ РАН.

Фактический материал и обсуждение

Зажогинское месторождение имеет две залежи в пределах Толвуйской структуры: Зажогинскую (запасы 4.0 млн т) и Максовскую (30.2 млн т) [1]. Основными палеопротерозойскими высокоуглеродистыми породами являются кремнезем в виде кварца и свободный углерод в форме шунгита [8].

Максовская залежь локализована в северо-восточной части Онежской структуры юго-восточной части Фенноскандинавского щита. Приурочена к шестому горизонту шунгитсодержащих пород заонежской свиты людиковийского надгоризонта нижнего протерозоя. Месторождение представляет собой антиклинальную складку, сформировавшуюся по высокоуглеродистым породам — максовитам ($C_{св}$ 35—45 %). (рис. 1). Складка вытянута в северо-западном направлении, частично срезана эрозией. Северо-западное и юго-западное крылья структуры обрамляют силл, внедрившийся между шестым и седьмым горизонтами шунгитсодержащих пород. В северо-западной части месторождения развиты карбонат-слюдистые метасоматиты по максовитам.

Тело Максовской залежи сложено слоистыми, массивными и брекчированными разновидностями максовитов, иногда с миндалевидными зональными выделениями, заполненными кварцем и антраксолитом. В плане залежь имеет эллипсоидальную форму с размерами 500 × 700 м, с максимальной мощностью 120 м. Слоистые разновидности встречаются в подошвенной части и на участках выклинивания тела. В центральной части антиклинальной складки развиты массивные разновидности максовитов. Это плотные породы от темно-серого до черного цвета, с раковистым изломом представляют собой природный композит, содержащий равномерное распределение высокодисперсных кристаллических силикатных частиц в аморфной углеродной матрице. В составе пород — шунгитовый углерод, серицит, кварц, в подчиненном количестве встречаются калиевый полевой шпат, хлорит и тонкая вкрапленность сульфидов, чаще пирита (рис. 2, a, b). На уровне эрозионного среза преобладают брекчированные разновидности максовитов, которые составляют около 54 % объема залежи. Степень брекчированности увеличивается к верхним и периферийным частям залежи. Породы сложены преимущественно кварц-шунгитовыми брекчиями, по минеральному составу аналогичными массивным максовитам. Угловатые обломки представлены массивными и трещиноватыми максовитами. Местами наблюдается окварцевание цемента, выраженное развитием агрегатов кварц-шунгитового состава, также встречаются антраксолит и шлировые вкрапления пирита. Вокруг некоторых обломков развиты ореолы рассеянного ШВ (рис. 2, c, d). Границы между массивными и брекчированными породами достаточно четкие.

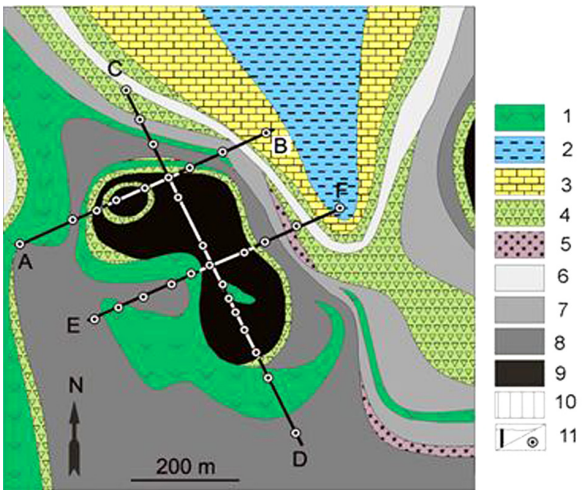


Рис. 1. Геологическая карта Максовской залежи шунгитсодержащих пород (максовитов) (составлена М. М. Филипповым) [6, 9]:
1 — силлы и дайки габбро-долеритов; 2 — алевроиты; 3 — карбонатные породы; 4 — базальтовые туфы; 5 — кремнистые породы; 6—10 — горизонты шунгитсодержащих пород: 6 — IX горизонт, лидиты, $C_{св}$<10%; 7 — VIII горизонт, слоистые шунгитсодержащие породы, содержание свободного углерода колеблется от 10 до 35 %; 8 — VII горизонт, слоистые, массивные, брекчированные шунгитсодержащие породы, содержание свободного углерода колеблется от 10 до 35 %; 9 — VI горизонт (продуктивный), слоистые, массивные, брекчированные шунгитсодержащие породы, $C_{св}$ > 35 %; 10 — V горизонт, алевролитовые и карбонатные шунгитсодержащие туфы; 11 — буровые скважины

Fig.1. Geological map of the Maksovo shungite-bearing rock (maksovite) deposit (compiled by M. M. Filippov) [6, 9]
1 — gabbro-dolerite sills and dykes; 2 — siltstones; 3 — carbonate rocks; 4 — basalt tuffs; 5 — cherty rocks; 6—10 — shungite-bearing rock horizons; 11 — boreholes

В области внедрения габбро-долеритов в максовитах развиты приконтактовые изменения, обусловленные длительно функционирующими источниками тепла интрузивных тел [2].

Исследование экзоконтакта in suti позволило установить зону коксования максовитов мощностью до 2.5 м, состоящую из двух частей (рис. 3). В пределах одной, непосредственно примыкающей к экзоконтакту, присутствуют рыхлые породы с кавернозной текстурой, местами рассланцованные, по зеркалам скольжения развиты пленки ШВ. Иногда здесь присутствуют фрагменты максовитов с призматической («карандашной») отдельностью (размер призм 1 × 3 см), ориентированной перпендикулярно контак-

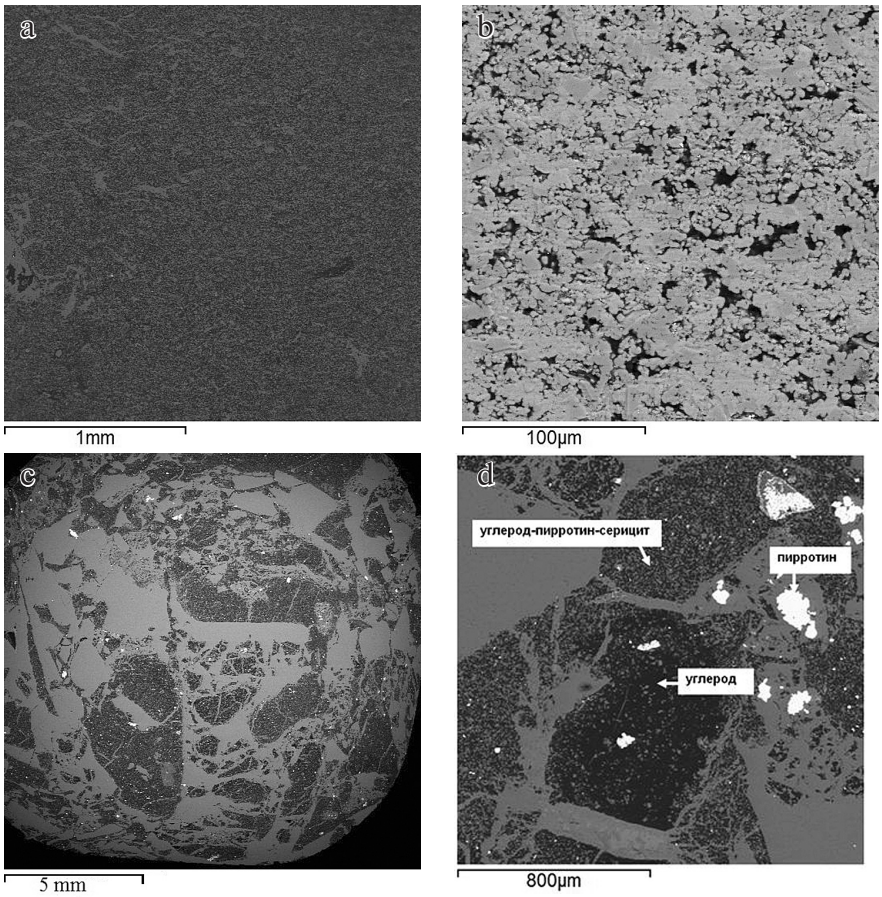


Рис. 2. Разновидности высокоуглеродистых пород Максовской залежи: a — максовит с массивной текстурой, b — кварц-углерод-серицитовая основная масса максовита с массивной текстурой; c — максовит с брекчиевой текстурой, d — фрагмент брекчиевой текстуры максовита. Обломки сложены массивными максовитами, в составе которых иногда присутствуют серицит и пирит. В цементе — агрегаты кварц-шунгитового состава, встречаются антраксолит и шлировые вкрапления пирита

Fig. 2. High-carbon rock varieties from the Maksovo body: a — massive-textured maksovite, b — quartz-carbon-sericite matrix of massive-textured maksovite; c — brecciated-textured maksovite, d — fragment of the brecciated texture of maksovite. The fragments consist of massive maksovite that occasionally contains sericite and pyrite. The matrix comprises aggregates of quartz-shungite composition; anthraxolite and schlieren pyrite dissemination occur

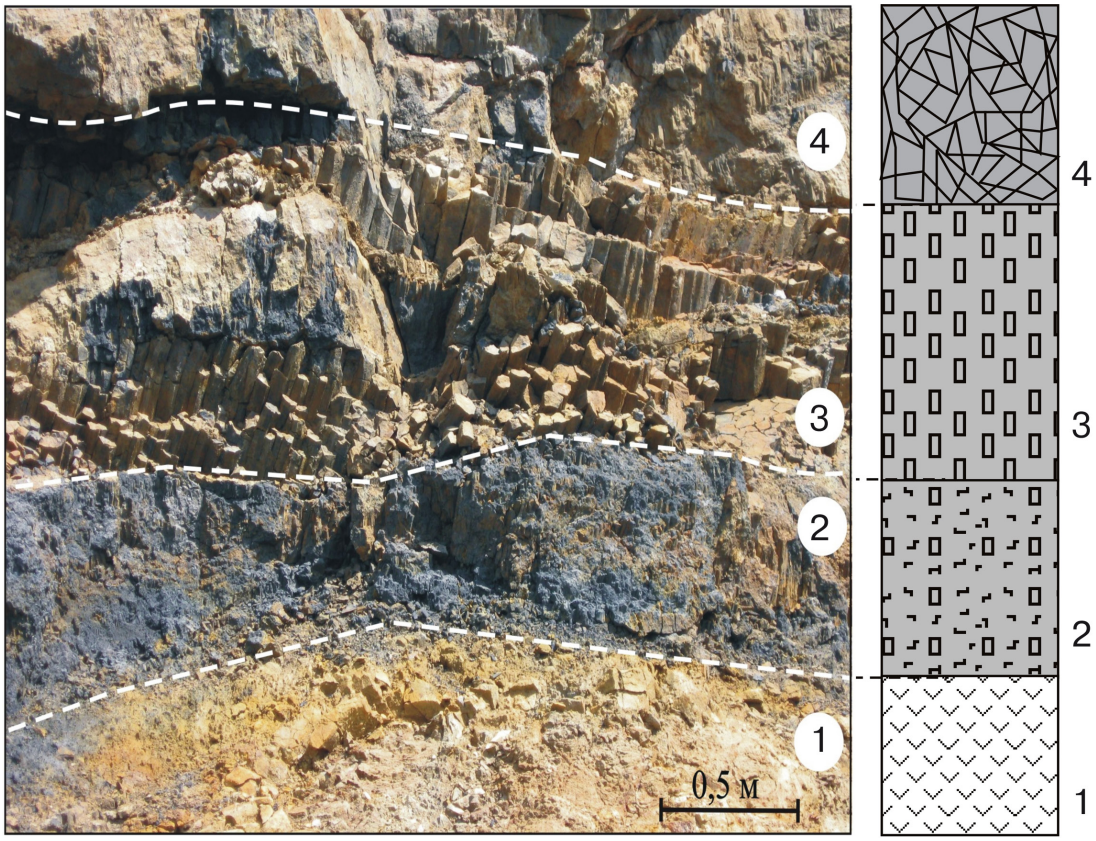


Рис. 3. Зона контакта субпластового тела габбро-долеритов с сапропелитами:
1 — силл габбро-долеритов; 2 — рыхлый, кавернозный максовит с реликтами призматической отдельности; 3 — максовит со столбчатой отдельностью; 4 — неравномерно брекчированный максовит со слабо проявленной отдельностью

Fig. 3. Contact zone between a subsheeted gabbro-dolerite body and sapropelites:
1 — gabbro-dolerite sill; 2 — unconsolidated cavernous maksovite with relics of prismatic jointing; 3 — maksovite with columnar jointing; 4 — non-uniformly brecciated maksovite with poorly-defined jointing

ту. Выше интервала рыхлых и мелкопризматических разновидностей зоны экзоконтакта максовиты имеют характерную столбчатую отдельность в виде удлиненных призм 10—15 см, иногда до 20 см, с поперечным сечением 0.5—4 см, также ориентированных перпендикулярно контакту. Местами встречаются мелкие призмы, которые иногда смяты, собраны в сноповидные агрегаты или хаотично ориентированы относительно линии контакта.

Структурно-текстурные особенности и состав максовитов из зоны верхнего экзоконтакта субпластовой части силла широко варьируют. Микрозондовые исследования пород выявили: максовиты состоят из свободного углерода в форме шунгита (до 50 %), кварца и серицита (до 25 %), присутствуют биотит, хлориты, пирит, рутил, фторапатит, иногда калиевый полевой шпат. Максовиты с крупнопризматической отдельностью имеют колломорфную и флюидальную структуры (рис. 4, a и b).

Максовиты с призматической отдельностью имеют сильно развитую систему микропор. Содержание свободного углерода в них снижается до 10 %, увеличивается содержание кварца и серицита, наблюдаются кварц-серицитовые прожилки с рудной минерализацией (рис. 5, a, b).

Основными составляющими шунгитсодержащих пород месторождения являются свободный углерод и кремнезем. В массивных и брекчированных породах сумма $C_{св}$ и SiO_2 обычно близка к 85 %; Al_2O_3 — 3.5—5 % (серицит); Fe_2O_3 — 1.40—2.70 % (хлорит); S — 1.4—2.3 % (пирит); по 1—2 % на K_2O, CaO, MgO и 1—2 % — на прочие элементы. Анализ петрохимического состава различных текстурных разновидностей пород месторождения (табл. 1) показал следующие особенности: в брекчированных породах по сравнению с массивными уменьшается содержание железа и летучих компонентов C, P (P_2O_5), при этом увеличивается содержание SiO_2. В экзоконтактовой зоне возрастает содержание Al_2O_3, MgO и летучих компонентов, снижается содержание SiO_2 по сравнению с массивными разновидностями максовитов.

Анализ петрофизических свойств исследованных разновидностей максовитов позволяет характеризовать их как прочные породы (табл. 2).

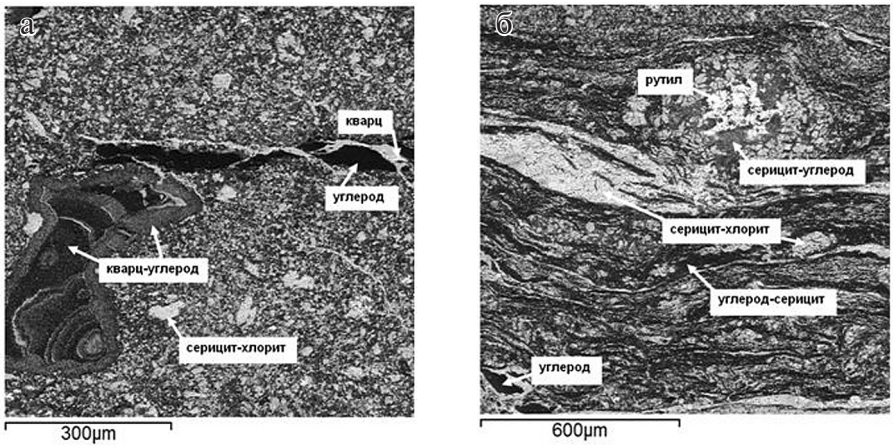


Рис. 4. Максовит с крупнопризматической отдельностью из зоны экзоконтакта: a — фрагмент колломорфной структуры кварц-шунгитового состава. Основная масса сложена кварц-углеродными и серицит-хлоритовыми агрегатами; b — фрагмент флюидальной структуры

Fig. 4. Maksovite with macroprismatic jointing from the exocontact zone: a — colloform structure fragment of quartz-shungite composition. The matrix consists of quartz-carbon and sericite-chlorite aggregates; b — fragment of fluidal structure

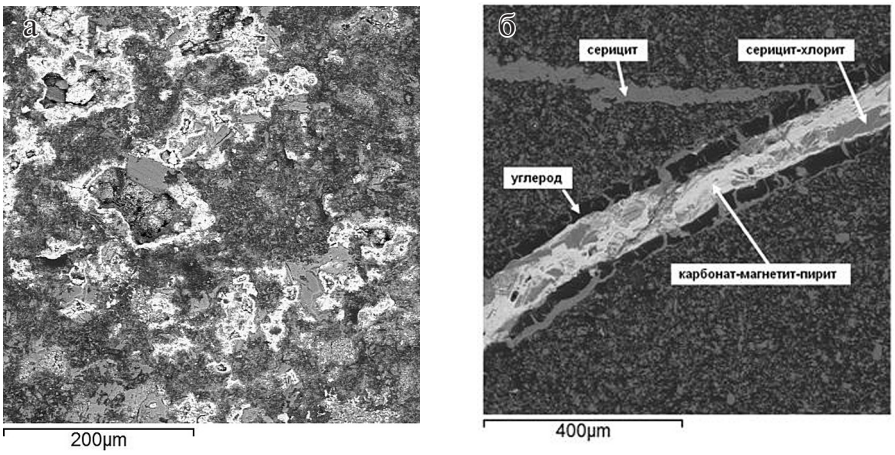


Рис. 5. Максовит с мелкопризматической отдельностью из зоны экзоконтакта: a — фрагмент пористой структуры; b — кварц-серицитовые прожилки с рудной минерализацией

Fig. 5. Maksovite with microprismatic jointing from the exocontact zone: a — fragment of porous structure; b — quartz-sericite streaks with ore mineralization

Таблица 1. **Химический состав (мас.%) максовитов Максовской залежи**

Table 1. **Chemical composition (мас.%) of maksovites from the Maksovo body**

Окислы Oxides	Массивные породы Massive rocks	Брекчированные породы Brecciated rocks	Мелкопризматическая отдельность экзоконтактовой зоны Small-prismatic jointing of exocontact zone	Крупнопризматическая отдельность экзоконтактовой зоны Large-prismatic jointing of exocontact zone
SiO_2	54.70	59.80	39.38	44.50
TiO_2	0.25	0.12	0.31	0.23
Al_2O_3	3.50	5.10	5.03	5.90
Fe_2O_3	2.72	1.42	0.85	3.88
FeO	1.25	0.70	0.71	1.07
MnO	0.008	0.008	0.008	0.026
MgO	0.60	0.34	1.24	1.30
CaO	0.21	0.24	0.21	0.24
Na_2O	0.06	0.08	0.07	0.13
K_2O	0.74	0.95	1.11	0.98
H_2O	0.18	0.05	0.29	0.58
п. п. п.	35.40	30.70	50.25	40.80
P_2O_5	0.19	0.12	0.30	0.20
Cr_2O_3	0.012	0.010	<0.01	<0.01
V_2O_5	0.041	0.054	0.054	0.050
SO_3	0.027	0.27	0.17	0.09
Сумма Total	99.88	99.96	99.98	99.97
Sв	2.32	1.46	0.38	0.11

Таблица 2. **Петрофизические свойства максовитов Максовской залежи**

Table 2. **Petrophysical properties of maksovites from the Maksovo body**

Значение Value	Массивные породы Massive rocks	Брекчированные породы Brecciated rocks	Мелкопризматическая отдельность экзоконтактовой зоны Small-prismatic jointing of exocontact zone	Крупнопризматическая отдельность экзоконтактовой зоны Large-prismatic jointing of exocontact zone
Плотность, г/см^3 Density, g/cm^3	2.30—2.36 2.32	2.38—2.42 2.40	2.13—2.18 2.15	2.19—2.25 2.22
Плотность твердой фазы, г/см^3 Density of solid phase, g/cm^3	2.40	2.42	-	-
Водопоглощение, % Water absorption,%	0.54—0.67 0.63	0.24—0.32 0.28	1.05—1.23 1.17	0.25—0.56 0.43
Пористость эффективна, % Effective porosity, %	1.28—1.55 1.46	0.57—0.79 0.67	2.24—2.67 2.52	0.55—1.12 0.95
Общая пористость, % Total porosity,%	3.33	0.83	-	-
Предел прочности при одноосном сжатии в сухом состоянии, МПа Strength at uniaxial compression in a dry state, MPa	82—109 98	107—122 113	46—63 54	88—111 99

Брекчированные максовиты обладают более высокими значениями плотности и предела прочности при одноосном сжатии, невысокими значениями водопоглощения и общей пористости по сравнению с массивными максовитами. Очевидно, это связано с тем, что в брекчированных породах наблюдается интенсивное окварцевание цемента, вследствие чего порода становится более монолитной. Порода, сложенная преимущественно кварцем, имеет более плотную структуру, в ней меньше микротрещин, каверн и других структурных нарушений, следовательно, значение показателя пористости будет ниже.

Массивные максовиты имеют более высокие показатели водопоглощения (в 2,3 раза выше, чем у брекчированной разновидности) и общей пористости (в 4 раза больше, чем у пород с брекчиевой текстурой), что свидетельствует о внутренних неоднородностях структуры (поры, микротрещины, каверны) и снижает значение показателя прочности.

В экзоконтактовой зоне наблюдается снижение плотности пород за счет наличия пустот и пор, не заполненных минеральным веществом по сравнению с массивными и брекчированными разностями. При этом породы экзоконтактовой зоны с крупнопризматической отдельностью характеризуются более плотной структурой и высокими значениями предела прочности при одноосном сжатии по сравнению с породами мелкопризматической отдельности. В крупных призмах отдельности выявлена анизотропия прочности (коэффициент анизотропии 46 %), обусловленная структурной неоднородностью.

Выводы

Высокотемпературный расплав интрузии габбродолеритов при внедрении в слаболитифицированные породы с органическим веществом (протомаксовиты) способствовал формированию экзо- и эндоконтактовых изменений. Прогрев горизонтов пород, не достигших к тому времени катагенетической стадии седиментогенеза, в результате глубокого преобразования органического вещества способствовал возникновению зоны приконтактовых изменений. Минералого-петрофизические исследования показали, что свойства максовитов из зоны верхнего экзоконтакта меняются по площади месторождения. Гелифицированные компоненты органического вещества в составе протомаксовитов при нагревании образовывали пористый природный кокс. Характерными особенностями природного кокса являются флюидальная микротекстура, высокая пористость, а также столбчатая полигональная отдельность в виде удлиненных шестигранных призм, ориентированных перпендикулярно контакту с интрузией. По мере удаления от контакта коксы сменяются максовитами, в которых признаки термального воздействия обнаруживаются только на микроскопическом уровне.

Признаками слабой литификации являются массивная текстура, отсутствие слоистости, практически полное отсутствие в породе кристаллических форм минеральных зерен. Наиболее литифицированные породы подверглись механическому воздействию внедряющейся интрузии в большей степени, и в результате хрупких деформаций возникли брекчированные максовиты.

Таким образом, механическое воздействие, а также термальные условия, возникшие в результате внедрения интрузии габбро-долеритов в разной степени литифицированные породы Максовского месторождения, способствовали изменению структурно-текстурных свойств и петрофизических характеристик максовитов.

Основными критериями качества высокоуглеродистых пород, определяющих их использование в различных отраслях промышленности, медицины, сельского и коммунального хозяйства, являются содержание и структура свободного (шунгитового) углерода и текстурные особенности породы.

Проведенные исследования показали, что максовиты экзоконтактовой зоны по прочностным свойствам близки к брекчированным разновидностям, однако отличаются более высокой пористостью. Поэтому целесообразна разработка их для производства щебня, применяемого на объектах с меньшей нагрузкой, то есть для дорог общего пользования, а также в качестве декоративного щебня в ландшафтных работах.

Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (№АААА-А18-118020690238-0, №АААА-А18-118020290175-2).

Литература

1. *Атлас* текстур и структур шунгитоносных пород Онежского синклинория / Ред. М. М. Филиппов, В. А. Мележик. Петрозаводск: Скандинавия, 2006. 80 с.

2. *Иванов Ю. А., Мясникова И. П.* Новые аспекты перспектив нефтегазоносности северных районов Сибирской платформы // Геология нефти и газа. 2000. № 3. URL: http://www.geolib.ru/OilGasGeo/2000/03/Stat/stat04.html

3. *Иностранцев А. А.* Новый крайний член в ряду аморфного углерода // Горный журн. 1879. Т. 11. № 5—6. С. 314—342.

4. *Общая* стратиграфическая шкала нижнего докембрия России: Объяснительная записка. Россия, Апатиты: Кольский научный центр РАН, 2002. 13 с.

5. *Органическое* вещество шунгитоносных пород Карелии (генезис, эволюция, методы изучения) / Отв. ред. М. М. Филиппов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1994. 207 с.

6. *Филиппов М. М.* Шунгитоносные породы Онежской структуры. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2002. 282 с.

7. *Филиппов М. М., Первунина А. В.* Литогенетическое состояние сапропелитов при формировании купольных месторождений Онежской структуры // Глубинная нефть. 2014. Т. 2. № 3. С. 461—476.

8. *Kovalevski V. V., Buseck, P. R., Cowley J. M.* Comparison of carbon in shungite rocks to other natural carbons: An X-ray and TEM study // Carbon. V. 39, Issue 2. 2001. pp. 243—256.

9. *Melezhik V. A., Fallick A. E., Filippov M. M., Larsen O.* Karelian shungite — an indication of 2.0-Ga-old metamorphosed oil-shale and generation of petroleum: geology, lithology and geochemistry // Earth-Science Reviews. 1999. Vol.47. P. 1—240.

10. *Reading* the Archive of Earth's Oxygenation. Series: Frontiers in Earth Sciences (Eds): Victor A. Melezhik, Anthony R. Prave, Eero J. Hanski, Anthony E. Fallick, Aivo Lepland, Lee R. Kump, Harald Strauss. Springer Berlin Heidelberg. V. 2. 2013, XXI, 1046 p.

References

1. *Atlas tekstur i struktur shungitonosnyh porod Onezhskogo sinklinoriya* (Atlas of the textures and structures of shungite-bearing rocks from the Onega synclinorium). Eds. M. M. Filippov, V. A. Melezhik. Petrozavodsk: Skandinaviya, 2006, p. 80.

2. Ivanov Yu. A., Myasnikova I. P. *Novye aspekty perspektiv neftegazonosnosti severnyh rajonov Sibirskoj platformy* (Assessment of the oil and gas potential of the northern areas of the Siberian Platform: new aspects). Geologiya nefti i gaza, 2000, No. 3, URL: http://www.geolib.ru/OilGasGeo/2000/03/Stat/stat04.html

3. Inostrancev A. A. *Novyj krajnij chlen v ryadu amorfnogo ugleroda* (A new marginal member in the amorphous carbon series). Gornyj zhurnal, 1879, V. 11, No. 5—6, pp. 314—342.

4. *Obshchaya stratigraficheskaya shkala nizhnego dokembriya Rossii. Ob"yasnitel'naya zapiska* (General Lower Precambrian stratigraphic scale of Russia. Explanatory note). Apatity: Kola Science centre RAS, 2002, p. 13.

5. *Organicheskoe veshchestvo shungitonosnyh porod Karelii (genezis, ehvolyuciya, metody izucheniya)* (Organic matter of Karelia's shungite-bearing rocks: genesis, evolution and research methods). Ed. M. M. Filippov. Petrozavodsk: Karelian Science Center RAS, 1994, p. 207.

6. Filippov M. M. *Shungitonosnye porody Onezhskoj struktury* (Shungite rocks of the Onega Structure). Petrozavodsk: Karelian Science centre RAS, 2002, p. 282.

7. Filippov M. M., Pervunina A. V. *Litogeneticheskoe sostoyanie sapropelitov pri formirovanii kupol'nyh mestorozhdenij Onezhskoj struktury* (Lithogenetic state of sapropelites upon the formation of domal deposits in the Onega Structure). Glubinnaya neft, V.2, No.3, 2014, pp. 461—476.

8. Kovalevski V. V., Buseck, P. R., Cowley J. M. Comparison of carbon in shungite rocks to other natural carbons: An X-ray and TEM study. Carbon, V. 39, Issue 2, 2001, pp. 243—256.

9. Melezhik V. A., Fallick A. E., Filippov M. M., Larsen O. Karelian shungite — an indication of 2.0-Ga-old metamorphosed oil-shale and generation of petroleum: geology, lithology and geochemistry. Earth-Science Reviews, 1999, V.47, pp. 1—40.

10. Reading the Archive of Earth's Oxygenation. Series: Frontiers in Earth Sciences (Eds): Victor A. Melezhik, Anthony R. Prave, Eero J. Hanski, Anthony E. Fallick, Aivo Lepland, Lee R. Kump, Harald Strauss. Springer Berlin Heidelberg, V. 2, 2013, XXI, 1046 p.

УДК 504.055 DOI: 10.19110/2221-1381-2019-2-36-43

ИЗМЕНЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ УРБАНИЗИРОВАННОЙ ТЕРРИТОРИИ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЕХНОГЕННОГО ГЕОФИЗИЧЕСКОГО ПОЛЯ Г. СЫКТЫВКАРА

А. Н. Вихоть
Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар
vikhot.anna@mail.ru

В основе проведенного исследования лежат данные вибросейсмической съемки на урбанизированной территории Сыктывкара. Определены участки пересечения зон сверхнормативных значений виброскорости и виброускорения. В пределах таких зон велика вероятность последствий вибрационного воздействия в виде осадок фундамента зданий в слабых и плотных грунтах до 2 мм/год. Зарегистрированы максимальные среднеквадратичные значения виброускорения: по компоненте x — 0.254 м/с^2, y — 0.207 м/с^2, z — 0.622 м/с^2 — и виброскорости: по компоненте x — 1.195×10^{-3} м/с, y — 7.54×10^{-3} м/с, z — 1.318×10^{-3} м/с. Указанные значения неоднократно выше нормативных. На схемах перемещения выделено 3 участка с высоким градиентом затухания колебаний. В результате внесены дополнения в схему сейсмического микрорайонирования г. Сыктывкара с точки зрения геоэкологических условий города по части вибросейсмической нагрузки на грунты — основания зданий. Эти условия создают дополнительное приращение к амплитуде возможных землетрясений. Сделано заключение о трансформации экологического состояния геологической среды в отмеченных зонах в условиях плотной городской застройки.

Ключевые слова: *вибрационное поле, вибросейсмическая съемка, геологическая среда, геоэкологические условия, урбанизированные территории.*

CHANGES OF THE ECOLOGICAL STATE OF THE GEOLOGICAL ENVIRONMENT OF THE URBANIZED TERRITORY FROM THE INFLUENCE OF THE TECHNOGENIC GEOPHYSICAL FIELD OF SYKTYVKAR

A. N. Vikhot
Institute of Geology Komi SC UB RAS, Syktyvkar

The study is based on the data of vibroseis survey in the urbanized area of Syktyvkar. Areas of above-norm velocity and acceleration vibration values zones intersection were determined. The vibrational impact consequences probability is high in the form of building base settlement up to 2 mm / year in weak and dense soils within such areas. The vibration acceleration maximum rms-root mean square values were recorded: for the component x — 0.254 m/s^2, y — 0.207 m/s^2, z — 0.622 m/s^2; and vibration speed: for the component x — 1.195×10^{-3} m/s, y — 7.54×10^{-3} m/s, z — 1.318×10^{-3} m/s. These values are repeatedly higher than the normative ones. 3 areas with a high vibration damping gradient were contoured on the displacement schemes. As a result, additions were itemized to the Syktyvkar seismic microzoning map from the geoecological city conditions viewpoint in terms of vibroseis load on buildings foundation soils. These conditions create an additional increment to the amplitude of possible earthquakes. We made conclusion about the ecological geological environment state transformation in the contoured zones in restrained urban conditions.

Keywords: *vibroseis field, vibroseis survey, geological environment, geoecological conditions, urbanized area.*

Введение

Природные и техногенные геофизические поля тесно взаимодействуют друг с другом в геологической среде, в некоторой степени вызывая трансформацию геофизической экологической функции верхней части литосферы (первые десятки метров от земной поверхности). В условиях современной интенсивной урбанизации в части геоэкологических исследований особенное внимание заслуживает энергетически увеличивающееся вибрационное поле, которое формируется на территории городов. В данном случае источниками колебаний являются любые виды движущегося транспорта, машины и механизмы, строительная техника, промышленные предприятия и многие другие. Сила излучаемых ими вибраций аналогична землетрясениям 3—7 баллов на расстоянии в среднем до 25—40 м от источника колебаний [1]. Такое физическое загрязнение, осуществляющееся длительное время, может приводить к негативным изменениям в окружающей среде и, как следствие — к качественному изменению объектов техносферы, в частности инженерных сооружений с внешними проявлениями в виде трещин на стыках панельных плит и в кирпичной кладке вследствие перераспределения напряжения в узлах строительных конструкций. При продолжительном действии вибрационных нагрузок основная опасность для геологической среды, в частности для грунтов в основаниях фундаментов зданий, и самих строительных конструкций исходит на расстоянии от источника в ближней зоне (5—12 м) при распространении объемных волн, в дальней зоне (от 100 м) при преобладающем распространении поверхностных волн. Наша работа ориентирована на изучение уровня воздействия микросейсмического поля техногенного происхождения на геологическую среду и частично на инициирование преждевременных деформаций и осадков зданий на примере Сыктывкара. Также составленные в 2000 г. В. А. Лютоевым карты-схемы сейсмического микрорайонирования города [7] требуют некоторых дополнений с точки зрения изучения воздействия повышения амплитуд микросейсмических колебаний природно-техногенного происхождения на грунты-основания зданий. Район исследований выбран не случайно: около 70 % территории городской застройки находится в условиях по-

вышенной вибронагрузки [2] при урбанизированности 22.95 % и при росте численности населения около 1 тыс. человек в год. В плане сейсмического районирования город находится в семибалльной плейстосейстовой области Кировско-Кажимской сейсмогенной зоны [8]. Также здесь немаловажным фактором является увеличивающаяся нагрузка на грунты вследствие сноса малоэтажных аварийных домов и строительства на освобожденных территориях зданий повышенной этажности. В таком случае изменяются не только физико-механические и несущие свойства грунтов, но и геологическая среда, которая выступает носителем избыточной энергии колебаний, в результате чего претерпевает качественные изменения в неблагоприятную сторону.

Геологические и геоэкологические условия района исследований

В пределах района исследований строение верхней части геологического разреза представлено осадочными породами мезозойской группы: нижнего триаса, средней-верхней юры и четвертичными отложениями, которые представлены неоплейстоценовыми и голоценовыми осадками. В основании разреза залегают отложения чирвинского (Q_{II}^{1}č) и помусовского (Q_{I}^{6}pm) межледниковья [14]. Далее прослеживаются два ледниковых горизонта: вычегодский (Q_{II}^{4}vč) и печорский (Q_{II}^{2}pč) и разделяющий их межледниковый родионовский (Q_{II}^{3}r). Верхняя часть неоплейстоцена сложена аллювиальными и озерно-аллювиальными отложениями II и III надпойменных террас рек Вычегды и Сысолы. Голоцен представлен пойменными аллювиальными осадками, отложениями I надпойменной террасы рек, долин мелких водотоков и болот (рис. 1). Мощность отложений до 60—87 м [13].

По гидрогеологическому районированию территория исследований расположена в пределах Камско-Вятского бассейна подземных вод [10]. Основные водоносные горизонты: локально-водоупорный печорский горизонт (lgIIpč), локально-водоносный печорский горизонт (gIIpč), водоносный чирвинский горизонт (aIIč, laIIč), водоносный средненеоплейстоценовый-голоценовый горизонт (aIII—IV) (рис. 1). Постоянные горизонты грунтовых вод приурочены к русловым аллювиальным и ледниковым отложениям. К флювиогляциальным отложениям водоразделов и аллювиальным отложениям террас привязаны сезонно-водоносные горизонты.

В целом экологическая обстановка в Сыктывкаре оценивается как удовлетворительная [12]. Основным источником техногенного загрязнения геологической среды является промышленно-селитебная агломерация города. Что касается микросейсмических наблюдений, то фоновые значения амплитуд колебаний, зарегистрированных в ночное время, для города не опасны и составляют для горизонтальных компонент 2×10^{-9} м, для вертикальной — 10^{-9} м [7]. В пределах селитебной зоны точечно эти показатели могут меняться в десятки раз в сторону увеличения, например вблизи крупного предприятия «Монди Сыктывкарский лесопромышленный комплекс» [3]. Региональные землетрясения в пределах

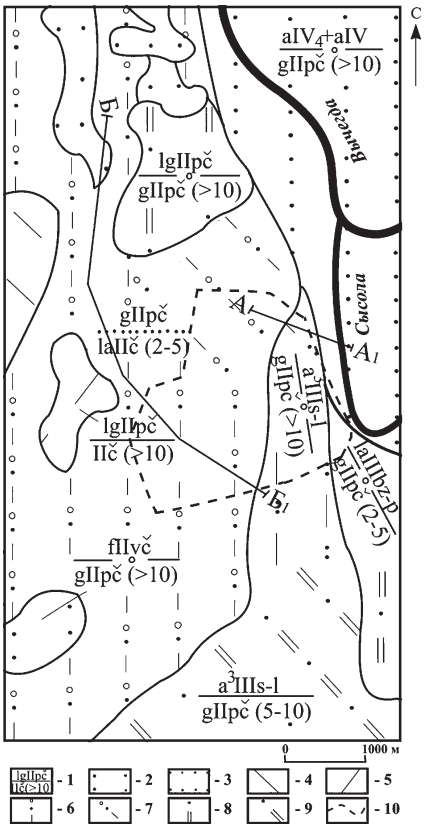


Рис. 1. Схема инженерно-геологических условий района г. Сыктывкара [13]:

1 — числитель — геологический индекс первого от поверхности стратиграфо-генетического комплекса, знаменатель — индекс второго комплекса, его мощность (м), знак дроби — литологический состав второго комплекса:

····· — пески, – ∘ – — суглинки валунные, —— — глины;

глубина залегания грунтовых вод: состав и мощность (м) отложений первых от поверхности стратиграфо-генетических комплексов: 2 — пески, >10; 3 — пески, <10; 4 — суглинки, >5; 5 — суглинки, <5; 6 — суглинки валунные, >10; 7 — суглинки валунные, <10; 8 — суглинки с прослоями и линзами песков и супесей, >10; 9 — суглинки с прослоями и линзами песков и супесей, 5—10; 10 — территория вибросейсмической съемки

Fig. 1. Scheme of engineering-geological conditions of the Syktyvkar area [13]:

1 — numerator — a geological index of the first genetic stratigraphic sequence from a surface, denominatior — an index of the second sequence, its thickness (m), fraction bar — a lithological composition of the second sequence:

····· — sands; – ∘ – — boulder loams; —— — clays;

groundwater depth: sediments composition and thickness of (m) of first genetic stratigraphic sequences from a surface: 2 — sands, >10; 3 — sands, <10; 4 — loams, >5; 5 — loams, <5; 6 — boulder loams, >10; 7 — boulder loams, <10; 8 — loams with bands and lans of sands and sandy loams, >10; 9 — loams with bands and lans of sands and sandy loams, 5—10; 10 — vibroseis survey area

эпицентрального расстояния регистрируются эпизодически [11]:

— Ракпасское землетрясение, 17 сентября 2004 г., Княжпогостский район Республики Коми, к северу от Сыктывкара на 103—123 км: пгт. Емва, пос. Ракпас, пос. Тракт; интенсивность — 5.5 баллов, магнитуда — 3.9;

— Койгородское землетрясение, 22 сентября 2008 г., с. Койгородок Республики Коми к югу от Сыктывкара на 137 км, и Сыктывдинский район, также к югу до 50 км; магнитуда — 3.3;

— 19 января 2011 г., Корткеросский район Республики Коми, к северо-востоку от Сыктывкара на 20 км; магнитуда — 2.6;

— Первомайское землетрясение, 25 апреля 2011 г., Койгородский район Республики Коми, к югу от Сыктывкара, точное расстояние неизвестно; магнитуда — 2.3.

Техногенные землетрясения на территории Сыктывкара не были зарегистрированы более 50 лет. В 1968 г. в долине р. Сысолы, примыкающей к городской черте, сошел большой оползень блокового типа с объемом грунта 100 тыс. м^3. Сила сотрясения была аналогичной землетрясению магнитудой 1.7 [16].

Методы исследований и аппаратурное обеспечение

В системе наблюдений «грунт — сооружение» при регистрации вибродинамической нагрузки является достаточной регистрация амплитуды перемещения и/или ее производных — амплитуд виброскорости или виброускорения. Возможность использования сейсмометрических методов для оценки уровня вибрационных воздействий на грунты — основания зданий объясняется наличием связи между их сейсмическими параметрами и инженерно-геологическими свойствами [9]. Но не стоит упускать из внимания тот факт, что в региональных геологических и климатических условиях проявление усталостных повреждений зданий может быть связано с суффозией, вспучиванием грунта при отрицательных температурах воздуха и другими явлениями.

В зарубежной и отечественной литературе, строительных нормах и правилах основными параметрами допускаемой величины вибрации являются пиковое и среднеквадратичное значения виброскорости. При значениях виброускорения колебаний ≥ 0.03 м/с^2 [6, 17] и виброскорости $\geq 0.31 \times 10^{-3}$ м/с [15] считается, что окружающая среда находится в зоне экологического риска в условиях повышенных вибрационных нагрузок. При вибрациях со значениями виброскорости $(0.4—1.2) \times 10^{-3}$ м/с уже происходят сверхнормативные осадки фундамента зданий, возникают повреждения в старых зданиях, а при значениях скорости $(5—8) \times 10^{-3}$ м/с возможны серьезные повреждения зданий с бетонными перекрытиями [5]. Параметры амплитуд перемещения и характер их затухания несут информацию о возможности проявления деструкционных последствий в конструкциях зданий: если на схеме вибросейсмических параметров амплитуда затухания колебаний на том или ином участке незначительна, то ввиду высоких значений упругих сил восстановления первоначальных прочностных параметров геологической среды негативные изменения от воздействия вибросейсмических колебаний не произойдут.

Все измерения проводились в частотном диапазоне 0.3—200 Гц в соответствии с ГОСТом [6]. Применялась 24-разрядная цифровая сейсмическая станция ZET 048-C. Как отмечено выше, оценочными параметрами являлись пиковые значения скорости, ускорения и перемещения волн сдвига, т. к. именно они влияют на несущие свойства грунтов. Измерения проводились в направлении трех взаимно перпендикулярных осей x, y (имели горизонтальные направления NS и EW соответственно) и z (направление вертикально вниз). Обработка сигналов осуществлялась с применением программы ZETLab SEISMO, а именно: в ходе работы регистрировались значения виброускорения, параметры виброскорости и виброперемещения были получены автоматически расчетным путем. В связи с плотностью застройки города и расположением зданий шаг измерений составлял от 20 до 200 м.

При интерпретации соотношений данных вибросейсмической съемки будем опираться на сводную таблицу А. Д. Жигалина и Г. П. Локшина [5], в которой приведены последствия вибрационного воздействия на грунтовую толщу и инженерные сооружения по соотношению среднеквадратичных значений виброскорости и виброускорения по Восточно-Европейской платформе. Эти соотношения будем принимать во внимание с учетом геологических и других условий района исследований.

Результаты

На схемах изображения пиковых значений амплитуды виброускорения способом изолиний превышение значения 0.03 м/с^2 более всего по площади отображено по компоненте z и менее всего по компонентам x и y (рис. 2). Соответственные максимальные значения: $Az_{max} = 0.622$ м/с^2, $Ax_{max} = 0.254$ м/с^2, $Ay_{max} = 0.207$ м/с^2 — в разы превышают нормативные. Зоны превышения пиковых значений виброскорости $(0.31—0.4) \times 10^{-3}$ м/с существенно отображаются по компоненте y и весьма незначительно по компонентам x и z (рис. 2). Максимальные значения: $Vy_{max} = 7.54 \times 10^{-3}$ м/с, $Vx_{max} = 1.195 \times 10^{-3}$ м/с, $Vz_{max} = 1.318 \times 10^{-3}$ м/с — неоднократно выше нормативных.

На рис. 3 отображены зоны со сверхнормативными значениями параметров вибросейсмических колебаний. На участках пересечения зон сверхнормативных значений виброскорости и виброускорения велика вероятность проявления последствий вибрационного воздействия в виде осадок фундаментов в слабых и плотных грунтах до 2 мм/год в соответствии с данными [5].

На схемах перемещения выделено 3 участка с высоким градиентом затухания колебаний (рис. 3). При этом участок У1 обозначается по всем трем компонентам, У2 — по одной горизонтальной (x) и вертикальной компонентам, У3 — также по одной горизонтальной (y) и вертикальной компонентам. Пиковые значения амплитуды перемещения на выделенных участках в ближней зоне зафиксированы в условиях различных значений виброускорения и виброскорости, сверх-

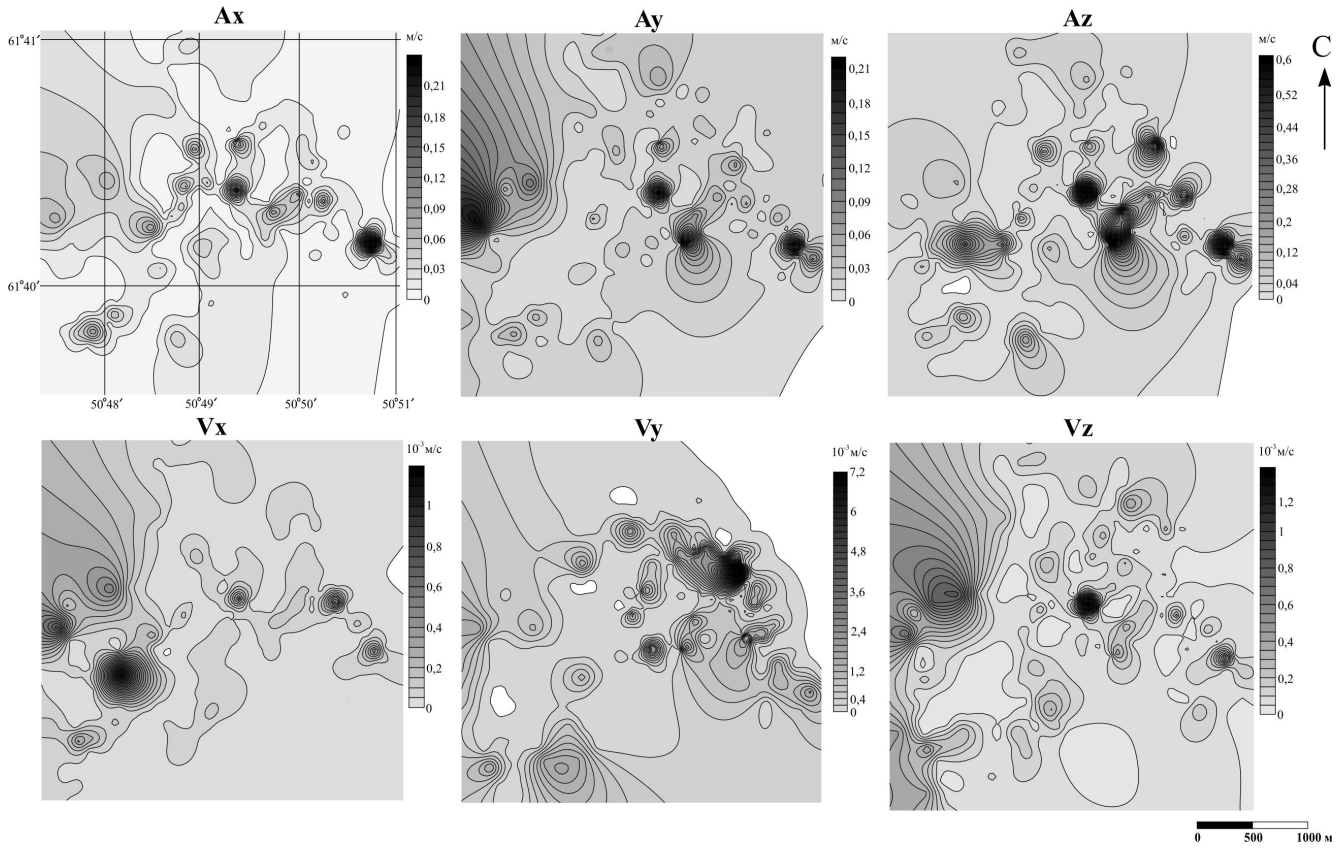


Рис. 2. Схема вибросейсмических параметров: ускорения (А) и скорости (V) — способом изолиний, Сыктывкар

Fig. 2. Scheme of vibroseis parameters of: acceleration (A) and speed (V) by isolines, Syktyvkar

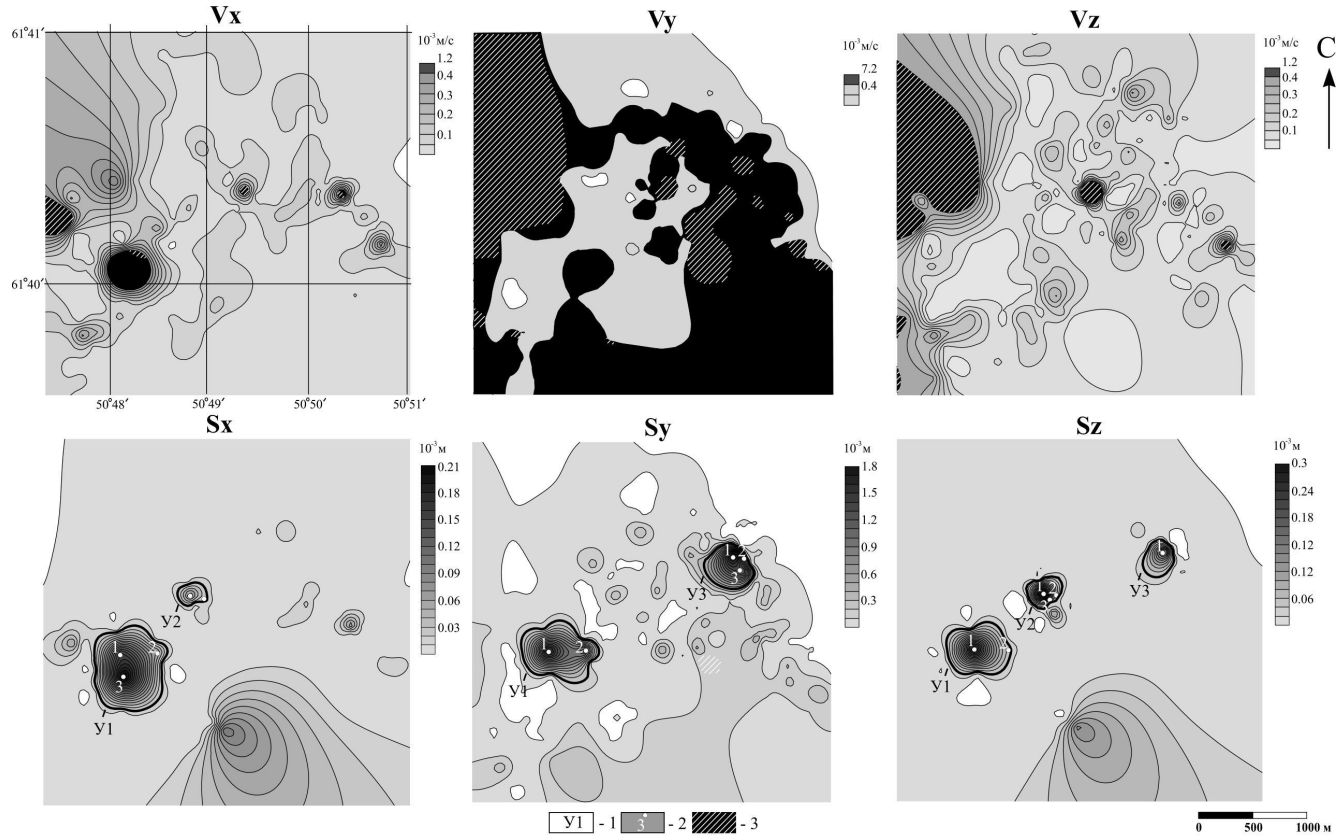


Рис. 3. Схема вибросейсмических параметров: скорости (V) и перемещения (S) — способом изолиний, Сыктывкар:
1 — участок с высоким градиентом затухания амплитуды колебаний; 2 — пункт наблюдения на выделенном участке; 3 — зоны пересечения участков сверхнормативных значений виброскорости и виброускорения

Fig. 3. Scheme of vibroseis parameters of: speed (V) and displacement (S) by isolines, Syktyvkar:
1 — area with high attenuation gradients of vibration; 2 — observation point on the area; 3 — intersection of excess velocity and acceleration values

Значения вибрационного воздействия на грунтовую толщу на участках с высокими градиентами затухания амплитуд колебаний, Сыктывкар

Values of vibration impact on the ground layer on areas with high attenuation gradients of vibration amplitudes, Syktyvkar

ПН	A_x. м/с^2	V_x. 10^{-3} м/с	S_x. 10^{-3} м	A_y. м/с^2	V_y. 10^{-3} м/с	S_y. 10^{-3} м	A_z. м/с^2	V_z. 10^{-3} м/с	S_z. 10^{-3} м
У1									
1	0.018	0.015	0.149	0.003	0.051	1.822	0.32 (норм. 0.03)	0.047	0.379
2	0.012	0.008	0.057	0.003	0.011	1.219	0.219 (норм. 0.03)	0.008	0.038
3	0.01	1.195 (норм. 0.4)	0.218	0.006	0.078	0.005	0.006	0.007	0.003
У2									
1	0.069 (норм. 0.03)	0.011	0.078	0.004	0.012	0.328	0.055 (норм. 0.03)	0.037	0.415
2	0.003	0.004	0.024	0.003	0.002	0.027	0.003	0.004	0.031
3	0.006	0.03	0.003	0.007	0.045	0.004	0.014	0.068	0.012
У3									
1	0.028	0.089	0.006	0.006	0.028	2.052	0.364 (норм. 0.03)	0.079	0.263
2	0.012	0.042	0.003	0.017	1.934 (норм. 0.4)	0.343	0.019	0.091	0.004
3	0.035 (норм. 0.03)	0.096	0.003	0.059 (норм. 0.03)	7.54 (норм. 0.4)	1.326	0.027	0.106	0.003

Примечание: ПН — номер пункта наблюдения; А — виброускорение; V — виброскорость; S — виброперемещение; заливкой в ячейках отмечены сверхнормативные значения параметров колебаний.

Note: ПН — number of observation point; A — vibration acceleration; V — vibration velocity; S — vibration displacement; fill in the cells marked suprastandard values of vibration parameters.

нормативных и ниже нормы. Эти значения приведены в таблице.

Сводные данные вибросейсмической съемки свидетельствуют о том, что наиболее всего негативным изменениям от воздействия вибросейсмических колебаний подвержен У3. Особенно четко это видно по компоненте у. Здесь высокий градиент затухания колебаний наблюдается наряду с повышенной вибросейсмической нагрузкой на грунты от автотранспорта и сверхнормативными значениями V_y (см. таблицу). При соотнесении с инженерно-геологическими данными У3 находится в зоне геолого-генетического комплекса аллювиальных и озерно-аллювиальных отложений чирвинского, полярного, бызовского, лайского и сулинского горизонтов, в частности III надпойменной террасы р. Сысолы. Осадки представлены разнозернистыми и гравийными песками и супесями, могут присутствовать линзы и прослои глин и суглинков печорского и чирвинского горизонтов (рис. 4, а). Осложняющим фактором на данном участке считаем неглубокое залегание грунтовых вод чирвинского горизонта, местами первые метры, в виду того что с увеличением степени водонасыщения песков аллювиального и озерно-аллювиального генезиса динамическая устойчивость этих грунтов падает [4].

На У1 и У2, находящихся в зоне моренных, часто валунных, суглинков и супесей мощностью более 10 м (gIIpč), отмечаются редкие превышения сверхнормативных значений виброскорости и виброускорения. В целом эти отложения являются надежным основанием для фундаментов зданий, но нередко, в частности на У1 и У2, присутствует осложняющий фактор в виде включений в моренной толще водонасыщенных песков озерно-ледникового генезиса (lgIIpč). Прослои и линзы песков понижают динамическую устойчивость массива включающих их грунтов. Подстилающие осадки чирвинского горизонта (laIIč) не оказывают влияния на устойчивость грунтов — оснований зданий в виду глубокого их залегания (рис. 4, б). Аналогично проводилась интерпретация данных для района Эжвы. Выделенный на рис. 5 участок аналогично находится в зоне горизонта gIIpč мощностью до 80 м, и осложняющим фактором также выступают песчаные линзы горизонта lgIIpč.

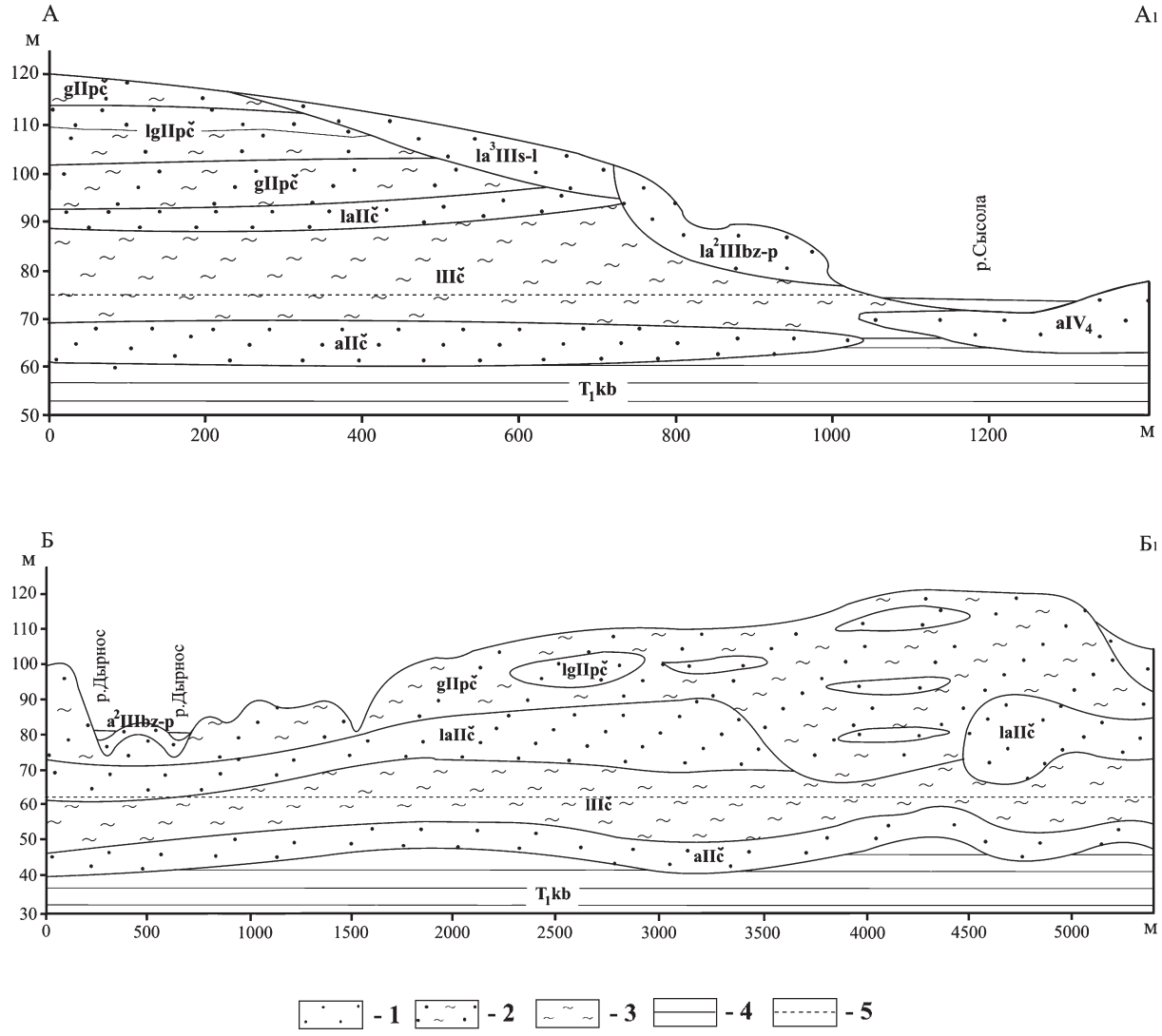


Рис. 4. Геологические разрезы к рис. 1 [13]: а — по линии А — А1; б — по линии Б — Б1: 1 — пески; 2 — суглинки; 3 — глины четвертичного генезиса; 4 — глины дочетвертичного генезиса; 5 — уровень грунтовых вод

Fig. 4. Geological sections for fig. 1 [13]: a — by the line А — А1; б — by the line Б — Б1: 1 — sands; 2 — loams; 3 — quaternary clays; 4 — antequaternary clays; 5 — ground water level

По полученным данным вибросейсмической съемки внесены дополнения в схему микросейсморайонирования Сыктывкара В. А. Лютоева с геоэкологической точки зрения (рис. 5): на выделенных участках неблагоприятные факторы, представленные песчаными и супесчаными отложениями, вносят свой вклад в приращение к амплитуде возможных землетрясений.

Выводы

Проведенные исследования по выбранной методике доказывают ее эффективность в получении информации о техногенном вибрационном поле города, в выделении участков, потенциально подверженных проявлению последствий от вибрационного воздействия на грунты-основания и здания. Данные позволили наглядно представить зоны пересечения участков сверхнормативных значений виброскорости и виброускорения на урбанизированной территории на примере г. Сыктывкара. В отмеченных зонах имеет место техногенное нарушение естественных геоэкологических условий или, иными словами, нарушение экологического состояния геологической среды в районе размещения зданий в условиях плотной городской застройки. А именно под воздействием вибросейсмических нагрузок на протяженном временном интервале произошло и происходит снижение устойчивости массивов горных пород (в нашем случае несвязных грунтов) и, как следствие, увеличение риска возникновения экзогенных геологических процессов, например суффозии и оползнепроявления. Наличие таких процессов и снижение динамической устойчивости вносят свой вклад в приращение к амплитуде возможных землетрясений и их балльности и требуют дополнительного изучения в области их физико-механических и сейсмических свойств грунтов.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований РАН №15-18-5-11.

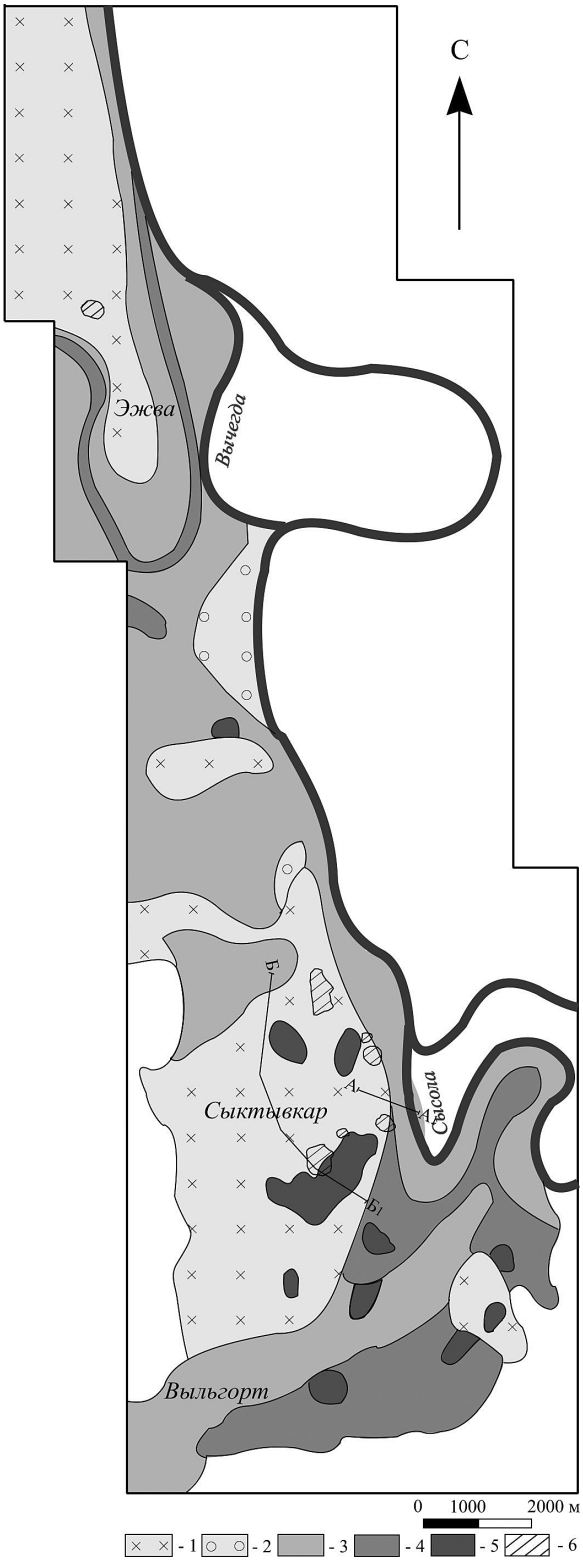


Рис. 5. Схема микросейсморайонирования г. Сыктывкара [8] с дополнениями А. Н. Вихоть:
приращение балльности: 1 — 0.0—0.5; 2 — 0.5—1.0; 3 — 1.0—1.3; 4 — 1.3—1.5; 5 — 1.5—2.0; 6 — зоны дополнительных неблагоприятных геоэкологических факторов для приращения к амплитуде возможных землетрясений

Fig. 5. Microzonation scheme of Syktyvkar [8] with additions by A. N. Vikhot:
intensity moveout: 1 — 0.0—0.5; 2 — 0.5—1.0; 3 — 1.0—1.3; 4 — 1.3—1.5; 5 — 1.5—2.0; 6 — zones of additional disadvantage geoecological factors for increment to the amplitude of possible earthquakes

Литература

1. Башилов И. П., Манукин А. Б., Попов Е. И. Комплекс аппаратуры для изучения деформационных процессов в геофизической среде и инженерных сооружениях // Докл. РАН. 1995. Т. 34. № 4. С. 539—541.

2. Вихоть А. Н., Лютоев В. А. Влияние гравитационных процессов и природно-техногенной микросейсмичности на геологическую среду г. Сыктывкара: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Томск, 2017. 22 с.

3. Вихоть А. Н. Выявление участков опасности осадочно-просадочных процессов в грунтах в условиях вибросейсмического поля урбанизированных территорий (на примере Сыктывкара) // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2017. № 6. С. 20—26. doi: 10.19110/2221-1381-2017-6-20-26.

4. Вихоть А. Н. Сравнение влияния вибродинамических воздействий на несущие свойства грунтов некоторых территорий Республики Коми // Геодинамика, вещество, рудогенез Восточно-Европейской платформы и ее складчатого обрамления: Материалы всерос. науч. конф. с междунар. уч. Сыктывкар: Геопринт, 2017. С. 36—37.

5. Жигалин А. Д., Локшин Г. П. Формирование вибрационного поля в геологической среде // Инженерная геология. 1987. Вып. 8. С. 86—92.

6. ГОСТ Р52892-2007. Вибрация и удар. Вибрация зданий. Измерение вибрации и оценка ее воздействия на конструкцию. М.: Изд-во стандартов, 2008. 16 с.

7. Лютоев В. А. Сейсмическое районирование Республики Коми и микросейсморайонирование г. Сыктывкара: Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Сыктывкар, 2000. 169 с.

8. Лютоев В. А. Сейсмогенные зоны Республики Коми и микросейсморайонирование города Сыктывкара. Сыктывкар: Геопринт, 2001. 32с.

9. Ляховицкий Ф. М. Инженерная геофизика. М.: Недра, 1989. 252 с.

10. Николаев Ю. Д. Гидрогеологическая карта СССР масштаба 1 : 200 000. Мезенская серия. Лист P-39 XXI. М.: Недра, 1979.

11. Носкова Н. Н., Михайлова Р. С. Республика Коми и Кировская область // Землетрясения Северной Евразии, 2011 год. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. С. 228—238.

12. О состоянии окружающей среды Республики Коми в 2016 году: Государственный доклад / Министерство промышленности, природных ресурсов, энергетики и транспорта Республики Коми, ГБУ РК «ТФИ РК». Сыктывкар, 2017. 179 с.

13. Отчет о комплексной геолого-гидрогеологической и инженерно-геологической съемке масштаба 1:50 000 для целей мелиорации на Средне-Вычегодском массиве / В. Ф. Лапицкая, В. Б. Зарудный, А. В. Король. Сыктывкар, 1990.

14. Решение 2-го Межведомственного стратиграфического совещания по четвертичной системе Восточно-Европейской платформы / Ред. И. И. Краснов, Е. П. Заррина. Л.: ВСЕГЕИ, 1986. 156 с.

15. Трофимов В. Т., Жигалин А. Д. Трансформация геофизической экологической функции абиотических сфер земли под влиянием техногенеза и ее последствия // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2014. № 2. С. 44—49.

16. Шушкова (Вихоть) А. Н. Склоновые гравитационные процессы г. Сыктывкара // Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского сегмента:

Материалы 20-й науч. конф. Института геологии Коми НЦ УрО РАН. Сыктывкар: Геопринт, 2011. С. 218—223.

17. BS 7385-1: 1990. ISO 4866:1990. Evaluation and measurement for vibration in buildings. BSI, 1990. 40 p.

References

1. Bashilov I. P. *Kompleks apparatury dlya izucheniya deformatsionnykh protsessov v geofizicheskoy srede i inzhenernykh sooruzheniyakh* (Equipment to study deformation processes in geophysical environment and constructions). I. P. Bashilov, A. B. Manukin, Ye. I. Popov. Doklaly Earth Sciences, 1995, V. 34, No. 4, pp. 539—541.

2. Vikhot A. N. *Vliyaniye gravitatsionnykh protsessov i prirodno-tekhnogennoy mikroseysmichnosti na geologicheskuyu sredu g. Syktyvkara* (Influence of gravitation processes and natural technogenic microseismicity on geological environment of Syktyvkar City). Extended abstract of PhD dissertation. Tomsk, 2017, 22 p.

3. Vikhot A. N. *Vyyavleniye uchastkov opasnosti osadochno-prosadochnykh protsessov v gruntakh v usloviyakh vibroseysmicheskogo polya urbanizirovannykh territoriy (na primer Syktyvkara)* (Identification of hazardous areas of sedimentary-subsidence processes in soils under the conditions of a vibroseis field of urbanized territories (on the example of Syktyvkar)) A. N. Vikhot', V. A. Lyutoyev. Vestnik of institute of geology Komi SC UB RAS, 2017, No.6, pp. 20—26. doi: 10.19110/2221-1381-2017-6-20-26.

4. Vikhot A. N. *Sravneniye vliyaniya vibrodinamicheskikh vozdeystviy na nesushchiye svoystva gruntov nekotorykh territoriy Respubliki Komi* (Comparison of the influence of vibrodynamic effects on the bearing properties of soils of some territories of the Komi Republic). Geodinamika, veshchestvo, rudogenez Vostochno-yevropeyskiye platformy i yeye skladchatogo obramleniya: Proceedings of conference. Syktyvkar: Geoprint, 2017, pp. 36—37.

5. Zhigalin A. D. *Formirovaniye vibratsionnogo polya v geologicheskoy srede* (Formation of the vibrational field in the geological environment). A. D. Zhigalin, G. P. Lokshin. Inzhenernaya geologiya, 1987, 8, pp. 86—92.

6. GOST R52892-2007. *Vibratsiya i udar. Vibratsiya zdaniy. Izmereniye vibratsii i otsenka yego vozdeystviya na konstruktsiyu* (Vibration and shock. Vibration of buildings. Measurement of vibration and evaluation of its impact on the structure). Moscow: Publishing of standarts, 2008, 16 p.

7. Lyutoyev V. A. *Seysmicheskoye rayonirovaniye Respubliki Komi i mikroseysmorayonirovaniye g. Syktyvkara* (Seismic zoning of the Komi Republic and microseis zonation of the city of Syktyvkar). Dissertation. Syktyvkar, 2000, 169 p.

8. Lyutoyev V. A. *Seysmogennyye zony Respubliki Komi i mikroseysmorayonirovaniye goroda Syktyvkara* (Seismic zones of the Republic of Komi and microseism zonation of the city of Syktyvkar). Syktyvkar: Geoprint, 2001, 32 p.

9. Lyakhovitskiy F. M. *Inzhenernaya geofizika* (Engineering geophysics). Moscow: Nedra, 1989, 252 p.

10. Nikolayev YU. D. *Gidrogeologicheskaya karta SSSR masshtaba 1 : 200 000. Mezenskaya seriya. List R*-39 XXI. (Hydrogeological map of the USSR, scale 1: 200 000. Mezen series. Sheet P — 39 XXI). Moscow: Nedra, 1979.

11. Noskova N. N., Mikhaylova R. S. *Respublika Komi i Kirovskaya oblast'* (Komi Republic and Kirov region) Zemletryaseniya Severnoy Yevrazii (Earthquakes of North Euroasia), 2011. Obninsk: YEGS RAN, 2017, pp. 228—238.

12. Gosudarstvennyy doklad «O sostoyanii okruzhayushchey sredy Respubliki Komi v 2016 godu» (State report «On the state of the environment of the Komi Republic in 2016»). Ministry of Industry, Natural Resources, Energy and Transport of the Republic of Komi. Syktyvkar, 2017, 179 p.

13. Otchet o kompleksnoi geologo-gidrogeologicheskoi i inzhenerno-geologicheskoi semke masshtaba 1:50 000 dlya tselei melioratsii na Sredne-Vychegodskom massive (Report on complex geological and hydrogeological and engineering geological survey with scale 1:50000 for melioration in Middle Vychegda massif). V. F. Lapitskaya, V. B. Zarudny, A. V. Korol. Syktyvkar, 1990.

14. Resheniye 2-go Mezhvedomstvennogo stratigraficheskogo sobraniya po chetvertichnoy sisteme Vostochno-Yevropeyskoy platformy (Decision of the 2nd Interdepartmental Stratigraphic Meeting on the Quaternary System of the East European Platform). Ed. I. I. Krasnov, Ye. P. Zarrina. Leningrad: VSEGEI, 1986, 156 p.

15. Trofimov V. T. *Transformatsiya geofizicheskoy zashchity funktsiy abioticheskikh sfer zemli pod dog tekhnogeneza i yeye posledstviya* (Transformation of the geophysical ecological function of abiotic spheres of the earth under the influence of technogenesis and its consequences). Vestnik of Moscow University, Ser. 4. Geologiya, 2014, No.2, pp. 44—49.

16. Shushkova (Vikhot') A. N. *Sklonovyye gravitatsionnyye protsessy g. Syktyvkara* (Slope gravitational processes in the city of Syktyvkar). *Struktura, veshchestvo, istoriya litosfery Timano-Severoural'skogo segmenta* (Structure, substance, history of the lithosphere of the Timan-Northern Ural segment): Proceedings of conference. Syktyvkar: Geoprint, 2011, pp. 218—223.

17. BS 7385-1: 1990. ISO 4866:1990. Evaluation and measurement for vibration in buildings. BSI, 1990, 40 p.

УДК 550.8+519.92+681.142 DOI: 10.19110/2221-1381-2019-2-44-52

ОСНОВАНИЯ МНОГОМЕРНОГО КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА В ГЕОЛОГИИ

Ю. А. Ткачев
Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар
tkachev@geo.komisc.ru

Охарактеризована роль кластерного анализа в системе наук о классиологии, даны определения кластеров в текстовом варианте и с помощью логико-математических формул. Впервые дано сопоставление идей и методов кластерного анализа с теорией графов. Изложен алгоритм автоматического выделения многомерных кластеров объединением так называемых строковых кластеров, под которыми понимаются кластеры, объединяемые наличием в них общей точки под номером, равным номеру строки. Установлено, что графы кластеров являются наглядной и исчерпывающей формой представления результатов кластерного анализа.

Кроме того, рассмотрены специальные вопросы: выбор критического расстояния, кластограммы, преобразование исходных данных для кластерного анализа, трактовка плоских (двухмерных) изображений многомерного кластерного анализа.

Ключевые слова: *классиология, классификация, кластерный анализ, критическое расстояние, алгоритм, программа для ЭВМ, теория графов.*

MULTIVARIATE CLUSTER ANALYSIS IN GEOLOGY

Yu. A. Tkachev
Institute of Geology of Komi SC, UB RAS, Syktyvkar

The article discusses the role of cluster analysis in the sciences of classiology, defines clusters using text as well as logical and mathematical formulas. For the first time, the ideas and methods of cluster analysis are discussed side by side with the graph theory. The algorithm is defined for the automatic recognition of multivariate clusters by joining string clusters — clusters with have a common point (a row in the table of point-to-point distances).

Separately, the following special issues are discussed: the choice of critical path, clustergrams, transformation of input data for cluster analysis, and interpretation of plain (two-dimensional) images of multivariate cluster analysis.

Keywords: *classiology, classification, cluster analysis, critical path, algorithm, computer program, graph.*

Место кластерного анализа в классиологии

Кластерный анализ является одним из методов, применяемых для разделения множества объектов и процессов на виды, классы, группы, типы и т. д., то есть на подмножества [15, 16, 22]. В классиологии выделяют два типа задач: формальные (математические) и содержательные (предметные). Первые служат для установления самого факта существования классов, групп и др. и отвечают на вопрос, не являются ли они результатом случайной флуктуации значений свойств, характеризующих объекты или процессы [16]. Достигается это проверкой статистических гипотез о существенности или несущественности вероятностей реальности наблюдаемых групп. К этому типу задач относятся дисперсионный и факторный анализы, дискриминантный анализ [13, 20], теория графов, теория размытых множеств (fuzzi) и анализируемый в этой статье кластерный анализ [22]. Среди классиологической литературы выделяются объемные монографии (до 600 стр. и более — [15, 16]), написанные профессиональными философами, но не содержащие ни одной логико-математической формулы. Из этих монографий можно почерпнуть мысль лишь о необходимости классифицировать объекты, свойства и процессы, но не о том, как это сделать.

Кластерный анализ заключается в разделении на группы (кластеры, подмножества) множеств изучаемых точек-объектов. В геологии информация обычно привязана к определенным точкам поверхности Земли или её недр. Традиционно она изображается в виде карт и планов, на которых геологические тела условно отображаются в виде точек с двухмерными или трехмерными координатами. Пространственное распределение этих точек подвергается кластерному, а затем предметному анализу с целью установления геологических закономерностей и прогноза месторождений полезных ископаемых [1, 3, 6].

Однако область применения кластерного анализа не ограничивается точками-объектами в одно-, двух- или трехмерном физическом пространстве. Огромное количество геологической информации касается состава и свойств проб, образцов и других объектов. Эти данные отображаются в табличной форме, а также в графической форме в виде точек в абстрактном многомерном пространстве, в пространстве признаков или свойств [22]. Размерность пространства D в этом случае равна числу изучаемых признаков, которых в геологии в большинстве случаев бывает намного больше трех.

Начала кластерного анализа

С давних пор подразделение точек на кластеры производилось визуально. Ввиду наглядности графических изображений визуальный обзор и сейчас представляет большую ценность. Он позволяет оценивать *расположение* групп точек, их *число* в группах, *плотность* расположения точек в кластерах по сравнению с плотностью их расположения в среднем и в межкластерном пространстве. В этом и только в этом заклю-

чался прежде кластерный анализ, который назовем визуальным. Он всегда осуществлялся геологами при рассмотрении точечных графиков, но специально не выделялся как самостоятельный метод.

Несмотря на несомненную пользу, его возможности крайне ограничены. Наглядными фактически были только одномерный и двухмерный случаи. Для придания наглядности в трехмерном пространстве, исполненном на плоскости (на бумаге, экране компьютера), приходится использовать специальные средства или методы (стереоскопы, стереоочки, цвета точек), однако их результаты мало впечатляют. Многомерный случай в принципе не может быть наглядным из-за приспособленности мозга животных и человека к трехмерному физическому пространству, в котором он возник и эволюционировал. Но с помощью абстрактных математических методов можно решать некоторые задачи о свойствах размещения точек в многомерном пространстве [10, 14]. Введение в кластерный анализ понятия *расстояние* было важным шагом в его развитии — он стал *количественным*, основанным на строгих определениях и правилах.

Определение кластера

Естественными представляются следующие два определения кластера: 1) для любой точки кластера найдется хотя бы одна точка этого же кластера, удаленная от неё на расстояние, меньшее заданного критического, 2) все точки кластера удалены друг от друга на расстояние, меньшее заданного критического. По формулам математической логики первый вариант записывается как $\forall n \in G \vee \exists n_i (P(d(n,n_i) \in G < r_{кр})$, т. е. в первом варианте каждая точка кластера соединена расстоянием, меньшим критического, хотя бы с одной точкой этого же кластера. Здесь $\forall$ — квантор общности, $\exists$ — квантор существования, G — имя кластера, n — любая (каждая) точка кластера, n_i — какая-нибудь одна точка кластера, $r_{кр}$ — критическое расстояние, $d(i, j)$ — расстояние между парой точек i, j. По второму определению для каждой пары точек кластера должно быть $d(i, j) < r_{кр}$ со всеми точками кластера, т. е. $\forall n_i \in G \vee \forall n_i \in G(P(d(i, j) < r_{кр})$. Из определений очевидно, что они характеризуют крайние варианты кластеров. Под первое определение подпадают *кластеры-цепочки*, образованные одномерной последовательностью точек, соседние точки которых находятся на расстояниях, меньших критического, а соседние соседних — на больших критического. Такие кластеры называются неполносвязанными. Под второе определение подпадают совокупности точек, все пары в которых отстоят друг от друга на расстояние, меньше критического. Они называются полносвязанными.

Некоторые исследователи признают кластерами только те множества точек, в которых каждая точка удалена от каждой иной на расстояние, меньшее критического. Но необходимо иметь в виду, что многие точки могут быть связаны с другими не непосредственно, а через цепочку третьих точек. Отказать им в близости к остальным точкам кластера — значит игнорировать большую часть практических результатов кластерных анализов. Можно дать ещё одно определение кластера: любые две точки кластера можно соединить *непрерывным маршрутом*, что становится очевидным из теории графов (см. последний раздел статьи). Иначе простые цепи надо будет исключить из числа кластеров.

Строковые кластеры

Введём в кластерный анализ новое понятие — *строковые кластеры как промежуточные объекты процесса поиска кластеров в обычном их понимании — полных кластеров*. Строковый кластер — множество точек строки i, находящихся от точки i на расстояниях, меньших заданного критического. Однако друг от друга эти точки могут находиться на расстояниях, меньших критического. Расстояния между точками образуют симметричную матрицу размером $n \times n$, где n — число точек в изучаемой совокупности. Для нашей цели в таблицу можно ввести только те расстояния, которые меньше критического. Строго говоря, нам понадобятся не сами расстояния между точками, а лишь произвольные отметки тех клеток матрицы, расстояния между точками в которых меньше критического. Назовём эти клетки *отмеченными*. *Определение: Строковым кластером Cl (i) строки i является совокупность точек с номером строки (т. е. i) и точек с номерами столбцов отмеченных клеток этой строки*.

Поскольку все точки в отмеченных клетках строки i удалены от точки i на расстояние, меньшее критического, то все они по первому определению удовлетворяют понятию кластера.

Постулат 1: каждая строка может не составлять строкового кластера (если в строке нет отмеченных клеток) или составить один и только один строковый кластер.

Постулат 2: если строковые кластеры строк i и j, $i \neq j$ не содержат ни одной общей точки, то они образуют различные строковые кластеры, т. е. $Cl(i) \neq Cl(j)$.

Постулат 3: если строковые кластеры строк i и j, $i \neq j$ имеют одну или более общих точек, то сумма строковых кластеров $Cl(i) + Cl(j)$ составляет один кластер.

Постулат 4: если кластеры $Cl(i) + Cl(j)$ могут составить один кластер и $Cl(i) + Cl(t)$ могут составить один кластер, то $Cl(i) + Cl(t)$ также могут составить один кластер.

Это означает, что свойство строковых кластеров составлять один кластер является транзитивным. Таким образом, составление кластера в обычном смысле слова осуществляется суммированием строковых кластеров по правилам суммирования *множеств* точек строковых кластеров.

Остаётся добавить, что строковые кластеры наиболее часто будут неполно связанными с номером точки, равной номеру строки, с которой связаны все остальные точки.

Алгоритм с комментариями выделения множества точек, образующих многомерный кластер с помощью строковых кластеров

1. Исходными данными для алгоритма является таблица координат точек размером $n \times k$, где n — число точек, k — размерность пространства, т. е. число свойств.

Таблица 1. **Химический состав зювитов из Карского импактного кратера по данным микрозондового анализа, мас. % (исходные данные для кластерного анализа, Н. С. Ковальчук, 9 компонентов, 19 проб)**

Table 1. **The chemical composition of the zuvits from the Kara impacting crater according to mycrosond analysis, masses. % (initial data for cluster analysis, N. S. Kovalchuk, 9 components, 19 samples)**

№ пробы / Sample No	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	SO_3	K_2O	CaO	TiO_2	Fe_2O_3
1	4.75	4.50	18.79	59.99	0.00	2.90	3.67	1.75	3.66
2	5.48	2.31	20.68	60.21	0.00	2.63	4.47	1.21	3.00
3	5.11	3.11	20.30	61.24	0.00	2.96	4.12	0.47	2.68
4	5.04	2.18	19.96	61.93	0.00	4.71	3.37	0.82	1.97
5	0.80	14.62	8.75	49.32	0.00	0.29	1.61	0.00	24.63
6	0.84	10.85	5.59	72.18	0.00	0.59	1.04	0.00	8.91
7	2.54	1.55	17.29	69.86	0.70	4.16	1.88	0.85	1.16
8	1.05	3.14	14.34	72.12	0.00	3.09	1.68	0.81	3.77
9	0.00	7.13	19.12	57.57	0.00	3.83	3.58	0.00	8.77
10	0.73	5.56	19.30	61.52	0.00	4.34	2.02	0.00	6.54
11	0.74	4.18	16.86	68.04	0.00	4.22	1.81	0.95	3.20
12	0.80	3.17	14.34	73.52	0.00	3.10	1.49	0.00	3.58
13	0.56	7.52	15.87	57.07	0.50	3.72	2.86	1.30	10.58
14	4.34	5.21	11.32	61.37	1.79	2.39	9.02	0.54	4.02
15	4.96	2.38	10.94	71.30	0.97	1.48	5.13	0.00	2.84
16	3.38	4.60	9.47	62.63	0.37	2.58	10.10	0.82	6.05
17	14.28	0.00	22.89	61.73	0.00	0.35	0.75	0.00	0.00
18	7.87	1.58	18.15	63.28	1.92	4.34	2.86	0.00	0.00
19	5.53	3.60	14.24	49.38	11.79	3.04	9.11	0.98	2.32
среднее / average	3.62	4.59	15.70	62.86	0.95	2.88	3.71	0.55	5.14
дисперсия / dispersion	12.07	12.16	22.06	49.11	7.26	1.86	7.87	0.31	30.75
станд. откл. / standard deviation	3.47	3.49	4.70	7.01	2.69	1.36	2.81	0.55	5.55

Например, это может быть таблица результатов анализов *n* проб на *k* химических элементов (табл. 1).

2. Исследователь принимает решение, следует ли подвергать исходные данные предварительному преобразованию. Оно может заключаться в нормировании, т. е. делении данных на *среднее значение m*, или на среднее *квадратическое отклонение* σ, или на *коэффициент вариации* ν. При этом исходные данные заменяются на нормированные. На практике часто последовательно используют несколько вариантов нормирования. В качестве нормирующих коэффициентов исследователь может использовать весовые коэффициенты, отражающие относительную важность каждого признака.

3. Для каждой пары точек (*i, j*) рассчитывается евклидово расстояние по формуле:

$$d(i,j) = \sqrt{\sum_{t=1}^{k}(x_{i,t} - x_{j,t})^2},$$

где k — размерность пространства, $x_{i,t}$ — координата номера *t* точки *i* (результат анализа пробы *i* на химический элемент *t*). Значения *d*(*i, j*) образуют симметричную матрицу $n \times n$ с нулевой главной диагональю — матрицу евклидовых расстояний (табл. 2).

4. По матрице евклидовых расстояний вычисляются минимальное *min(d(i, j))* и максимальное *max(d(i, j))* расстояния.

5. Исследователь намечает число критических расстояний, для которых будет проводиться кластерный анализ. Практика показала, что результаты кластерного анализа сильно зависят от критического расстояния *r*, поэтому применяют серию критических расстояний, которые в совокупности образуют динамическую картину кластеров в зависимости от *r*.

Пусть число критических расстояний выбрано равным *nr*. Тогда вся дальнейшая обработка будет вестись с критическими *nr*-расстояниями, увеличивающимися с шагом

$$\frac{max(d(i,j)) - min\,(d(i,j))}{nr}.$$

6. Для каждого критического расстояния составляется таблица строковых кластеров, как описано в предыдущем разделе, причем каждая строка евклидовых расстояний может образовать пустой строковый кластер, несколько строковых кластеров хотя бы с одной общей точкой, объединяемых в единый кластер, и несколько строковых кластеров, объединяемых в другой кластер (табл. 3).

Выбор критического расстояния

На результаты кластерного анализа решающее влияние оказывает величина критического расстояния между точками. Если критическое расстояние выбрано слишком малым, образуется много малоточечных кластеров; если оно велико, в пределе получится один кластер, охватывающий все точки. На результат кластерного анализа влияет плотность расположения точек. Для получения сопоставимых результатов кри-

Таблица 2. **Таблица расстояний между парами точек kr = 8.196**

Table 2. **Table of distances between pairs of points kr = 8,196**

	j																		
i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1		3.22	2.95	4.20	28.05	20.53	11.21	13.69	8.09	6.00	9.53	15.10	9.66	9.59	14.24	12.00	12.74	7.24	17.48
2	3.22		1.69	3.23	30.29	22.75	11.26	14.53	9.98	7.72	10.56	15.84	12.08	11.14	14.91	13.51	10.93	6.46	17.93
3	2.95	1.69		2.39	30.36	21.64	10.09	13.33	9.77	6.91	9.26	14.59	11.94	10.72	13.92	13.11	11.24	5.77	18.50
4	4.20	3.23	2.39		31.53	21.81	8.96	12.69	10.83	7.36	8.58	13.94	12.84	11.38	13.61	13.63	11.37	4.70	19.17
5	28.05	30.29	30.36	31.53		28.18	35.15	33.56	22.37	26.19	31.64	34.63	19.34	27.21	33.83	26.61	36.83	33.64	29.59
6	20.53	22.75	21.64	21.81	28.18		17.50	13.03	20.69	18.71	15.36	13.12	19.05	16.97	13.17	15.71	28.04	21.74	30.39
7	11.21	11.26	10.09	8.96	35.15	17.50		5.20	15.94	11.10	4.28	6.01	17.18	13.71	8.38	14.75	16.00	8.77	24.89
8	13.69	14.53	13.33	12.69	33.56	13.03	5.20		16.77	12.37	5.08	1.66	17.23	14.05	6.71	14.07	19.73	12.77	27.09
9	8.09	9.98	9.77	10.83	22.37	20.69	15.94	16.77		5.13	12.62	18.04	4.13	12.47	18.62	13.74	19.58	14.41	18.62
10	6.00	7.72	6.91	7.36	26.19	18.71	11.10	12.37	5.13		7.90	13.60	7.40	11.81	15.03	13.24	16.96	10.88	20.24
11	9.53	10.56	9.26	8.58	31.64	15.36	4.28	5.08	12.62	7.90		6.31	13.74	12.19	9.34	13.07	17.44	9.89	23.93
12	15.10	15.84	14.59	13.94	34.63	13.12	6.01	1.66	18.04	13.60	6.31		18.58	15.31	7.20	15.24	20.61	13.85	28.37
13	9.66	12.08	11.94	12.84	19.34	19.05	17.18	17.23	4.13	7.40	13.74	18.58		11.99	18.56	12.76	21.11	15.76	18.36
14	9.59	11.14	10.72	11.38	27.21	16.97	13.71	14.05	12.47	11.81	12.19	15.31	10.99		11.20	3.70	18.77	11.58	16.12
15	14.24	14.91	13.92	13.61	33.83	13.17	8.38	6.71	18.62	15.03	9.34	7.20	18.56	11.20		11.05	18.88	12.15	25.10
16	12.00	13.51	13.11	13.63	26.61	15.71	14.75	14.07	13.74	13.24	13.07	15.24	12.76	3.70	11.05		21.23	14.15	18.69
17	12.74	10.93	11.24	11.37	36.83	28.04	16.00	19.73	19.58	16.96	17.44	20.61	21.11	18.77	18.88	21.23		9.62	23.22
18	7.24	6.46	5.77	4.70	33.64	21.74	8.77	12.77	14.41	10.88	9.98	13.85	15.76	11.58	12.15	14.15	9.62		19.04
19	17.48	17.93	18.50	19.17	29.59	30.39	24.89	27.09	18.62	20.24	23.93	28.37	18.36	16.12	25.10	18.69	23.22	19.04	

Таблица 3. **Строковые кластеры к примеру Н. С. Ковальчук (9 компонентов, 19 проб, критическое расстояние 8.196, большие расстояния опущены, 28 связей)**

Table 3. **String clusters, for example, N. S. Kovalchuk (9 components, 19 samples, critical distance 8.196, long distances omitted, 28 links)**

	меры сходства точки *i* с точкой *j*																		
i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	**16**	17	18	19
1		3.22	2.95	4.20					8.09	6.00								7.24	
2	3.22		1.69	3.23						7.72								6.46	
3	2.95	1.69		2.39						6.91								5.77	
4	4.20	3.23	2.39							7.36								4.70	
5																			
6																			
7								5.20			4.28	6.01							
8							5.20				5.08	1.66			6.71				
9	8.09									5.13			4.13						
10	6.00	7.72	6.91	7.36					5.13		7.90		7.40						
11							4.28	5.08		7.90		6.31							
12							6.01	1.66			6.31				7.20				
13									4.13	7.40									
14																**3.70***			
15								6.71				7.20							
16														**3.70**					
17																			
18	7.24	6.46	5.77	4.70															
19																			

* кластер № 2 (точки 14—16) / cluster 2 (14—16)

тические расстояния целесообразно нормировать, как указано в алгоритме.

Как бы удачно ни было выбрано критическое расстояние, оно характеризует сгруппированность точек только для единственного $r_{кр}$. Практика компьютерного моделирования кластеров в некотором множестве точек [11, 12, 17] и последующего решения обратной задачи, т. е. проведения кластерного анализа, показали, что нет способа выбора $r_{кр}$, при котором его результаты были бы максимально приближены к замоделированной картине кластеров. Поэтому в разработанном алгоритме предусмотрена обработка данных с *последовательностью критических расстояний*, которая позволяла бы постро-

ить кластограмму динамики развития (объединения) кластеров с увеличением $r_{кр}$, подобно тому, как это делается в корреляционном анализе, где изображается объединение пар признаков с увеличением/уменьшением корреляции между ними.

Возникает вопрос о шаге изменения (увеличения) $r_{кр}$, который позволял бы получить наиболее информативную кластограмму. Если последовательность критических расстояний составляет арифметическую прогрессию, т. е. последовательность с равным шагом Δr, то приращиваемое число точек в кластерах будет увеличиваться приблизительно пропорционально nD-й степени критического расстояния, где nD — размерность пространства. Отсюда возникает задача составить шкалу критических расстояний с шагом, уменьшающимся к корню k-й степени из критического расстояния. В этом случае приращение числа точек, объединяемых в кластеры на каждом шаге $r_{кр}$, будет в первом приближении одинаковым. Как рассчитать такую шкалу, любезно показал мне доктор г.-м. наук В. И. Ракин. Это обстоятельство, в частности, позволяет использовать её (шкалу) для проверки статистической гипотезы о том, что *кластеры носят случайный характер*. Вызывает недоумение, что в так называемом стандарте ЮК, изложенном в солидном труде «Основы литохимии», проблема критических расстояний не только не обсуждается, но даже не упоминается [18].

Представление результатов кластерного анализа

Первичной формой представления результатов является таблица, содержащая колонку критических расстояний и колонку одного или нескольких множеств точек, образующих кластеры по числу этих множеств (табл. 4). По этой таблице строится дендрограмма (кластограмма), которая даёт представление о точках, объединяемых в кластеры в зависимости от критических расстояний в динамике (рис. 1). Наконец, строится плоская (двухмерная) проекция расположения точек по их двухмерным координатам, на которой намечаются овальные границы кластеров (рис. 2).

Ни одна из этих форм представления, ни их совокупность не дают исчерпывающего, а также наглядного представления о результатах кластерного анализа. Так, в табл. 4 представлены множества точек, из которых состоят кластеры, т. е. число точек и их номера. Восстановить, какие из этих точек находятся на расстояниях, меньших критического, не представляется возможным. Это невозможно сделать и с помощью дендрограммы (рис. 1). Лишь очень приблизительно это можно сделать по рис. 2, т. е. только для двумерного случая. Для многомерного случая изобразить пространственное расположение точек можно только с помощью $C_k^2 = \frac{k!}{2!\,(k-2!)}$ пар проекций, что для силикатного анализа составляет $\frac{10!}{2 \cdot 8!} = \frac{9 \cdot 10}{2} = 45$ пар. Наглядно представить и осмыслить такое число пар проекций невозможно. К тому же нанесение на проекции границ кластеров — ошибочная процедура, так как *кластер не область пространства, а множество точек*.

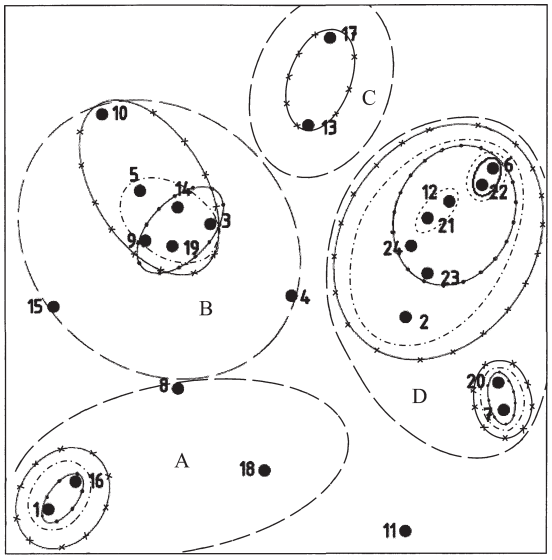
Таблица 4. **Ранжированные меры сходства между точками в паре (евклидовы расстояния) к примеру Н. С. Ковальчук (9 компонентов, 19 проб, 28 связей, два кластера, критическое расстояние 8.196)**

Table 4. **Ranked measures of similarity between points in a pair (euclidean distances), for example, N. S. Kovalchuk (9 components, 19 samples, 28 links, two clusters, critical distance 8.196)**

Номера точек в паре Number of points in pair	Мера сходства («расстояния») между парами точек Measure of similarity (“distance”) between pair of points	Толщина линий, их вид на графе, число связей Width of lines, their appearance on graph, No. of bonds
8-12	1.66	
2-3	1.69	
3-4	2.39	
1-3	2.95	сплошные жирные / bold
1-2	3.22	
2-4	3.23	
14-16	**3.70***	
9-13	4.13	
1-4	4.20	9 связей / 9 bonds
7-11	4.28	
4-18	4.70	
8-11	5.08	
9-10	5.13	
7-8	5.20	сплошные полужирные / semibold
3-18	5.77	
1-10	6.00	
7-12	6.01	
11-12	6.31	9 связей / 9 bonds
2-18	6.46	
8-15	6.71	
3-10	6.91	
12-15	7.20	
1-18	7.24	штриховые / dashed
4-10	7.36	
10-13	7.40	
2-10	7.72	
10-11	7.90	
1-9	8.09	10 связей / 10 bonds

* полужирным напечатан кластер № 2

* semibold for cluster 2.



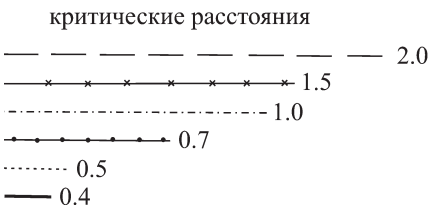


Рис. 1. Изменение числа и состава точек в кластерах в зависимости от критического расстояния (в долях среднего «ближайшего» расстояния между точками), по которому выделялись кластеры (показаны горизонтальными отрезками). A, B, C, D — кусты кластеров

Fig. 1. Changes in number and composition of points in clusters depending on the critical distance (in fractions of average «closest» distance between points) along which clusters were allocated (shown by horizontal lines). A, B, C, D — bushes of clusters

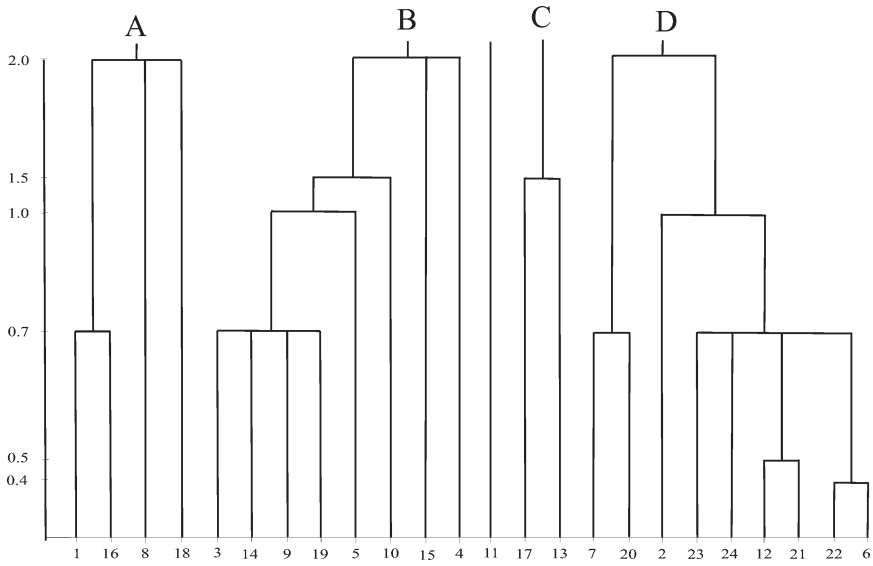


Рис. 2. Дендрограмма кластеров. По оси абсцисс — номера точек, по оси ординат — критические расстояния, по которым выделялись кластеры. A, B, C, D — кусты кластеров

Fig. 2. Dendrogram of clusters. The abscissa axis is number of points, and the ordinate is critical distance along which the clusters were separated. A, B, C, D — bushes of clusters

Таким образом, по обычно представляемым результатам кластерного анализа невозможно определить, является данный кластер полносвязным или неполносвязным, что ограничивает предметный анализ результатов.

Графы, их роль в кластерном анализе

Наиболее близкой к кластерному анализу по целям и методам отраслью науки является *теория графов*. Обе они используют для решения своих задач взаимное расположение точек. В кластерном анализе критерием выделения подмножества точек в кластер служит их взаимная близость, конкретнее — расстояние в многомерном пространстве. Однако «облако» точек в кластере наглядно изобразить и представить невозможно, кроме как в двухмерном пространстве. Вместе с тем невозможно в явном виде установить, какие точки связаны друг с другом близкими расстояниями, меньшими критического, а какие — нет. Такие точки, однако, в неполносвязанном кластере имеются. Провести полноценный предметный анализ в этих условиях невозможно.

В теории графов понятие *расстояние* отсутствует. Никакая метрика не используется. Граф представляет собой множество точек (вершин) и *рёбер*, которые соединяют пару точек, если между точками этой пары имеется *связь*. Природа этой связи в теории графов не обсуждается, и её наличие (или отсутствие) между указанной парой точек устанавливается из внешних к теории источников. Таким внешним источником для установления наличия (или отсутствия) *связи* может служить кластерный анализ, а именно, если между указанной парой точек расстояние меньше заданного исследователем критического, постулируется связь между ними, иначе постулируется её отсутствие. Теория графов содержит много результатов.

Отсюда непосредственно вытекает, что граф есть наглядное и исчерпывающее представление результатов кластерного анализа. Другими словами, кластерный анализ является источником информации о свя-

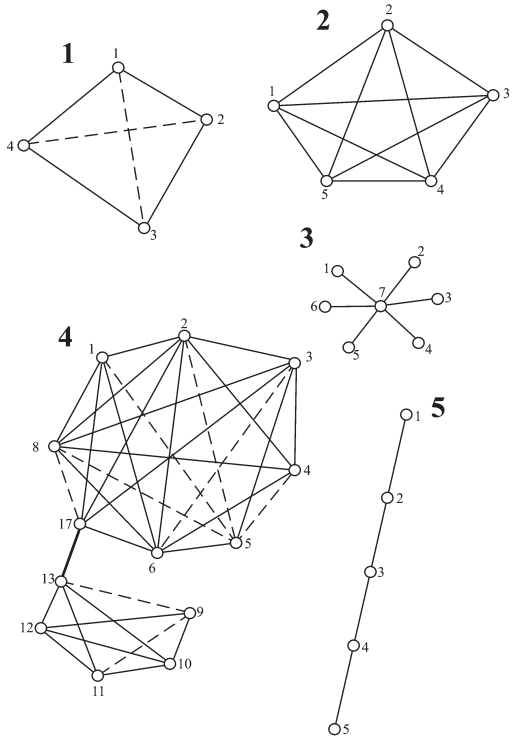


Рис. 3. Представление кластеров в форме графов:
1—5 — некоторые типы графов-кластеров: 1 — неполносвязанный простой цикл; 2 — полносвязанный, сумма циклов; 3 — неполносвязанный, радиальный; 4 — неполносвязанный сложный с перешейком; 5 — неполносвязанный, простая цепь. Сплошные линии — связи (рёбра), пунктирная — отсутствующие связи, жирная линия — перешеек

Fig. 3. Representation of clusters in the form of graphs.
1—5 — some types of graph-clusters: 1 — incompletely connected, simple cycle, 2 — completely connected, sum of cycles, 3 — incompletely connected, radial, 4 — incompletely connected, complex with the bridge, 5 — incompletely connected, simple chain. Solid lines — links (edges), dotted — missing links, thick line — bridge

зях между точками, используемыми в теории графов. В свою очередь, теория графов может считаться прямым продолжением кластерного анализа. *Все результаты теории графов остаются верными и применимыми в кластерном анализе.*

В первую очередь легко решается вопрос о наглядном представлении кластера. Им является *конфигурация* графа, совокупность точек (вершин) и связей между ними (*рёбер*), т. е. *сам граф.* Непосредственно по графу видно, является кластер полносвязным или неполносвязным. Подсчетом числа вершин и рёбер графа можно выразить *степень связности кластера* $k_{св}$:

$$k_{св} = \frac{l_{фак}}{l_{макс}} = \frac{l_{фак}}{C_n^2}.$$

где $l_{фак}$ — фактическое число рёбер, $l_{макс}$ — максимальное число ребер при заданном числе точек n.

Теория графов с её многовековой историей имеет многочисленные количественные характеристики графов, такие как длина *маршрута* (*пути*) от одной вершины до какой-либо другой (выраженная в *числе ребер*, а не в сумме их длин, так как в теории графов понятия длины ребра не существует!), *диаметр* графа, его *центр* (вершина, сумма путей от которой до остальных вершин минимальна), *контур* графа. Граф считается заданным, если известна его *конфигурация.* Одним из основополагающих концепций теории графов является отсутствие понятия расстояния между вершинами и, соответственно, длины ребер, т. е. метрики пространства. *Отсутствует само понятие пространства*, координат в нем, его размерности. Тем не менее конфигурация графа может быть задана однозначно *матрицей инцидентности*, или *матрицей смежности*, связывающей в систему сцепление ребер и вершин. Все это позволяет использовать теорию графов для количественной характеристики формы кластеров, которая в настоящее время находится практически на нуле. С помощью теории графов из кластерного анализа может извлекаться дополнительная информация. В теории графов соединение вершин ребрами производится, когда вершины графа *взаимодействуют* между собой. Если взаимодействие симметричное, образуется граф *неориентированный*; если оно одностороннее, то образующийся граф называется *ориентированным.*

Ориентированный граф обозначается на рисунках таким образом, что его рёбра снабжаются стрелками, направленными от действующей вершины к вершине, которая испытывает воздействие. Источник информации о направлении взаимодействия, если оно имеется, в теории графов черпается извне, как и информация о наличии *связи.*

Поначалу казалось, что в применении к кластерному анализу ориентированных графов быть не может. Однако это не так. Каждой точке может быть приписано одно из D по числу признаков или некоторая функция из некоторого числа признаков по замыслу исследователя. Например, в геохимии, по данным силикатного анализа, каждой точке может быть приписана сумма щелочей. Тогда стрелки ориентированного графа будут везде направлены от точки с большей суммой к точке с меньшей, как бы указывая пути миграции этих элементов.

В заключение отметим, что в теории графов разработаны многочисленные признаки графов, позволяющие подробно их классифицировать. На рис. 3 приведены некоторые таксоны графов, для которых читатель без труда подберет предметную интерпретацию из своей отрасли.

Литература

1. Богушевский Э. М., Канцель А. В., Коновалов И. М., Певзнер М. Н., Рожкова Г. Ф., Стороженко С. А. Проблема использования вероятностно-статистических характеристик руд для классификации и прогнозирования рудных месторождений // Применение математических методов в геологии. Алма-Ата: Наука, 1969. С. 140—141.

2. Бондаренко В. Н. Принципы и методы построения автоматизированной процедуры идентификации ассоциаций элементов-индикаторов // Автоматиз. анал. и обраб. данных геохим. поисков месторожд. М., 1987. С. 5—18.

3. Бугаец А. Н., Дорофеюк А. А., Мацак А. П. К вопросу о некоторых формальных методах и задаче классифика-

ции и разграничения геологических объектов // Геол. формации. Л., 1968.

4. Валиахметова А. Д. Кластерный анализ и классификация в геологии // Севергеоэкотех-2000: Межрегиональная молодежная научная конференция. Ухта: Ухтинский государственный технический университет, 15-17 марта 2000.

5. Воронин Ю. А. Основные результаты по простой теории классифицирования в геологии // Вычисл. центр СО АН СССР. Препр. 1981. № 315. 29 с.

6. Воронин Ю. А. Начала теории сходства. Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1989. 120 с.

7. Воронин Ю. А., Гольдина Н. А. Пример совместного упрощенного математико-логического разбора геологических классификаций // Геология и геофизика. 1965. № 2. 4 с.

8. Горбатов В. А. Основы дискретной математики: Учебное пособие для студентов вузов. М.: Высшая школа, 1986. 311 с.

9. Дмитриев А. Н., Журавлев Ю. И., Кренделев Ф. П. Об одном принципе классификации и прогнозирования геологических объектов и явлений // Геология и геофизика. 1968. № 5. С. 50—64.

10. Иванов Б. Н. Дискретная математика. Алгоритмы и программы: Учеб. пособие. М.: Лаборатория базовых знаний, 2003. 288 с.

11. Кириллова В. В., Ткачев Ю. А. Кластер: от термина свободного пользования к статистически обоснованному объекту // Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения — 2013): Материалы минералогического семинара с международным участием. Сыктывкар: Геопринт, 2013. С. 385—388.

12. Кириллова В. В., Ткачев Ю. А. Статистика кластеров в совокупности случайно размещенных точек // Там же. С. 388—390.

13. Корнеева А. В., Карлинская Р. Р. Кластерный анализ бинарных признаков и признаков, характеризуемых качественными градациями // Тр. Тбил. ун-та. 1987. 272. С. 229—243.

14. Кузнецов О. П., Адельсон-Вельский Г. М. Дискретная математика для инженера. М.: Энергоатомиздат, 1988. 480 с.

15. Новые идеи в научной классификации: коллективная монография. Вып. 5. Екатеринбург: УрО РАН, 2010. 631 с.

16. Покровский М. П. Введение в классиологию. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2014. 484 с.

17. Ткачев Ю. А. Структурно-статистический анализ пространственного взаимного расположения геологических объектов // Уральский геологический журнал. 2010. № 5. С. 53—62.

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

19. Botbol Joseph Moses. Multivariate clustering based on entropy / US Geol. Surv. Bull. 1989. № 1893, 1—30.

20. Hawrins Douglas M., Rasmussen Stephen E. <Использование дискриминантного анализа для классификации стратиграфических горизонтов в осадочных породах> J. Int. Assoc. Math. Geol. 1973, 5, №2, 163—177.

21. Men Gui Zhen. The statistical analysis in the classification of bituminous coal. «Horn: pribram vede a techn.: Symp. prac. ban. prum., 1987. Sek.: Mat. metody geol.Sb. Dil MI». S. 1., 1987, 182—188.

22. Woronow Alex. Cluster analysis. «Geobyte», 1987, 2, № 4, 34—37.

References

1. Bogushevskii E. M., Kantsel' A. V., Konovalov I. M., Pevzner M. N., Rozhkova G. F., Storozhenko S. A. *Problema ispolzovaniya veroyatnostno-statisticheskih harakteristik rud dlya klassifikatsii i prognozirovaniya rudnyh mestorozhdenii* (The problem of using probabilistic-statistical characteristics of ores for the classification and forecasting of ore deposits. In: "Application of mathematical methods in geology). Alma-Ata: Nauka, 1969, pp. 140—141.

2. Bondarenko V. N. *Printsipy i metody postroeniya avtomatizirovannoi protsedury identifikatsii assotsiatsii elementov-indikatorov. "Avtomatiz. anal. i obrab. dannyh geohim. poiskov mestorozhd"* (Principles and methods for constructing an automated procedure for identifying associations of indicator elements. "Automation. anal and processing geochemical data prospecting field). Moscow, 1987, pp. 5—18.

3. Bugaets A. N., Dorofeyuk A. A., Matsak A. P. *K voprosu o nekotoryh formal'nyh metodah i zadache klassifikatsii i razgranicheniya geologicheskih ob'ektov* (Some formal methods and the task of classifying and delimiting geological objects). In: Geol. formatsii. Leningrad, 1968, pp. 00-00.

4. Valiahmetova A. D. *Klasternyi analiz i klassifikatsiya v geologii. (Uhtinskii gosudarstvennyi tehnicheskii universitet). Mezhregional'naya molodezhnaya nauchnaya konferentsiya "Severgeoekoteh-2000"* (Cluster analysis and classification in geology. (Ukhta State Technical University). Interregional Youth Scientific Conference "Severgeoekotech-2000"), Ukhta, 15—17 March, 2000.

5. Voronin Yu. A. *Osnovnye rezul'taty po prostoi teorii klassifitsirovaniya v geologii* (Main results on a simple classification theory in geology). *"Vychisl. tsentr SO AN SSSR. Prepr.*", 1981, No. 315, 29 pp.

6. Voronin Yu. A. *Nachala teorii shodstva* (Principles of the theory of similarity). Novosibirsk, SB AS USSR, 1989, 120 pp.

7. Voronin Yu. A., Goldina N. A. *Primer sovmestnogo uproschennogo matematiko-logicheskogo razbora geologicheskih klassifikatsii* (An example of a joint simplified mathematical-logical analysis of geological classifications). Geologiya i geofizika, 1965, No. 2, 4 pp.

8. Gorbatov V. A. *Osnovy diskretnoi matematiki: Uchebnoe posobie dlya studentov vuzov* (Basics of Discrete Mathematics: A manual for university students). Moscow: Vysshaya shkola, 1986, 311 pp.

9. Dmitriev A. N., Zhuravlev Yu. I., Krendelev F. P. *Ob odnom printsipe klassifikatsii i prognozirovaniya geologicheskih ob'ektov i yavlenii* (On a principle of classification and forecasting of geological objects and phenomena). Geologiya i geofizika, 1968, No. 5, pp. 50—64.

10. Ivanov B. N. *Diskretnaya matematika. Algoritmy i programmy* (Discrete Mathematics. Algorithms and programs). Moscow: *Laboratoriya bazovyh znanii*, 2003, 288 pp.

11. Kirillova V. V., Tkachev Yu. A. *Klaster: ot termina svobodnogo pol'zovaniya k statisticheski obosnovannomu ob'ektu/ Sovremennye problemy teoreticheskoi, eksperimental'noi i prikladnoi mineralogii (Yushkinskie chteniya — 2013)* (Cluster: from the term of free use to a statistically valid object / Modern problems of theoretical, experimental and applied mineralogy (Yushkin readings — 2013). Proceedings of the mineralogical seminar with international participation. Syktyvkar: Geoprint, 2013, pp. 385—388.

12. Kirillova V. V., Tkachev Yu. A. *Statistika klasterov v sovokupnosti sluchaino razmeschennyh tochek/ Sovremennye problemy teoreticheskoi, eksperimental'noi i prikladnoi min-*

eralogii (Yushkinskie chteniya — 2013). (Statistics of clusters in aggregate of randomly placed points. Modern problems of theoretical, experimental and applied mineralogy (Yushkin readings — 2013). Proceedings of the mineralogical seminar with international participation. Syktyvkar: Geoprint, 2013, pp. 388—390.

13. Korneeva A. V., Karlinskaya R. R. *Klasternyi analiz binarnyh priznakov i priznakov, harakterizuemyh kachestvennymi gradatsiyami* (Cluster analysis of binary signs and signs characterized by qualitative gradations). Tr. Tbil. un-ta, 1987, 272, pp. 229—243.

14. Kuznetsov O. P., Adelson-Velsky G. M. *Diskretnaya matematika dlya inzhenera* (Discrete mathematics for an engineer). Moscow: Energoatomizdat, 1988, 480 pp.

15. *Novye idei v nauchnoi klassifikatsii: kollektivnaya monografiya* (New ideas in scientific classification: a collective monograph). Issue 5. Ekaterinburg: UB RAS, 2010, 631 pp.

16. Pokrovskii M. P. *Vvedenie v klassiologiyu* (Introduction to the classification). Ekaterinburg: IGG UB RAS, 2014, 484 pp.

17. Tkachev Yu. A. *Strukturno-statisticheskii analiz prostranstvennogo vzaimnogo raspolozheniya geologicheskih ob'ektov* (Structural and statistical analysis of the spatial mutual arrangement of geological objects). Uralsky geologicheskii zhurnal, No. 5, 2010, pp. 53—62.

18. Yudovich Ya. E., Ketris M. P. *Osnovy litohimii* (Basics of lithochemistry). St. Petersburg: Nauka, 2000, 479 pp.

19. Botbol Joseph Moses. Multivariate clustering based on entropy. US Geol. Surv. Bull. 1989. No 1893, 1—30.

20. Hawrins Douglas M., Rasmussen Stephen E. <*Ispol'zovanie diskriminantnogo analiza dlya klassifikatsii stratigraficheskih gorizontov v osadochnyh porodah*> J. Int. Assoc. Math. Geol. 1973, 5, No.2, 163—177.

21. Men Gui Zhen. The statistical analysis in the classification of bituminous coal. “Horn: pribram vede a techn.: Symp. prac. ban. prum., 1987. Sek.: Mat. metody geol.Sb. Dil Ml”. S. 1., 1987, 182—188.

22. Woronow Alex. Cluster analysis. “Geobyte”, 1987, 2, No. 4, pp. 34—37.

МНОГООБРАЗИЕ МИНЕРАЛЬНОГО МИРА

DIVERSITY OF MINERAL WORLD

On February 7—8, celebrating the Russian Science Day, the Institute of Geology, Komi SC UB RAS, held the action «Open Day» on the basis of the Geological Museum named after A. A. Chernov and the Laboratory of Carbon Mineralogy.

Седьмого и восьмого февраля в рамках празднования Дня российской науки в Институте геологии Коми НЦ УрО РАН на базе Геологического музея им. А. А. Чернова и лаборатории минералогии углерода прошел день открытых дверей.

Гостям представилась возможность свободного посещения экспозиций музея, расположенных в девяти выставочных залах: полезных ископаемых, минералогии, литологии, петрографии, истории геологических исследований, палеонтологии и стратиграфии, камнесамоцветного сырья и в зале «Ноев ковчег» (частная коллекция А. П. Боровинских). Основными посетителями были жители Сыктывкара старшей возрастной группы, студенты и школьники. Отличительной особенностью этого года стало посещение музея семейными группами. Этот факт позволяет сделать вывод о восприятии естественно-научного музея как объекта для семейного отдыха. Число гостей превысило 50 человек. Некоторые посетители впервые познакомились с экспозицией музея и были приятно удивлены богатству и разнообразию неживой природы. Школьники расширили свои знания о полезных ископаемых Республики Коми, узнали об интересных палеонтологических находках. Свободный доступ к крупным штуфам не оставил равнодушными маленьких посетителей. Они обнимали крупные кристаллы кварца, нюхали нефтенасыщенный песчаник и с удовольствием пробовали сереговскую соль. Особый интерес вызвал скелет тарбозавра, расположенный в зале палеонтологии, открытие которого состоялось в мае 2018 года.

8 февраля 2019 года в стенах лаборатории минералогии углерода для желающих состоялась экскурсия в чудесный мир углерода. Посетителям было предложено ознакомиться с уникальным многообразием углерода как в виде минералов, включая и сам алмаз, так и углеродосодержащих материалов.

После небольшой красочно иллюстрированной вступительной лекции были продемонстрированы ра-

Экскурсанты познают мир углерода

Visiters cognize carbon world

Школьники вместе с С. И. Исаенко проводят диагностику алмаза с помощью современного рамановского спектрометра

Pupils with S. I. Isaenko are using a modern Raman spectrometer to diagnose diamond right before eyes

Хроника

8 февраля — День российской науки

15 февраля — делегация во главе с заместителем председателя Правительства РК, министром образования, науки и молодежной политики Республики Коми Н. А. Михальченковой посетила Институт геологии Коми НЦ УрО РАН и Геологический музей им. А. А. Чернова.

20 февраля — в конференц-зале Института геологии Коми НЦ УрО РАН состоялись Февральские чтения СГУ им. Питирима Сорокина.

February 8 — Russian Science Day

Chronicle

February 15 — The delegation, led by Deputy Chairman of the Government of Komi Republic, Minister of Education, Science and Youth Policy of Komi Republic N. A. Mikhalchenkova, visited the Institute of Geology of Komi SC UB RAS and Geological Museum named after A. A. Chernov.

February 20 — February Readings of Syktyvkar State University named after Pitirim Sorokin took place in the conference hall of the Institute of Geology of Komi SC UB RAS.

В зале палеонтологии
In Hall «Paleontology»

Группа студентов в зале полезных ископаемых
Group of students in the Mineral Hall

бочие коллекции природных и искусственных алмазов, графита, алмазсодержащих пород и углеродных материалов, предоставлена возможность увидеть геологический материал на разных стадиях изучения, включая штуфные образцы, полированные пластины, шлифы и концентраты.

Особый интерес вызвал показ краткометражного фильма про синтез алмазов, где на глазах изумленных зрителей алмазы росли из газовой фазы, «как пирожки в печке». Современный рамановский спектрометр позволил моментально получить спектр алмаза и прямо на глазах произвести инструментальную диагностику разных минералов.

Школьники и их родители смогли получить первичную информацию о стадиях геолого-разведочных работ и специфике научной деятельности. Анонсированная заранее экскурсия вызвала аншлаг, сотрудники лаборатории в доступной манере посвятили в увлекательный мир многообразия углерода и выпускников школ, и малышей, и родителей, и некоторых сотрудников Института.

Акция «День открытых дверей» позволила жителям Сыктывкара приобщиться к науке, познакомиться с направлениями исследования современной геологии и познавательно провести день.

И. Астахова, Л. Жданова, Т. Шумилова

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ МУЗЕЙ ИМ. О. С. КОЧЕТКОВА

GEOLOGICAL MUSEUM NAMED AFTER O. S. KOCHETKOV

On February 7, 2019, the ceremonial opening of the reconstructed Geological Museum named after Oleg Sergeyevich Kochetkov, timed to the Rassokhinsky Memorial International Conference, took place in building L of Ukhta State Technical University.

7 февраля 2019 года в корпусе «Л» Ухтинского государственного технического университета состоялось торжественное открытие реконструированного геологического музея имени О. С. Кочеткова, приуроченное к международной конференции «Рассохинские чтения».

Геологический музей О. С. Кочеткова — второй музей Ухтинского университета. В составе уникального музейного комплекса УГТУ он более тридцати лет выполнял функции центра научных исследований и просвещения молодежи. Теперь благодаря помощи производственных партнеров университета музей обрёл второе дыхание. Его уникальная коллекция в соединении с современным оборудованием и дизайном выводит музей на новый уровень. В экспозициях геологического музея, состоящего из двух залов — «Историческая и динамическая геология» и «Минералогия» (общей площадью более 300 квадратных метров) — представлено более полутора тысяч образцов горных пород, минералов, окаменелостей.

Музей с сентября 2018 года носит имя Олега Сергеевича Кочеткова, профессора, выдающегося геолога, почти полвека отдавшего университету в Ухте, внесшему большой вклад в развитие геологического образования и, в частности, в пополнение коллекции музея. Ранее (с 1998 по 2018 годы) музей носил имя выдающегося геолога-нефтяника, Героя Социалистического Труда, лауреата Сталинских премий профессора А. Я. Кремса.

Зал «Историческая и динамическая геология» включает четыре экспозиции:

— «Историческая геология» — отражает историю развития нашей Земли от докембрия по настоящее время; показано взаимодействие четырех основных научных направлений в геологии: геохронологии, стратиграфии, палеогеографии, палеотектоники;

— «Горные породы: генезис (условия образования) и классификация» — представлена классификация магматических, метаморфических и осадочных горных пород;

— «Геологическое строение Ухтинского района» — показано строение фундамента и осадочного

чехла территории; экспозиция включает геологическую карту листа P-39-VI, геологический разрез, стратиграфическую колонку. Приведена палеонтологическая характеристика верхнего девона и верхней юры;

— «Полезные ископаемые» — представлены горючие и твердые полезные ископаемые Тимано-Печорской провинции, а также полезные ископаемые Урала, Кольского п-ова, Забайкалья, Алтая, Казахстана, Армении.

Экспозиция зала «Минералогия» посвящена введению в кристаллографию и минералогию; представлена кристаллохимическая классификация минералов и рассмотрены основные формы нахождения минералов в природе (друзы, секреции, конкреции, дендриты, натечные формы и др.) и их физические свойства (механические, оптические). Экспозицию украшает коллекция агатов Северного Тимана и классификация самоцветов.

Выступление Главы РК С. А. Гапликова и президента УГТУ Н. Д. Цхадая

Speech by Head of KR S. A. Gaplikov and President of Ukhta University N. D. Tskhaday

На церемонии открытия реконструированного музея присутствовали первые лица республики, города и партнеры вуза: Глава Республики Коми С. А. Гапликов, министр культуры, туризма и архивного дела Республики Коми С. В. Емельянов, председатель попечительского совета УГТУ, председатель комиссии Общественной палаты России по ЖКХ, строительству и дорогам, президент Союза городов Заполярья и Крайнего Севера России И. Л. Шпектор, генеральный директор ООО «Газпром трансгаз Ухта» А. В. Гайворонский, заместитель генерального директора по управлению персоналом ООО «Газпром трансгаз Ухта» Е. В. Гусев, генеральный директор АО «Транснефть-Север» Р. Р. Исламов, президент Ассоциации строителей газовых и нефтяных комплексов Б. В. Будзуляк, президент УГТУ профессор Н. Д. Цхадая, руководитель администрации МОГО «Ухта» М. Н. Османов и другие.

Приветствуя собравшихся гостей, Глава Республики Коми С. А. Гапликов поблагодарил партнёров за оказание всесторонней поддержки в развитии материально-технической базы университета: «Я хочу сказать спасибо партнерам за участие в создании уникального музея. Это действительно большой подарок для города», — подчеркнул Сергей Анатольевич. — Хотелось бы вспомнить Николая Николаевича Герасимова — бывшего министра промышленности, транспорта и энергетики Республики Коми, заслуженного геолога Российской Федерации, который совсем недавно ушел от нас. Он создал уникальную геолого-минералогическую базу для нашей республики и страны. Здесь есть и его участие, и его заслуги».

К гостям обратился председатель попечительского совета УГТУ, президент Союза городов Заполярья и Крайнего Севера России И. Л. Шпектор: «Это уникальный музей, сделанный со вкусом. Хочу заметить: всё, что делается в Ухтинском университете, делается с изумительным стилем и на долгие-долгие годы. Я убежден: этот музей захочет посетить каждый житель нашей республики!».

К приветствиям присоединился президент УГТУ, профессор Н. Д. Цхадая: «Я искренне признателен генеральному директору ООО «Газпром трансгаз Ухта» Александру Викторовичу Гайворонскому и генеральному директору ООО «Нерудпром» Виктору Евгеньевичу Ипполитову. Я признателен сотрудникам, преподавателям, которые каждый день приходили с новыми идеями, и в итоге мы возродили такой музей!». Президент УГТУ выразил также благодарность дизайнеру обновленного геологического музея Наталье Дереглазовой, которая создала эскизы и помогла воплотить все идеи в жизнь, и директору музея Юлии Михайленко.

Общий вид зала музея / General view of the museum hall

Генеральный директор ООО «Газпром трансгаз Ухта» А. В. Гайворонский сделал акцент на том, что реконструированный геологический музей им. О. С. Кочеткова станет новой визитной карточкой университета, города и республики, и преподнес подарок в виде необычного и редкого камня. «Камни и минералы — это самое главное в истории геологов. Пусть этот камень пополнит коллекцию и украсит ваш прекрасный геологический музей», — пожелал А. В. Гайворонский.

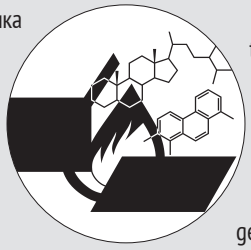
Со знаменательным событием УГТУ поздравил президент Ассоциации строителей газового и нефтяного комплексов Б. В. Будзуляк. Он отметил, что подобные проекты не только повышают статус университета и города, но и помогают не забывать о своей истории. К поздравлениям присоединилась директор Института геологии, нефтегазодобычи и трубопроводного транспорта Н. П. Демченко.

После торжественного открытия директор Геологического музея им. О. С. Кочеткова Ю. В. Михайленко провела ознакомительную экспресс-экскурсию по обновленным залам и кратко рассказала о структуре и составе фондов музея.

Завершая мероприятие, заведующий кафедрой поисков и разведки месторождений полезных ископаемых В. Б. Ростовщиков отметил, что теперь у Жемчужины Севера появилась своя «жемчужина геологии», и еще раз поблагодарил всех спонсоров и коллег университета за такой прекрасный подарок.

Ю. Михайленко

АНОНС КОНФЕРЕНЦИИ



1–3 октября 2019 г. Институт геологии имени академика Н. П. Юшкина и Научный совет РАН по проблемам геологии и разработки месторождений нефти, газа и угля проводит Всероссийскую научную конференцию **«ГЕОХИМИЯ НЕФТИ И ГАЗА, НЕФТЕМАТЕРИНСКИХ ПОРОД, УГЛЯ И ГОРЮЧИХ СЛАНЦЕВ»**, цель которой – представление и анализ последних достижений в области геохимии ископаемого органического вещества, нефти, газа, угля и горючих сланцев.

НАУЧНАЯ ПРОГРАММА:

- Углеводороды – биомаркеры нефти и органического вещества нефтематеринских пород, углей и горючих сланцев
- Структура гетероатомных и высокомолекулярных компонентов современных осадков, ископаемого органического вещества осадочных пород и нефтей
- Моделирование процессов нефтегазообразования и метаморфизма углей
- Получение обеззоленных топлив
- Геохимия твердых битумов
- Геохимия стабильных изотопов ископаемого органического вещества пород, нефтей и газов
- Геохимия микроэлементов ископаемого органического вещества
- Углепетрографические методы исследования

КОНТРОЛЬНЫЕ СРОКИ

Представление заявок: до 1 апреля
Прием тезисов докладов: до 1 июня
Рассылка программы: до 5 сентября
Заезд и регистрация участников: 30 сентября
Открытие конференции: 1 октября

КОНТАКТЫ

ИГ Коми НЦ УрО РАН ул. Первомайская, д. 54, Сыктывкар, 167982
(8212) 24-53-53 – приемная директора
(8212) 44-71-51 – Козырева Ирина Владимировна
(ученый секретарь Института геологии)
Факс: (8212) 24-09-70; 24-53-46
E-mail: geochemistry_2019@geo.komisc.ru –
Бурдельная Надежда Степановна

CONFERENCE ANNOUNCEMENT

October 1–3, 2019, the Institute of Geology named after Academician N. P. Yushkin and the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on the problems of geology and development of oil, gas and coal deposits will held All-Russian Scientific Conference **«GEOCHEMISTRY OF OIL AND GAS, OIL SOURCE ROCKS, COAL AND OIL SHALES»**, to aim at the presentation and analysis of recent achievements in the field of geochemistry of fossil organic matter, oil, gas, coal and oil shales.

SCIENTIFIC PROGRAM:

- Hydrocarbons – biomarkers of oil and organic matter of source rocks, coal and oil shales
- Structure of heteroatomic and high-molecular components of modern sediments, fossil organic matter of sedimentary rocks and oils
- Modeling of oil and gas formation and coal metamorphism
- Production of ash free fuels
- Geochemistry of solid bitumen
- Geochemistry of stable isotopes of fossil organic matter of rocks, oils and gases
- Geochemistry of microelements of fossil organic matter
- Coal-petrographic research methods

DEADLINES

Application submission: April 1
Thesis submission: June 1
Program mailing: September 5
Arrival and registration of participants: September 30
Conference opening: October 1

CONTACTS

Institute of Geology Komi SC UB RAS, 54,
Pervomayskaya st., Syktyvkar, 167982
+7 (8212) 24-53-53 – Director Reception,
+7 (8212) 44-71-51 – Kozyreva Irina Vladimirovna
(Science Secretary of the Institute of Geology)
Fax: +7 (8212) 24-09-70; 24-53-46
E-mail: geochemistry_2019@geo.komisc.ru –
Burdelnaya Nadezhda Stepanovna

Ответственный за выпуск: Ю. В. Денисова

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

Компьютерная верстка: А. Ю. Перетягин

Свид. о рег. средства массовой информации ПИ № ФС77-56817 от 29.01.2014, выданное Роскомнадзором.
Отпечатано: 5.04.2018. Формат бумаги 60×84 1/8. Печать RISO. Усл. п. л. 7,0. Тираж 140. Заказ 1107.
Учредитель: ИГ Коми НЦ УрО РАН, обособленное подразделение ФИЦ Коми НЦ УрО РАН.
Адрес: 167982, Республика Коми, Сыктывкар, Первомайская, 54.
Редакция, издательство, типография: издательско-информационный отдел Института геологии Коми НЦ УрО РАН.
Адрес: 167982, Республика Коми, Сыктывкар, Первомайская, 54. Тел.: (8212) 24-51-60. E-mail: *vestnik@geo.komisc.ru*
На обложке использованы фото Н. Ковальчук, Е. Кушмановой, Ю. Голубевой, Ю. Глухова