



Vestnik of Geosciences

Вестник геонаук

Август
August
2025,
№ 8 (368)

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

Главный редактор *А. М. Асхабов*

Зам. главного редактора *И. Н. Бурцев*

Зам. главного редактора *О. Б. Котова*

Ответственный секретарь *И. В. Козырева*

Редакционный совет

Л. Н. Андреичева, Сыктывкар, Россия

А. И. Антошина, Сыктывкар, Россия

Т. М. Безносова, Сыктывкар, Россия

М. А. Богдасаров, Брест, Беларусь

М. А. Т. М. Броекман, Тронхейм, Норвегия

Д. А. Бушнев, Сыктывкар, Россия

Ю. Л. Войтековский, Апатиты, Россия

А. Д. Гвишиани, Москва, Россия

В. А. Жемчугова, Москва, Россия

А. В. Журавлев, Сыктывкар, Россия

Д. А. Зедгенизов, Екатеринбург, Россия

В. А. Каширцев, Новосибирск, Россия

М. Комак, Любляна, Словения

С. В. Кривовичев, Санкт-Петербург, Россия

С. К. Кузнецов, Сыктывкар, Россия

Н. А. Малышев, Москва, Россия

М. Мартинс, Ору-Прету, Бразилия

Т. П. Майорова, Сыктывкар, Россия

П. Мянник, Таллин, Эстония

А. И. Николаев, Апатиты, Россия

Б. М. Осовецкий, Пермь, Россия

Ю. Ф. Патраков, Кемерово, Россия

И. В. Пеков, Москва, Россия

Д. В. Пономарев, Сыктывкар, Россия

Д. Ю. Пущаровский, Москва, Россия

А. М. Пыстин, Сыктывкар, Россия

Ш. Сун, Мианьян, Китай

К. М. Соджа, Гамильтон, Нью-Йорк, США

О. В. Удоратина, Сыктывкар, Россия

М. А. Федонкин, Москва, Россия

А. Г. Шеломенцев, Екатеринбург, Россия

Технический редактор *Г. Н. Каблис*

Заведующий редакцией *Т. А. Некучаева*

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

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

Предыдущее название:

Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН

Двухлетний импакт-фактор
РИНЦ журнала (2024) – 0.462



geo.komisc.ru/vestnik

SCIENTIFIC JOURNAL

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

Former title:

Vestnik of Institute of Geology of Komi SC UB RAS

Two-year RSCI
impact factor (2024) – 0.462

Содержание**Content****Научные статьи****Scientific articles**

Диссимметризация в минералах группы эвдиалита. VI. Особенности $P3$ -модели аналога высококальциевого эвдиалита из массива Тамазерт (Марокко) <i>Р. К. Расцветаева, В. М. Гридинина, Н. В. Чуканов, С. М. Аксенов</i>	3	Dissymmetrization in eudialyte-group minerals. VI. Features of $P3$ -model structure of the high calcium eudialyte analogue from the Tamazert massif (Marocco) <i>R. K. Rastsvetaeva, V. M. Gridchina, N. V. Chukanov, S. M. Aksenov</i>	3
Мониторинг постсезонных изменений русла с применением БПЛА <i>З. Ж. Гергокова</i>	9	Monitoring post-torrential riverbed changes using UAV technology <i>Z. Zh. Gergokova</i>	9
Мел-палеогеновые ископаемые смолы Якутии: молекулярный состав и термические свойства <i>О. В. Мартиросян, М. А. Богдасаров</i>	14	Cretaceous-Paleogenetic fossil resins of Yakutia: molecular composition and thermal properties <i>O. V. Martirosyan, M. A. Bogdasarov</i>	14
Оценка степени перекристаллизации карбонатов по шлифам на основе машинного обучения <i>А. В. Журавлев</i>	25	Estimation of the degree of recrystallisation of carbonates based on machine learning using thin sections <i>A. V. Zhuravlev</i>	25

Хроника, события, факты**Chronicle, events, facts**

Государственная регистрация результатов интеллектуальной деятельности в 2025 году	31	State registration of intellectual devilerables in 2025	31
База данных фондов Геологического музея им. А. А. Чернова	31	A. A. Chernov Geological Museum database	31
Приложение для получения кинетических данных по изображениям атомно-силовой микроскопии роста кристаллов в растворе....	33	Application for kinetic data from atomic force microscopy images of crystal growth in solution	33
Новые издания	35	New publications	35

Правила
оформления
статьей



Vestnik
article
Formatting



Диссимметризация в минералах группы эвдиалита.

VI. Особенности $P3$ -модели аналога высококальциевого эвдиалита из массива Тамазерт (Марокко)

Р. К. Расцветаева¹, В. М. Гридчина¹, Н. В. Чуканов², С. М. Аксенов^{3,4}

¹ НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия, *rast.crys@gmail.com*

² ФИЦ проблем химической физики и медицинской химии РАН, Черноголовка, Россия

³ Лаборатория арктической минералогии и материаловедения,

ФИЦ Кольский научный центр РАН, Апатиты, Россия

⁴ Геологический институт ФИЦ Кольский научный центр РАН, Апатиты, Россия

Методом монокристального рентгеноструктурного анализа изучена кристаллическая структура представителя группы эвдиалита из массива Тамазерт (Марокко) с химическим составом следующей стехиометрии (по данным электронно-зондовых анализов и хроматографического анализа CO_2 в расчете на 26 атомов Si + Nb, $Z = 3$): $Na_{8.1}K_{0.45}Ln_{0.6}Ca_{7.2}Mn_{2.2}Fe_{1.5}Zr_{3.1}Nb_{0.8-0.9}Si_{25.1-25.2}Cl_{0.3}(CO_3)_{0.4}$. Минерал является фрагментом монокристалла изученного ранее потенциально нового высококальциевого минерала группы эвдиалита со сложной ростовой зональностью, отличаясь от него повышенным содержанием кальция, натрия и ниобия. Параметры элементарной ячейки: $a = 14.1530(1)$, $c = 30.0801(2)$ Å, $V = 5218.1(5)$ Å³, пр. гр. $P3$. Модель кристаллической структуры минерала, содержащая 163 позиции, уточнена до итогового фактора расходимости $R = 5.48\%$ с использованием 4 644 независимых отражений с $c F > 3\sigma(F)$. Переход от «классической» ромбоэдрической R -решетки в примитивную позволил установить детали упорядочения внекаркасных катионов, понижающих симметрию.

Ключевые слова: группа эвдиалита, кристаллическая структура, ключевые позиции, примитивная элементарная ячейка, массив Тамазерт (Марокко)

Dissymmetrization in eudialyte-group minerals.

VI. Features of $P3$ -model structure of the high calcium eudialyte analogue from the Tamazert massif (Marocco)

Р. К. Rastsvetaeva¹, В. М. Gridchina¹, Н. В. Chukanov², С. М. Aksenov^{3,4}

¹ SRC “Kurchatov institute”, Moscow, Russia

² FRC of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry, RAS, Chernogolovka, Russia

³ Laboratory of Arctic Mineralogy and Material Sciences, Kola SC RAS, Apatity, Russia

⁴ Geological Institute, Kola SC RAS, Apatity, Russia

Crystal structure of a high calcium eudialyte group member from the Tamazert massif, Morocco, with the following stoichiometry (calculated on 26 atoms Si + Nb, $Z = 3$): $Na_{8.1}K_{0.45}Ln_{0.6}Ca_{7.2}Mn_{2.2}Fe_{1.5}Zr_{3.1}Nb_{0.8-0.9}Si_{25.1-25.2}Cl_{0.3}(CO_3)_{0.4}$ by X-ray has been studied. The studied mineral is a fragment of a crystal of potentially new high calcium mineral with a complex growth zoning studied earlier. It differs from the latter by higher contents of Ca, Na and Nb. The unit-cell parameters are: $a = 14.1530(1)$ Å, $c = 30.0801(2)$ Å, $V = 5218.1(5)$ Å³, space group $P3$. The structural model characterized by 163 crystallographic sites is refined to $R = 5.48\%$ using 4644 independent reflections with $c F > 3\sigma(F)$. The cation distribution over the key sites in the frame of the low symmetry (space group $P3$) is more detailed as compared to the classical model with rhombohedral R -symmetry.

Keywords: eudialyte group, crystal structure, key positions, primitive cell, Tamazert massif, Morocco

Введение

Симметрия сложных микропористых цирконо- и титаносиликатов зависит от характера упорядочения преимущественно внекаркасных катионов и анионов по позициям крупных пустот и широких канан-

лов. При этом возможно уточнение их кристаллических структур в рамках нескольких пространственных групп (пр. гр.) и выбор моделей структуры с разной степенью детализации. Примером разнообразия кристаллохимических моделей в рамках нескольких

Для цитирования: Расцветаева Р. К., Гридчина В. М., Чуканов Н. В., Аксенов С. М. Диссимметризация в минералах группы эвдиалита. VI. Особенности $P3$ -модели аналога высококальциевого эвдиалита из массива Тамазерт (Марокко) // Вестник геонаук. 2025. 8(368). С. 3–8. DOI: 10.19110/geom.2025.8.1

For citation: Rastsvetaeva R. K., Gridchina V. M., Chukanov N. V., Aksenov S. M. Dissymmetrization in eudialyte-group minerals. VI. Features of $P3$ -model structure of the high calcium eudialyte analogue from the Tamazert massif (Marocco). Vestnik of Geosciences, 2025, 8(368), pp. 3–8. DOI: 10.19110/geom.2025.8.1

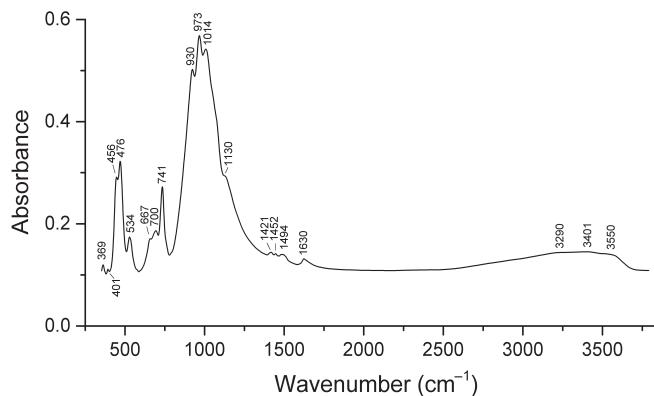


Рис. 1. ИК-спектр изученного минерала
Fig. 1. IR spectrum of the studied mineral

пр. гр. ($R-3m$, $R\bar{3}m$, $R3$ и $P3$) является широко распространенный породообразующий минерал агпайтовых нефелиновых сиенитов — цирконосиликат эвдиалит с идеализированной формулой:

$Ni-Na_{15}^{+} Ca_{16}^{2+} Fe^{2+} Zr_3^{4+} [Si(OH)]_2 [Si_9O_{27}]_2 [Si_5O_9]_2 (Cl, H_2O)_2$. Его структура характеризуется сложным гетерополиэдрическим каркасом состава $[Ca_6Zr_3[Si_5O_9]_2[Si_9O_{27}]_2]^{24-}$ из кремнекислородных тетраэдрических колец двух типов, объединенных изолированными октаэдрами циркония и уникальными шестичленными кольцами реберно связанных октаэдров кальция, пустоты которого заполнены переменным числом катионов разных размеров и зарядов, а также крупных анионов, анионных групп и молекул воды (Расцветаева и др., 2012; Johnsen et al., 1999a).

Для формирования шестичленных колец октаэдров CaO_6 в структуре минералов группы эвдиалита (МГЭ) необходимо и достаточно содержания 9–10 мас. % CaO (отношение $Ca/Zr = 2$), а структура описывается пр. гр. $R\bar{3}m$ (или $R-3m$), в рамках которой содержится одна независимая позиция Ca . Однако МГЭ характеризуются широкими вариациями состава, в том числе Ca .

В минералах с повышенным содержанием Ca при содержании $CaO > 15$ мас. % ($Ca/Zr > 2$, вплоть до $Ca/Zr = 3$) атомы Ca не только полностью заселяют октаэдры шестичленного кольца, но и доминируют в одной или двух внекаркасных позициях. Известны три эвдиалита с повышенным содержанием Ca , найденные в карбонатитах Ковдорского массива — фекличевит, голышевит и моговидит (Расцветаева и др., 2012), структура которых характеризуется пр. гр. $R\bar{3}m$.

Однако при более низком содержании Ca (до 3–6 мас. % CaO , $Ca/Zr = 1$, вплоть до 1/3) он преобладает только в трех октаэдрах кольца, в то время как в трех других размещаются заменяющие его Fe , Mn , Ln , Sr , Na и ряд других катионов, что нарушает зеркальную плоскость m и приводит к понижению симметрии до $R3$. Таких минералов в группе эвдиалита известно шесть — онейллит (Johnsen et al., 1999b), раслакит и воронковит (Расцветаева и др., 2012), а также открытые за последние пять лет сэлсуртит (Chukanov et al., 2023), сергеванит (Chukanov et al., 2020) и амаблит-(Ce) (Chukanov et al., 2024). Они относятся к структурному типу онейллита, который характеризуется наличием

двух независимых позиций в октаэдрах шестичленных колец с доминированием Ca в одной и смешанным составом в другой.

Можно отметить, что не только в низкокальциевых эвдиалитах, но и в ряде других (например, гидратированных) возможно описание структуры в рамках $R\bar{3}$ -симметрии из-за упорядочения внекаркасных катионов. Более того, как показали наши недавние исследования ряда низкокальциевых МГЭ, в эвдиалитах возможно и дальнейшее понижение симметрии с переходом от «классической» ромбоэдрической R -решетки к примитивной P -решетке (пр. гр. $P3$).

Поскольку за счет диагональной R -трансляции все три оси третьего порядка взаимозависимы и состав вокруг оси $[00z]$ повторяется трижды со сдвигом вдоль осей на 1/3 и 2/3, ряд позиций в рамках высокой симметрии характеризуется смешанным составом, что не позволяет судить о деталях распределения катионов по индивидуальным позициям. Понижение симметрии в ряде низкокальциевых эвдиалитов позволило получить дополнительную информацию о распределении индивидуального катионного состава по позициям шестичленных колец вокруг трех кристаллографически независимых осей третьего порядка, а также в позициях между трансляционно идентичными шестичленными кольцами (Расцветаева и др., 2024a, 2024b; Rastsvetaeva, 2024).

Если понижение симметрии в низкокальциевых эвдиалитах вызвано главным образом упорядочением катионов в октаэдрах шестичленных колец вокруг трех кристаллографически независимых осей третьего порядка, то при однотипности колец в высококальциевых минералах понижение симметрии может быть связано с упорядочением сложного катионного состава по внекаркасным позициям крупных полостей. Нами была впервые изучена структура высококальциевого минерала из щелочного пегматита Тамазерт (Марокко) (Расцветаева и др., 2025), позволившая в рамках $P\bar{3}$ -модели установить закономерности упорядочения катионов не только в позициях октаэдров шестичленных колец, но и во внекаркасных позициях структуры. Эти результаты обсуждаются в настоящей статье по исследованию его «высокониобиевого» аналога с повышенным содержанием Ca , Na и Nb .

Объект и методы исследования

Образец МГЭ, изученный в настоящей работе, найден в щелочном пегматите массива Тамазерт (Марокко). Этот массив охарактеризован в ряде работ (например, Bouabdli et al., 1988). Здесь кристаллы и зерна изучаемого образца неоднородны по химическому составу и содержат зоны, различающиеся содержанием ниобия (0.6 и 0.8–0.9 атомов) и ряда других элементов. Наиболее низкониобиевый фрагмент монокристалла изучался нами ранее (Расцветаева и др., 2025), а в настоящей работе исследовался фрагмент монокристалла с более высоким содержанием ниобия, менее гидратированный и, соответственно, более высоконатриевый.

Химический состав минерала определен методами электронно-зондового микронализа и газовой хроматографии (для CO_2) и соответствует следующей



стехиометрии (в расчете на 25 атомов Si, Z = 3): $\text{Na}_{8.1}\text{K}_{0.45}\text{Ln}_{0.6}\text{Ca}_{7.2}\text{Mn}_{2.2}\text{Fe}_{1.5}\text{Zr}_{3.1}\text{Nb}_{0.8-0.9}\text{Si}_{25.1-25.2}\text{Cl}_{0.5}(\text{CO}_3)_{0.4}$.

ИК-спектр минерала (рис. 1), предварительно расщепленного в агатовой ступке и запрессованного в таблетку с KBr, снят на фурье-спектрометре ALPHA FTIR (Bruker Optics, Германия) в диапазоне волновых чисел 360–3800 cm^{-1} при разрешающей способности 4 cm^{-1} и числе сканирований, равном 16. В качестве образца сравнения использовалась аналогичная таблетка из чистого KBr.

В ИК-спектре изученного в настоящей работе минерала присутствуют полосы основных OH-групп (при 3550 cm^{-1}), молекул воды (при 3401 и 1630 cm^{-1}), кислотных OH-групп, предположительно относящихся к ионам оксония (при 3290 cm^{-1}), карбонатных анионных групп (в диапазоне 1420–1500 cm^{-1}), Si-O-валентных колебаний колец тетраэдров (в диапазоне 970–1130 cm^{-1}) и дополнительных тетраэдров SiO_4 , центрирующих девятичленные кольца (при 930 cm^{-1}), а также валентных колебаний связей (Fe, Mn)-O (при 534 cm^{-1}). Остальные полосы в диапазоне 360–800 cm^{-1} относятся к деформационным колебаниям кремнекислородных колец.

Полный прецизионный эксперимент выполнен при комнатной температуре с помощью монокристалльного рентгеновского дифрактометра Rigaku XtaLAB Synergy-DW с изогнутым детектором счета фотонов HyPix-Arc 150° (MoK_α -излучение) в диапазоне 2θ от 1.66 до 70.21° ($-37 \leq h \leq 37$; $-36 \leq k \leq 37$; $-77 \leq l \leq 79$). Измеренные параметры элементарной ячейки составили: $a = 14.1530(1)$, $c = 30.0801(2)$ Å, $V = 5218.1(5)$ Å³. Интегрирование массива из 1 954 094 дифракционных отражений, коррекция на фактор Лоренца и поляризацию излучения проводились с использованием комплекса программ CrysAlis Pro 1.171.43.105a (Rigaku Oxford Diffraction, 2022). Модель структуры из 163 позиций в пр. гр. Р3 была получена с помощью процедуры «коррекции фаз», разработанной в рамках программы AREN (Андреанов, 1987). При этом в качестве стартового набора использованы координаты 34 позиций каркаса фекличевита, наиболее близкого по составу высококальциевого эвдиалита. После распределения элементов по позициям в соответствии с данными химического состава и уточнения модели до 7 % часть позиций (расщепленных и с неполной заселенностью) были найдены из серии разностных синтезов электронной плотности. В результате изотропно-анизотропного уточнения всей модели R-фактор снизился до 5.48 % (4 644 отражений с $F > 3\sigma(F)$). Все расчеты выполнены с использованием системы кристаллографических программ AREN (Андреанов, 1987).

В таблицах 1 и 2 приводятся уточненные структурные параметры позиций катионов и характеристики их координационных полизэдров для некоторых ключевых фрагментов структуры, понижающих симметрию минерала.

Обсуждение результатов

Изученные нами «низкониобиевые» и «высокониобиевые» фрагменты кристалла из пегматитов Марокко — следствие ростовой зональности минерала, причём не концентрической, как обычно, а мозаичной. Механизм её образования не вполне понятен.

При раздавливании кристалл, скорее всего, распадается вдоль границ между зонами, и хотя визуально фрагменты разного состава и разной структуры идентичны, тем не менее эти фрагменты различаются как по составу, так и по упорядочению катионов в позициях структуры.

В «высокониобиевом» марокканском эвдиалите содержится более семи атомов Ca и двух атомов Mn, что предполагает доминирование Ca во всех независимых октаэдрах шестичленного кольца и присутствие в структуре трех однотипных [Ca-Ca] шестичленных колец. Однако исследование в рамках симметрии Р3 показало, что это не совсем так (табл. 1). С учетом количества электронов и величины атомных смещений в одной из шести независимых позиций установлено замещение кальция марганцем, и таким образом, в данной структуре только два шестичленных кольца имеют состав [Ca-Ca], а третья кольцо — онейлитового типа, состоящее из чередующихся Ca- и Mn-октаэдров. Подобное частичное замещение кальция марганцем в шестичленном кольце, по-видимому связанное с марганцевой минерализацией массива, установлено ранее и в «низкониобиевом» фрагменте, с той лишь разницей, что кольца онейлитового типа [Ca-Mn] в обоих фрагментах приурочены к разным осям третьего порядка (рис. 2).

Хотя присутствие кольца состава [Mn-Ca] вызывает локальное нарушение R-решетки, основной вклад в понижение симметрии данного минерала, аналогично изученному ранее, вносит упорядочение крупных катионов по внекаркасным N1–N4-позициям (шарики на рис. 2) между послойно расположенными шестичленными кольцами и изолированными Zr-октаэдрами. Эти позиции в большинстве представителей группы эвдиалита заполнены атомами Na и H_3O . Причем полизэдры N3 и N4, примыкающие к шестичленным кольцам, наиболее изоморфно-емкие и могут концентрировать еще и Ca, Sr, K, Ln. В высококальциевых эвдиалитах они заполняются преимущественно кальцием, формируя совместно с октаэдрами шестеричного кольца тройной кальциевый слой. Однако в данной структуре этот слой гетерогенный и включает октаэдры с доминированием La. Более крупный 7-вершинник занят атомами K со средним расстоянием K—O = 2.69 Å. Такие же полизэдры найдены и в Nb-дефицитном аналоге, однако их положение взаимно обратное. Кроме того, CO_3 -группа на оси третьего порядка, объединяющая по три La-полизэдра в кластеры, в данном фрагменте отсутствует, а в калиевом 7-вершиннике такую объединяющую роль играет анион Cl. Избыточный Ca (два атома, не вошедшие в шестичленные кольца) также образует семивершинники. Однако их положение существенно иное: они занимают N3- и N4-позиции в отличие от структуры Nb-дефицитного аналога с Ca в позициях N1 и N2, примыкающих к изолированным Zr-октаэдрам и занятых атомами Na.

В связи с меньшей степенью гидратированности в данном образце часть позиций H_3O занята атомами Na (рис. 2).

Как и в Nb-дефицитном образце, в структуре данного минерала октаэдры Nb и тетраэдры Si статистически чередуются в позициях M3 и M4 на оси третьего порядка вблизи центров 9-членных кремнекислородных колец, но с более высоким коэффициентом за-

Таблица 1. Координаты, параметры атомных смещений ($B_{\text{экв/изо}}$, \AA^2), кратность (Q) и заселенность в некоторых ключевых позициях структуры

Table 1. Atom coordinates, isotropic atomic displacement parameters ($B_{\text{eq/iso}}$, \AA^2) multiplicity (Q) and composition in some key-sites

Позиция Site	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	Q	$B_{\text{экв/изо}}^*$ $B_{\text{eq/iso}}^*$	Состав Composition
Z1	-0.0034(2)	0.5020(2)	0.5001(1)	3	1.75(5)	Zr
Z2	0.3389(2)	0.1684(2)	0.1685(1)	3	1.30(5)	Zr
Z3	0.1669(2)	0.3390(2)	0.8342(1)	3	1.16(5)	Zr
M1.1	0.0052(3)	0.2645(3)	0.0003(1)	3	1.3(1)	Ca
M1.2	0.6694(5)	0.5978(4)	0.3340(1)	3	1.9(1)	Ca
M1.3	0.0709(3)	0.3993(3)	0.6665(1)	3	1.3(1)	Ca
M1.4	0.2530(2)	0.2569(2)	0.0005(1)	3	0.80(3)	Mn
M1.5	0.3908(3)	0.3311(4)	0.3335(1)	3	1.5(1)	Ca
M1.6	0.3271(3)	0.4036 (3)	0.6667(1)	3	1.3(1)	Ca
M2.1a	0.308(1)	0.1707(8)	0.6617(3)	3	2.22(6)*	Fe _{0.5}
M2.1b	0.3877(7)	0.1959(6)	0.6715(2)	3	2.2(1)	Mn _{0.5}
M2.2	0.1681(6)	0.3411(7)	0.3336(2)	3	2.8(1)	Fe
M2.3	0.5126(2)	0.0342(2)	-0.0004(1)	3	1.2(1)	Mn
M3.1a	0	0	0.6087(2)	1	2.6(1)	Nb _{0.4}
M3.1b	0	0	0.639(1)	1	2.2(2)*	Nb _{0.2}
M3.1c	0	0	0.558(1)	1	2.8(3)*	Nb _{0.1}
M3.2	0.3334	0.6667	0.2963(3)	1	2.3(1)	Nb _{0.4}
M3.3	0.6667	0.3334	0.9616(3)	1	2.0(2)	Nb _{0.3}
M4.1	0	0	0.3846(2)	1	2.9(3)	Nb _{0.2}
M4.2	0.3334	0.6667	0.0364(2)	1	2.1(1)	Nb _{0.5}
M4.3	0.6667	0.3334	0.7048(3)	1	2.5(1)	Nb _{0.4}
N3.2	0.2324(4)	0.4652(4)	0.9516(1)	3	1.8(1)	Ca
N3.3	0.5639(4)	0.4319(4)	0.6189(1)	3	2.2(1)	Ca
N4.1	0.075(2)	0.160(3)	0.727(1)	3	3.7(2)*	K _{0.4}
N4.3	0.4687(2)	0.2355(2)	0.0485(1)	3	3.9(3)	La _{0.6}
Cl	0	0	0.7794(9)	1	4.3(3)	Cl _{0.5}

Таблица 2. Состав ($Z = 1$) в некоторых ключевых позициях и характеристики координационных полиэдров катионов

Table 2. Composition ($Z = 1$) in some key sites and characteristics of cationic coordination polyhedra

Позиция Site	Состав Composition	КЧ / CN	Расстояния катион – анион (\AA) / Cation – anion distances (\AA)		
			Минимальное / Minimal	Максимальное / Maximal	Среднее / Mean
Z1	Zr3	6	2.05(1)	2.11(1)	2.08
Z2	Zr3	6	1.94(1)	2.13(2)	2.06
Z3	Zr3	6	2.04(2)	2.19(2)	2.08
M1.1	Ca3	6	2.17(1)	2.45(1)	2.28
M1.2	Ca3	6	2.17(2)	2.45(1)	2.32
M1.3	Ca3	6	2.27(1)	2.45(3)	2.36
M1.4	Mn3	6	2.18(1)	2.37(1)	2.30
M1.5	Ca3	6	2.08(2)	2.45(1)	2.30
M1.6	Ca3	6	2.00(1)	2.50(1)	2.33
M2.1a	Fe1.5	5	1.90(2)	2.31(2)	2.09
M2.1b	Mn1.5	4	2.04(2)	2.24(2)	2.14
M2.2	Fe3	4	1.96(1)	2.31(2)	2.14
M2.3	Mn3	5	2.03(2)	2.42(2)	2.21
N3.2	Ca3	7	2.37(4)	2.94(1)	2.75
N3.3	Ca3	7	2.43(1)	2.90(1)	2.69
N4.1	K1.2	7	2.51(3)	2.85(3)	2.69
N4.3	La1.8	9	2.49(2)	2.99(2)	2.59

КЧ – координационное число; CN – coordination number.

полнения октаэдров и меньшим – тетраэдров. В отличие от Nb-дефицитного образца позиция *M3.1* на оси [00z] расщеплена на три (табл. 2). Суммарная заселенность этой позиции максимальная и составляет 0.7 Nb, а позиция Si вакансия, что также является существенным фактором, понижающим симметрию мине-

рала. Вакансия Si в *M3*-позиции наблюдалась и в другом фрагменте, но не на оси [2/3 1/3 z], а на [00z]-оси.

Можно отметить, что в целом заполнение позиций в «высокониобиевом» фрагменте более упорядочено, без смешанной заселенности и с минимальным количеством расщепленных позиций, что, возможно,

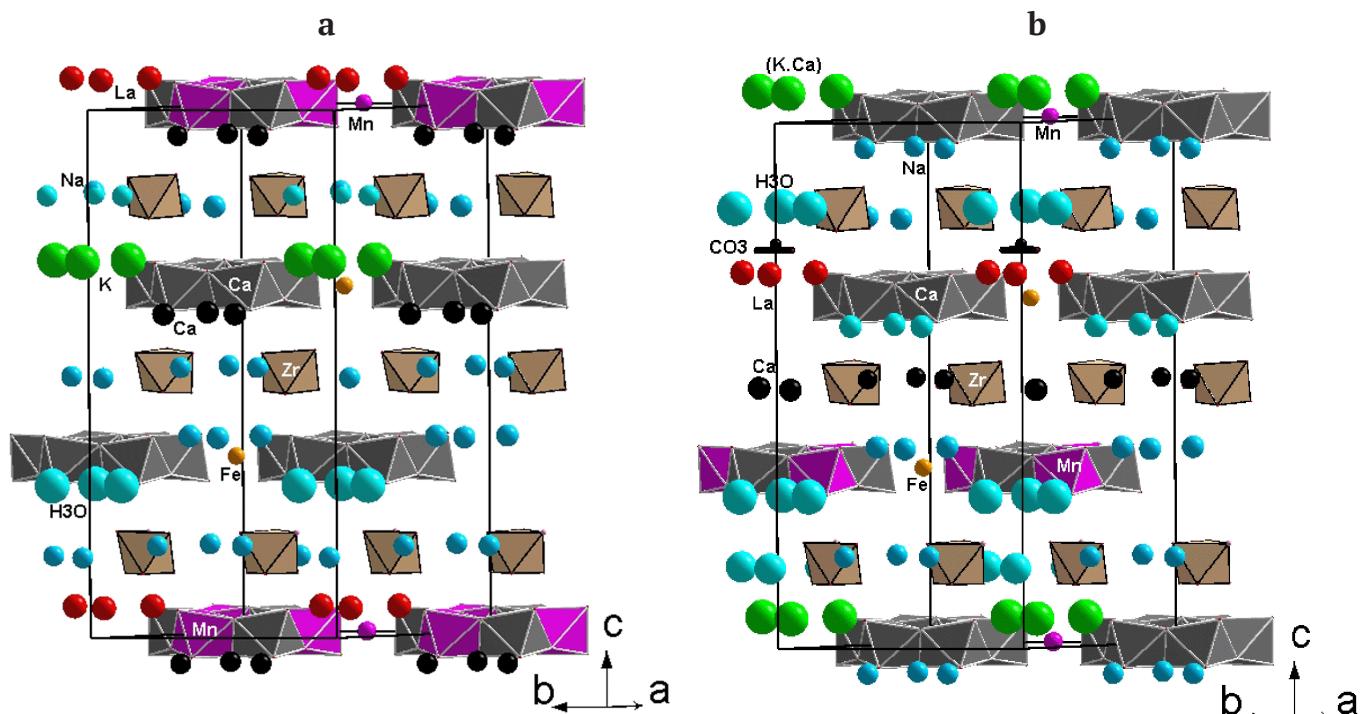


Рис. 2. Послойное распределение крупных катионов (шарики) в P_3 -моделях высококальциевого эвдиалита из массива Тамазерт (Марокко) в «низкониобиевом» (Растсветаева и др., 2025) (а) и «высокониобиевом» (б) фрагментах монокристалла

Fig. 2. Layer-like distribution of cations in the P_3 -models in the “low-niobium” (Rastsvetaeva et al., 2025) (a) and “high-niobium” (b) single-crystal fragments of high calcium EGM from Tamazeght, Morocco

свидетельствует о более равновесных условиях роста этого участка кристалла.

Выводы

Таким образом, изученный нами минерал из массива Тамазерт (Марокко) — второй высококальциевый представитель группы эвдиалита с пр. гр. P_3 . Он является «высокониобиевым» (0.83 атома) фрагментом монокристалла наряду с изученным ранее Nb-дефицитным фрагментом (0.6 атома, $Z = 3$). Состав обоих фрагментов, несмотря на некоторые различия и частичное перераспределение по позициям, схож, что обуславливает и их структурное родство. Особенностью обоих высококальциевых эвдиалитов является однотипность двух шестичленных колец из атомов Ca и присутствие Mn в октаэдре третьего кольца. Существенное понижение симметрии в исследованных минералах проявляется главным образом в упорядочении избыточных атомов Ca и ряда других крупных катионов по внекаркасным $N1-N4$ -позициям.

Установленное рентгеноструктурным анализом перераспределение части катионов по структурным позициям обоих фрагментов, по-видимому, связано с флуктуациями условий кристаллизации в процессе роста кристалла.

Работа выполнена в рамках Государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» с использованием оборудования ЦКП НИЦ «Курчатовский институт». Анализ химического состава и ИК-спектроскопическое исследование выполнены в соответствии с темой государственного задания (номер государственной регистрации 124013100858-3).

Литература / References

- Андреанов В. И. AREN-85 — система кристаллографических программ РЕНТГЕН на ЭВМ NORD, СМ-4 и ЕС // Кристаллография. 1987. Т. 32. № 1. С. 228–232.
Andrianov V. I. AREN-85—system of crystallographical programs RENTGEN for EVM NORD, SM-4 and EC. Crystallography Reports, 1987, V. 32, No. 1, pp. 228–232. (in Russian)
- Растсветаева Р. К., Чуканов Н. В., Аксенов С. М. Минералы группы эвдиалита: кристаллохимия, свойства, генезис. Нижний Новгород: Изд-во НГУ, 2012. 230 с.
Rastsvetaeva R. K., Chukanov N. V., Aksenov S. M. Eudialyte-Group Minerals: Crystal Chemistry, Properties, and Genesis. Nizhny Novgorod: Publ. of the Nizhny Novgorod State Univ., 2012, 230 pp. (in Russian)
- Растсветаева Р. К., Аксенов С. М., Гридинина В. М., Чуканов Н. В. Диссимметризация в минералах группы эвдиалита. I. Упорядоченная модель распределения катионов в кристаллической структуре амаблита-(Се) в рамках P_3 -симметрии // Кристаллография. 2024а. № 5. С. 788–795. DOI: 10.31857/S0023476124050047, EDN: ZDOJHZ. Rastsvetaeva R. K., Aksenov S. M., Gridchina V. M., Chukanov N. V. Dissymmetrization in eudialyte-group minerals. I. A model of ordered cation arrangement in the crystal structure of amableite-(Ce) using the P_3 symmetry. Crystallography Reports, 2024a, V. 69, No. 5, pp. 660–667.
- Растсветаева Р. К., Аксенов С. М., Гридинина В. М., Чуканов Н. В. Диссимметризация в минералах группы эвдиалита. II. Роль $M2$ -позиции в упорядоченной P_3 -модели высококиркониевого члена группы эвдиалита // Кристаллография. 2024б. № 6. С. 954–959. DOI: 10.31857/S0023476124060043, EDN: YHXMPE.



- Rastsvetaeva R. K., Aksenov S. M., Gridchina V. M., Chukanov N. V. Dissymmetrization in eudialyte-group minerals. II. A role of M2-position in ordered P3-model of Zr-rich member eudialyte group. *Crystallography Reports*, 2024b, V. 69, No. 6, pp. 819–825.
- Ras'vetseva P. K., Gridchina V. M., Chukanov N. V., Aksenov C. M. Диссимметризация в минералах группы эудиалита. V. Кристаллическая структура потенциально нового минерала из пегматитов Марокко — первого высококальциевого представителя с P3-симметрией // Кристаллография. 2025. Т. 70. № 5, с. 736–743. DOI: 10.31857/S0023476125050045
- Rastsvetaeva R. K., Gridchina V. M., Chukanov N. V., Aksenov S. M. desymmetrization in eudialyte-group minerals. V. Crystal structure of potentially new mineral from Marocco pegmatite — first highcalcium member with P3-symmetry. *Crystallography Reports*, 2025, V. 70, No. 5, pp. 736–743. (in Russian)
- Bouabdli A., Dupuy C., Dostal J. Geochemistry of mesosoic alkaline lamprophyres and related rocks from the Tamazert massif, High Atlas (Marocco) // *Lithos*. 1988. V. 22. P. 43–58.
- Chukanov N. V., Aksenov S. M., Pekov I. V., Belakovskiy D. I., Vozchikova S. A., Britvin S. N. Sergevanite, $\text{Na}_{15}(\text{Ca}_3\text{Mn}_3)(\text{Na}_2\text{Fe})\text{Zr}_3\text{Si}_{26}\text{O}_{72}(\text{OH})_3\text{H}_2\text{O}$, a new eudialyte-group mineral from the Lovozero alkaline massif, Kola Peninsula // *Canadian Mineralogist*. 2020. V. 58. P. 421–436. DOI: 10.3749/canmin.2000006.
- Chukanov N. V., Aksenov S. M., Kazheva O. N., Pekov I. V., Varlamov D. A., Vigasina M. F., Belakovskiy D. I., Vozchikova S. A.,
- Britvin S. N. Selsurtite, $(\text{H}_3\text{O})_{12}\text{Na}_3(\text{Ca}_3\text{Mn}_3)(\text{Na}_2\text{Fe})\text{Zr}_3\text{Si}[\text{Si}_{24}\text{O}_{69}(\text{OH})_3](\text{OH})\text{Cl}\cdot\text{H}_2\text{O}$, a new eudialyte-group mineral from the Lovozero alkaline massif, Kola Peninsula // *Mineralogical Magazine*. 2023. V. 87. P. 241–251. DOI: 10.1180/mgm.2022.136.
- Chukanov N. V., Zolotarev A. A., Schäfer Ch., Varlamov D. A., Pekov I. V., Vigasina M. F., Belakovskiy D. I., Aksenov S. M., Vozchikova S. A., Britvin S. N. Amableite-(Ce), $\text{Na}_{15}[(\text{Ce}_{1.5}\text{Na}_{1.5})\text{Mn}_3]\text{Mn}_2\text{Zr}_3\text{Si}[\text{Si}_{24}\text{O}_{69}(\text{OH})_3](\text{OH})_2\text{H}_2\text{O}$, a new eudialyte-group mineral from Saint-Amable Sill, Québec, Canada // *Mineralogical Magazine*. 2024. DOI: 10.1180/mgm.2024.26.
- Johnsen O., Grice J. D., Gault R. A. Oneillite: a new ca-deficient and REE-rich member of the eudialyte group from mont Saint-Hilaire. Quebec, Canada // *Canadian Mineral*. 1999a. V. 37. P. 1295–1301.
- Johnsen, O.; Grice, J. D.; Gault, R. A. The crystal chemistry of the eudialyte group. *Canad. Mineral*, 1999b. V.37(4), P. 865–891.
- Rastsvetaeva R. K., Gridchina V. M., Aksenov S. M., Chukanov N. V. Dissymmetrization in eudialyte-group minerals. III. Features of the high ordered voronkovite P3-structure // *Crystallography Reports*, 2024. V. 69. No. 7. P. 1045–1053. DOI: 10.1134/S1063774524602193
- Rigaku Oxford Diffraction, 2022, CrysAlisPro Software system, version 1.171.43.105a, Rigaku Oxford Diffraction, Yarnton, UK.

Поступила в редакцию / Received 21.03.2025



Мониторинг постселевых изменений русла с применением БПЛА

З. Ж. Гергокова

Высокогорный геофизический институт, Нальчик, Россия

e-mail: zayna.gerg@mail.ru

Разработка, адаптация и совершенствование методов и алгоритмов получения, обработки и комплексного использования данных ближнего дистанционного зондирования Земли с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и современного программного обеспечения (ПО) является актуальной задачей при разработке информационных моделей объектов мониторинга потенциальной опасности. Настоящее исследование демонстрирует реализацию цифровых методов мониторинга опасных природных процессов в русле горной реки. В результате обработки данных созданы ортофотопланы и цифровые модели исследуемого участка. Данная количественная оценка объема денудации и аккумуляции грунта вследствие пропуска руслом селевого потока. Результаты находят свое применение при разработке мер по защите населенных пунктов и объектов инфраструктуры от негативного воздействия опасных природных процессов.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, селевой поток, русло, ортофотоплан, цифровая модель, ландшафт

Monitoring post-torrential riverbed changes using UAV technology

Z. Zh. Gergokova

High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russia

The development, adaptation, and improvement of methods and algorithms for obtaining, processing, and integrated use of near-Earth remote sensing data using unmanned aerial vehicles (UAVs) and modern software (SW) is an urgent task in the development of information models for monitoring potential hazards. This study demonstrates the implementation of digital methods for monitoring hazardous natural processes in a mountain riverbed. As a result of data processing, orthophotos and digital models of the study area have been created. The study quantifies of denudation and soil accumulation caused by the passage of a mudflow through the riverbed. The results are used in the development of measures to protect settlements and infrastructure facilities from the negative effects of hazardous natural processes

Keywords: Unmanned aerial vehicle, mudflow, riverbed, orthophotoplane, digital model, landscape

Введение

Исследования, направленные на совершенствование методики мониторинга опасных природных явлений для оценки динамики и рисков пространственно-временных изменений морфометрических параметров ландшафта, являются актуальными и соответствуют проблематике совершенствования методов комплексного мониторинга опасных русловых и склоновых процессов в горной и высокогорной зонах.

На сегодняшний день опыт показывает, что наземные исследования в горах не могут обеспечить должный уровень точности оценки пространственно-временных изменений морфометрических параметров объектов мониторинга. Авиационные исследования требуют значительных затрат и в последние годы стали крайне затруднительны. Появление общедоступных ресурсов спутниковой информации облегчило ситуацию (Воскресенский, 2018), однако даже при наличии снимков необходимого разрешения и периодичности точно оценить количественные изме-

нения в рельефе наблюдаемых территорий невозможно. В связи с этим использование материалов, полученных с применением БПЛА (Атутова, 2018; Балтакова, 2018; Бляхарский, 2019) и соответствующего программного обеспечения (ПО), является наиболее подходящим вариантом исследования потенциально опасных зон ландшафта в горных и высокогорных районах.

Регулярные высокоточные съемки рельефа с использованием специализированного оборудования, привязанные к определенной системе координат, позволяют создавать детализированные цифровые модели местности. Такие модели дают возможность проводить сравнительный анализ и точно оценивать изменения ландшафта во времени. В частности, программный комплекс Agisoft Metashape Professional позволяет создавать геопривязанные ортофотопланы с минимальными искажениями, точно отражающие морфометрические характеристики объекта (Докукин, 2021; Ерофеев, 2018; Коновалова, 2010).

Для цитирования: Гергокова З. Ж. Мониторинг постселевых изменений русла с применением БПЛА // Вестник геонаук. 2025. 8(368). С. 9–13. DOI: 10.19110/geov.2025.8.2

For citation: Gergokova Z. Zh. Monitoring post-torrential riverbed changes using UAV technology. Vestnik of Geosciences, 2025, 8(368), pp. 9–13. DOI: 10.19110/geov.2025.8.2



Представленное исследование демонстрирует возможности использования разновременных съёмок с БПЛА в оценке последствий селепроявлений в русле реки. Результаты представлены на примере количественной оценки изменений параметров прирусловой зоны р. Нальчик при накоплении наносов, а также выносе грунта.

Методы

Исследование проводилось на участке русла р. Нальчик в районе н. п. Хасанья, в пригороде г. Нальчика Кабардино-Балкарской Республики до и после прохождения мощного селевого потока низкой плотности (1100–1500 кг/м³) (Виноградов, 2008), вызванного продолжительными интенсивными ливневыми осадками. Цель работы заключалась в количественной оценке морфометрических параметров селевого русла и прилегающей территории до и после события с использованием визуальных дешифровочных признаков ортофотопланов.

С помощью беспилотного летательного аппарата DJI Mavic Air 2 были получены снимки, по которым оценивалась динамика изучаемого процесса. Съемка производилась дважды — 29 мая, до прохождения селя, и 1 июля, на следующий день после схода потока, по одному маршруту, примерно в 12 часов дня. Высота полетов — 60–70 м в соответствии с нормативно-техническими документами: в части использования БПЛА для мониторинга отдельно расположенных объектов — ГОСТ Р 70611–2022; в части картографической обработки результатов — ГОСТ Р 70174–2022. Площадь покрытия территории аэрофотосъёмкой составила 302 тыс. м². Для обработки материалов съемок использовано программное обеспечение Agisoft Metashape Professional. В качестве исходных данных использовалось плотное облако точек. Его классификация выполнялась в автоматическом режиме. Полученные цифровые модели рельефа (ЦММ) представлены в растровом формате, где высота каждой точки задаётся в пикселях. Следующий этап, камеральный, включал обработку полученных исходных фотоматериалов по методам фототриангуляции и полуglobального метода отождествления соответствующих точек. Для этого проекта было построено облако из более чем 104 млн точек, которые были использованы для создания цифровой модели местности и ортофотопланов обследуемой территории с целью определения количественных характеристик морфометрических параметров объекта до и после события или через определенный промежуток времени. На построенных ортофотопланах путём визуального дешифрирования аэрофотоснимков были выбраны два сектора (полигона) русла реки с наиболее выраженными ландшафтными изменениями, предполагающими возможность возникновения чрезвычайных ситуаций. На основе полученных данных на каждом из выбранных участков определялся объем унесенного грунта (в случае разрушения автодороги) и объем отложений наносов в русле. Базовой плоскостью, выше и ниже которой рассчитывается объем в программе, определена аппроксимирующая плоскость ЦММ, которая вычислялась путём аппроксимации значений высот ячеек моделей, которые находятся в области построения

аппроксимирующих плоскостей. Область аппроксимации рассчитывалась автоматически и зависела от величины максимальной разницы значений высот смежных ячеек моделей, разграниченных линией, к которой применялся инструмент. Аппроксимирующая плоскость рассчитывалась на основе нарисованных вершин полигона на уровне, заданном по точкам местности в прирусловой зоне, не подвергшимся воздействию селевого потока.

Использование БПЛА «любительского» класса сопряжено с определенными трудностями, связанными с техническими ограничениями оборудования и программного обеспечения. Например, камера БПЛА DJI MavicAir 2 подвержена значительной дисторсии, что снижает качество снимков и ограничивает область использования для создания стереопар. Кроме того, растительность и тени на снимках могут создавать помехи при обработке данных, приводя к неточностям в определении рельефа и, как следствие, к погрешностям в расчетах (Биличенко, 2018; Останин, 2019). В данной работе программная обработка данных в части минимизации искажений проводилась с использованием специализированной фотограмметрической программы Agisoft Metashape Professional методом трансформирования снимков, т. е. фотографического цифрового преобразования. Оно устраняет искажения, вызванные рельефом местности и углами наклона, путем приведения их к заданному масштабу и фильтрации, т. е. устранения помех или шумов, присутствующих на изображениях, а также замены значений яркости каждой точки другим значением, менее искаженным, с использованием линейных сглаживающих фильтров, которые уменьшают «резкие» переходы уровней яркости. Такая обработка, даже с учетом помех в виде растительности и теней, дает погрешность в диапазоне 1.5–4 %. Для исследований, подобных приводимым в статье, по нашему мнению, эти значения можно считать приемлемыми, а точность достаточной.

Результаты и обсуждение

Ниже на рис. 1 показан общий ортофотоплан русла р. Нальчик после прохождения наносоводного селя, включающий в себя оба участка (полигона), для которых проводились расчеты.

Участок разрушения автодороги (полигон 1). В месте разрушения дороги пространство ниже аппроксимирующей плоскости, согласно расчетам, до селя составляло 17.8 тыс. м³, а после — 22.1 тыс. м³. Это означает, что селевой поток размыл и унес 4.3 тыс. м³ грунта, что и привело к повреждению дорожного полотна (рис. 2).

Участок, прилегающий к автодорожному мосту ниже по течению реки (полигон 2). В зоне выше моста до прохождения селевого потока объем отложений ниже базовой плоскости составлял 11.6 тыс. м³. После прохождения потока этот объем уменьшился до 7 тыс. м³. Таким образом, на участке отложилось 4.6 тыс. м³ материала, принесенного селевым потоком, выше текущего уровня воды (рис. 3).

Таким образом, путем проведения разновременной съемки и последующего геоморфометрического моделирования на основе полученных данных, опера-



Рис. 1. Общий вид ортотрансформированного плана русла р. Нальчик после прохождения селя:

1 — полигон, участок разрушения автодороги; 2 — полигон, участок отложения наносов

Fig. 1. General view of the ortho-transformed plan of the Nalchik riverbed after the mudflow:

1 — polygon, area of road destruction; 2 — polygon, area of sediment deposition



Рис. 2. Участок автодороги, прилегающий к руслу р. Нальчик, разрушенный наносоводным селем

Fig. 2. Section of the highway adjacent to the Nalchik riverbed, destroyed by a mudflow



Рис. 3. Наносы в русле р. Нальчик на территории, прилегающей к автодорожному мосту

Fig. 3. Sediments in the Nalchik riverbed in the area adjacent to the highway bridge



тивно и с высоким уровнем достоверности получены сведения о трансформации русла реки Нальчик после прохождения по нему наносоводного селя.

Выводы

В рамках ведения мониторинга селеносного русла р. Нальчик на основе материалов разновременных обследований в данной работе были реализованы методы и алгоритмы получения, обработки и комплексного использования данных ближнего дистанционного зондирования Земли с помощью БПЛА и соответствующего ПО. В результате обработки данных созданы ортофотопланы и цифровые модели исследуемых сегментов русла до и после пропуска им селевого потока. Определены объемы: денудации прируслового участка, включающего в себя фрагмент разрушенной селем автодороги протяженностью более 70 метров, который составил порядка 4.3 тыс. м³; а также объем селевых отложений в русле на участке, прилегающем к автодорожному мосту выше по течению реки, который составил порядка 4.6 тыс. м³. В будущем переносы грунта и горных пород подобного объема могут повлиять на гидрологический режим района исследований: изменение русла р. Нальчик, её паводковый режим.

Результаты исследования демонстрируют высокую эффективность применения БПЛА и специализированного ПО для оперативной и точной оценки изменений природных объектов во времени и пространстве. Получаемые количественные данные о морфометрических параметрах потенциально опасных природных процессов способствуют повышению эффективности оценки рисков их возникновения, разработки оперативных мероприятий и проектирования защитных сооружений. В целом использование описанной методики представляется наиболее удачным на сегодняшний день инструментом для ведения оперативного и комплексного мониторинга локальных участков горных территорий, подверженных негативным природным явлениям.

Литература / References

Атутова Ж. В. Опыт применения дистанционных данных при изучении восстановительной динамики геосистем // Применение беспилотных летательных аппаратов в географических исследованиях: Материалы Всерос. науч.-практ. конф. (Иркутск, 22–23 мая 2018 г.). Иркутск: Изд-во Института географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, 2018. С. 3–7.

Atutova Zh. V. The experience of using remote data in studying the restorative dynamics of ecosystems. Materials of the All-Russian scientific and practical conference. The use of unmanned aerial vehicles in geographical research. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference (Irkutsk, May 22–23, 2018). Irkutsk: Institute of Geography SB RAS, 2018, pp. 3–7. (in Russian)

Балтакова А., Николова В., Кендерова Р., Христова Н. Применение ГИС и данных дистанционного зондирования для анализа селевых потоков на примере изучения западных предгорий Пириня (Болгария) // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита: Труды 5-й Междунар. конф. Тбилиси, 2018. С. 22–33.

Baltakova A., Nikolova V., Kenderova R., Hristova N. Application of GIS and remote sensing data for mudflow analysis using the example of studying the western foothills of Pirin (Bulgaria). Mudflows: disasters, risk, forecast, protection (Proceedings of the 5th International Conference). Tbilisi, Georgia, 2018, pp. 22–33. (in Russian)

Биличенко И. Н. Использование беспилотных летательных аппаратов при ландшафтно-экологических исследованиях // Применение беспилотных летательных аппаратов в географических исследованиях: Материалы Всерос. науч.-практ. конф. (Иркутск, 22–23 мая 2018 г.). Иркутск: Изд-во Института географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, 2018. С. 30–33.

Bilichenko I. N. The use of unmanned aerial vehicles in landscape and ecological research. The use of unmanned aerial vehicles in geographical research. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference (Irkutsk, May 22–23, 2018). Irkutsk: Institute of Geography SB RAS, 2018, pp. 30–33. (in Russian)

Бляхарский Д. П., Волгушева Н. Э., Казаков Э. Э. Мониторинг ледников в сезон аблации с использованием беспилотных аэрофотосъемочных систем на примере ледников Потанина и Александры (массив Табын-Богдо-ола, Монголия) // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2019. Т. 63. № 2. С. 168–179.

Blyakharsky D. P., Volgusheva N. E., Kazakov E. E. Monitoring glaciers during the ablation season using unmanned aerial photography systems on the example of the Potanin and Alexandra glaciers (Tabyn-Bogdo-ola massif, Mongolia). Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodesy and aerial photography, 2019, V. 63, No. 2, pp. 168–179. (in Russian)

Виноградов Ю. Б., Виноградова Т. А. Современные проблемы гидрологии. М.: Академия, 2008. 170 с.

Vinogradov Yu. B., Vinogradova T. A. Modern problems of hydrology. Moscow: Academia, 2008. 170 p. (in Russian)

Воскресенский И. С., Сучилин А. А., Ушакова Л. А., Шафоростов В. М., Энтин А. Л. Применение БПЛА для мониторинга оползневых и эрозийных процессов (на примере центра Русской равнины) // Применение беспилотных летательных аппаратов в географических исследованиях: Материалы Всерос. науч.-практ. конф. (Иркутск, 22–23 мая 2018 г.). Иркутск: Изд-во Института географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, 2018. С. 40–48.

Voskresenskiy I. S., Suchilin A. A., Ushakova L. A., Shaforostov V. M., Entin A. L. The use of UAVs for monitoring landslide and erosion processes (on the example of the center of the Russian Plain). The use of unmanned aerial vehicles in geographical research. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference (Irkutsk, May 22–23, 2018). Irkutsk: Institute of Geography SB RAS, 2018, pp. 40–48. (in Russian)

Докукин М. Д., Беккиев М. Ю., Калов Р. Х., Савернюк Е. А., Черноморец С. С. Мониторинг обвалов, оползней и других разрушительных процессов в высокогорной зоне на основе анализа разновременных космоснимков // Изучение опасных природных процессов и геотехнический мониторинг при инженерных изысканиях: Материалы Общеросс. науч.-практ. конф. М.: Геомаркетинг, 2021. С. 59–68.

Dokukin M. D., Bekkiev M. Yu., Kalov R. Kh., Savernyuk E. A., Chernomorets S. S. Monitoring of landslides, landslides and other destructive processes in a high-altitude



area based on the analysis of multi-time satellite images. Study of hazardous natural processes and geotechnical monitoring during engineering surveys. Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference. Moscow: Geomarketing, 2021, pp. 59–68. (in Russian)

Ерофеев А. А., Ябаркин А. Ю., Еремеев В. Ф. Первые результаты аэрофотосъемки горно-ледникового бассейна Акtru с использованием БПЛА // Применение беспилотных летательных аппаратов в географических исследованиях: Материалы Всерос. науч.-практ. конф. (Иркутск, 22–23 мая 2018 г.). Иркутск, 2018. С. 68–70.

Yerofeev A. A., Yabarkin A. Yu., Eremeev V. F. The first results of aerial photography of the Aktru mountain-glacial basin using UAVs. The use of unmanned aerial vehicles in geographical research: Proc. of the All-Russian Scientific and practical conference (Irkutsk, May 22–23, 2018). Irkutsk, 2018, pp. 68–70. (in Russian)

Коновалова Т. И. Геосистемное картографирование. Новосибирск: Гео, 2010. 186 с.
Konovalova T. I. Geosystem mapping. Novosibirsk: Geo, 2010, 186 p. (in Russian)

Останин О. В., Дьякова Г. С., Алябьев Д. Ю., Ковалев М. В. Опыт использования беспилотных летательных аппаратов для изучения гляциально-мерзлотных каменных образований в долине р. Джело (Центральный Алтай) // География и природопользование Сибири. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2019. Вып. 26. С. 141–148.
Ostanin O. V., Dyakova G. S., Alyabyev D. Yu., Kovalev M. V. The experience of using unmanned aerial vehicles to study glacial-permafrost rock formations in the valley of the Dzhelo River (Central Altai). Geography and Environmental Management of Siberia. Barnaul: Altai University, 2019, 26, pp. 141–148. (in Russian)

Поступила в редакцию / Received 16.07.2025



Арктический вектор геологических исследований Arctic vector of geological research

УДК 549.892.2

DOI:10.19110/geov.2025.8.3

Мел-палеогеновые ископаемые смолы Якутии: молекулярный состав и термические свойства

О. В. Мартиросян¹, М. А. Богдасаров²

¹ Геологический институт РАН, Москва, Россия, mov@ginras.ru

² Брестский государственный университет имени А. С. Пушкина, Брест, Беларусь, bahdasarau@gmail.com

Впервые проведено исследование ископаемых смол Якутии по данным инфракрасной спектроскопии и дифференциального-термического анализа. Показано, что смолы представлены преимущественно геданитами, но могут встречаться также ретиниты. Геданиты являются более окисленными по сравнению с ретинитами.

Впервые проанализирована информация по хвойным растительным остаткам в пределах местонахождения изучаемых ископаемых смол Якутии, что позволило подтвердить, что представители семейств *Cupressaceae*, *Taxodiaceae* действительно могут являться основным ботаническим источником при генезисе геданита, а семейства *Pinaceae* – ретинита.

Ключевые слова: ископаемые смолы, ретинит, геданит, Якутия

Cretaceous-Paleogenic fossil resins of Yakutia: molecular composition and thermal properties

O. V. Martirosyan¹, M. A. Bogdasarov²

¹Geological Institute of RAS, Moscow, Russia

² Pushkin Brest State University, Brest, Republic of Belarus

A novel study of fossil resin from Yakutia has been conducted using infrared spectroscopy and differential thermal analysis. The resins are exclusively gedanites, although retinite may also be found. Gedanites are more oxidized than retinites.

For the first time, we analyze information on coniferous plant remains within the location of the studied fossil resins. This analysis confirms that conifers from the families *Cupressaceae* and *Taxodiaceae* can really be the main botanical sources of the formation of gedanite, while the *Pinaceae* family – of retinite.

Keywords: fossil resins, retinite, gedanite, Yakutia

Введение

Сибирская смолоносная провинция богата проявлениями ископаемых смол. Одним из таких местонахождений является территория Республики Саха (Якутия), расположенная на северо-востоке России. Найдены ископаемые смолы известны в дельте р. Лены, Лено-Вилюйской впадине (бассейн рр. Лены, Вилюй, Лямпушки), а также в пределах Яно-Индигирской низменности. Лено-Вилюйская впадина находится в Восточной Сибири, в бассейне нижнего течения р. Вилюй и прилегающих районах бассейна р. Лены. Яно-Индигирская низменность расположена вдоль побережья Северного Ледовитого океана, морей Лаптевых и Восточно-Сибирского, на севере Республики Саха (Якутия).

К сожалению, ископаемые смолы Якутии редко привлекали пристальное внимание геологов, поэтому сведения об их находках немногочисленны. Необходимость изучения ископаемых смол Якутии обусловлена тем, что на сегодняшний день большинство известных находок смол данного региона исследованы крайне недостаточно или вовсе остаются неизученными. Также большое значение приобретает их надежная диагностика, поскольку многие из них не идентифицированы должным образом. В настоящей работе впервые приводятся результаты химического состава (по данным инфракрасной спектроскопии – ИКС) и термических свойств (по данным дифференциального-термического анализа – ДТА) ископаемых смол Якутии.

Для цитирования: Мартиросян О. В., Богдасаров М. А. Мел-палеогеновые ископаемые смолы Якутии: молекулярный состав и термические свойства // Вестник геонаук. 2025. 8(368). С. 14–24. DOI: 10.19110/geov.2025.8.3

For citation: Martirosyan O. V., Bogdasarov M. A. Cretaceous-Paleogenic fossil resins of Yakutia: molecular composition and thermal properties. Vestnik of Geosciences, 2025, 8(368), pp. 14–24. DOI: 10.19110/geov.2025.8.3



История изучения ископаемых смол Якутии

Среди первых научных экспедиций, побывавших в пределах Якутии в XVIII и XIX столетиях, сведения о находках ископаемых смол впервые появились в записках доктора Кибера, путешествовавшего в 1821 г. под командованием барона Ф. П. Врангеля для разыскания северных границ Колымского уезда и Чукотской земли. Смолы были найдены в озерах к востоку от Алазейских гор (Кибер, 1827, с. 185). Ископаемые смолы встречаются также к западу от р. Яны, возле берега Быковской губы на о. Ладаннах (рис. 1) Первым их описал А. Е. Фигурин как «янтарь большей частью тусклой и мало прозрачной» (Фигурин, 1823, с. 196). Ископаемые смолы встречаются и на оз. Таставах (Каменное озеро), в низовьях р. Хром. По замечанию А. Е. Фигурина, этот янтарь по наружному виду сходен с находимым у оз. Ладаннах (Фигурин, 1823, с. 197). Выходы угленосных отложений на берегу оз. Таставах впервые были установлены М. М. Геденштормом, в них он встречал куски «прозрачной смолы» (1830, с. 111). Достаточно полные сведения об отложениях оз. Таставах впервые были при-

веденены в 1909 г. К. А. Воллосовичем (1930). По сообщению Г. Швейгера, М. М. Геденшторм, побывав на архипелаге Новосибирских островов в 1808–1809 гг., янтаря не встретил (Швейгер, 1822, с. 16). Однако мелкие зерна были найдены Э. В. Толлем на о. Новая Сибирь (Toll, 1890, с. 6). Янтарь был вкраплен в пласты миоценовых глин, содержащих лигнитизированные растительные остатки. Э. И. Эйхвальд сообщал о находке зерна «янтаря» при описании окаменелостей, обнаруженных в известняках на берегу р. Оленек к западу от р. Лены (Eichwald, 1841). Позднее в этом районе редкие комочки янтаревидной смолы находили в гумусовых углях укинской свиты (альб) (Гусев, 1950). Большая часть экспедиций имела рекогносцировочный характер.

Наиболее изученной на территории Якутии является та ее часть, которая занята бассейнами рр. Лены и Вилюй. Они оказались более доступными для исследователей. После экспедиции А. Л. Чекановского с целью географических и геологических исследований появились первые сведения о «янтаровидном смолистом веществе» в районе левого устья р. Лены (1873, с. 232). Позднее А. А. Бычков (1899) и П. В. Грунвальд



Рис. 1. Места находок ископаемых смол Якутии:

1 – о. Новая Земля; 2 – оз. Таставах; 3 – Быковская губа; 4 – р. Оленек; 5 – р. Чочума; 6 – р. Лямпушка; 7 – Опока-Хая; 8 – Тимирдях-Хая

Fig. 1. Location of mineral finds in Yakutia:

1– Novaya Zemlya Island; 2 – Tastakh Lake; 3 – Bykovskaya Bay; 4 – Olenek River; 5 – Chochuma River; 6 – Lyampushka River; 7 – Opoka-Khaya; 8 – Timirdyakh-Khaya

(1927) также упомянули о том, что ископаемые смолы встречаются на Быковском мысе к востоку от устья реки Лены. Найдены ископаемые смолы в бассейне р. Лены встречаются, как правило, в угленосных верхнемеловых отложениях: в песчаниках тимирдяхской свиты (Тимирдях-Хая), линденской свиты (Опока-Хая), хатырской и тимирдяхской свит (р. Лямпушка (синонимы — Ляписке, Леписке)) (Вахрамеев, 1958, Болховитина, 1959, Пчелина, 1960, Кричкова, Сластенов, 1966). Ископаемые смолы встречаются в угленосных отложениях сангарской свиты по р. Чочуме (Вахрамеев, 1957). Большинство описанных выше находок ископаемых смол Якутии не подвергались минералогическим исследованиям. Только образцы смолы из Тимирдях-Хая были исследованы С. С. Савкевичем (1980), который отметил, что по ИК-спектрам эти смолы сходны со смолами из урочища Янтардах (Хатангской впадины).

Объекты исследования

В нашей работе были исследованы ископаемые смолы р. Вилой (левый приток р. Лены) из местонахождений Тимирдях-Хая, Опока-Хая, р. Лямпушки

(правый приток р. Лены) и оз. Тастав (табл. 1). Ископаемые смолы обычно имеют размер от 5 до 15 мм, слегка округлые, уплощенные и удлиненные, иногда каплевидные. Прозрачность — от совершенной до отсутствия. Цвет желтый, оранжево-желтый, желто-коричневый.

Литологические и ботанические особенности. Найдены ископаемые смолы встречаются в пределах Лено-Вилойской впадины в нижней части тимирдяхской свиты сеноманского возраста (Головнёва, 2005), которая представлена в обнажениях обрыва Тимирдях-Хая на левом берегу р. Вилой (в 4 км выше пос. Кызыл-Сыр), а также в районе р. Лямпушки (табл. 2).

Нижняя часть тимирдяхской свиты по р. Вилой сложена в основном косослоистыми песками и песчаниками с короткими линзами глин, алевролитов и галечников, содержит стяжения сидеритов и сидеритизированной древесины с редкими маломощными прослойками бурого угля (Вахрамеев, 1958; Пчелина 1960, Жерихин, 1978). Рассматриваемая свита по р. Лямпушки сложена преимущественно песчаниками серыми и светло-серыми с желтоватым, зеленоватым и бурым оттенками, крупными линзами глинистых



Рис. 2. Ископаемые смолы Якутии

Fig. 2. Fossil resins of Yakutia

Таблица 1. Физические характеристики ископаемых смол Якутии

Table 1. Physical characteristics of fossil resins of Yakutia

Образец Sample	Местонахождение / Location	Внешний вид Exterior	Возраст / Age	Разновидность по ИКС Variety
МБ-017	оз. Тастав в низовьях р. Хромы Lake Tastakh in the lower reaches of the Khroma River	медово-желтый, сильно окисленный honey-yellow, strongly oxidized	Pg ₂₋₃ (палеоцен-эоцен) (Paleocene-Eocene)	
МБ-018	обрывы Тимирдях-Хая, левый берег р. Вилой, в 40 км ниже по течению от с. Кызыл-Сыр Timirdyakh-Khaya cliffs, left bank of the Vilyuy River, 40 km downstream from the village of Kyzyl-Syr	медово-желтый, полупрозрачный honey-yellow, translucent	K ₂ (сеноман) (Cenomanian)	геданит gedanite
МБ-009	правый берег р. Лямпушки в 15–30 км от ее устья right bank of the Lyampushka River 15–30 km from its mouth	светло-желтый, полупрозрачный light yellow, translucent	K ₂ (сеноман) (Cenomanian)	
МБ-014	возвышенность Опока-Хая, левый берег р. Вилой, примерно в 122 км выше его устья Опока-Хая upland, left bank of the Vilyuy River, approximately 122 km upstream from its mouth	желто-коричневый, непрозрачный yellow-brown, opaque	K ₂ (сантон-компан) (Santonian- Companian)	ретинит retinite



Таблица 2. Литологические и ботанические характеристики вмещающих ископаемые смолы отложений Якутии

Table 2. Lithological and botanical characteristics of fossil resin-bearing deposits in Yakutia

Система Series	Возраст Age	Местонахождение Location	Свита Formation	Характерные семейства и роды хвойных Characteristic coniferous families and genera	Литологический состав пород Lithological compositions of the rocks
ПАЛЕОГЕНОВАЯ PALEOGENIC	эоцен-палеоцен eocene-paleocene	оз. Тастанх в низовьях р. Хромы Lake Tastakh in the lower reaches of the Khroma River	тастанхская tastakhskaya	Taxodiaceae: <i>Taxodium, Sequoia, Metasequoia, Glyptostrobus</i> Pinaceae: <i>Pinus n/p H, Pinus n/p D, Larix, Picea, Tsuga</i>	пески, глины, сидеритовые конкремции, бурые угли с остатками лигнитизированной древесины sands, clays, siderite concretions, brown coals with remains of lignified wood
	кампан campanian	Опока-Хая, левый берег р. Вилуй Opoka-Khaya, left bank of the Vilyui River		Pinaceae: <i>Abies sp., Piceites sp., Cedrus pachyderma Sauer, Cedrus cf. crispa Sauer, Pinus insignis (Naum) Bolkh., Pinus triunalis Bolkh., Pinus aralica Bolkh., Pinus exiguus Bolkh., Pinus solita Bolkh., Pinaceae gen. sp.</i> Taxodiaceae (Cupressaceae): <i>Taxodium rotundum Bolkh., Taxidium sp., Taxodiaceae gen. sp., Cupressaceae gen. sp.</i>	темно-серые песчанистые глины, каолинизированные пески, тонкие пласты бурого угля dark grey sandy clays, kaolinized sands, thin layers of brown coal
МЕЛОВАЯ CRETACEOUS	сантон santonian	р. Лямпушка, правый берег р. Лены Lyampushka River right bank of the Lena River	линденская lindenskaya	Taxodiaceae: <i>Parataxodium wigginsi Arn. et Lowt., Sequoia sp.</i>	пески и песчаники с короткими линзами глин, алевролитов и галечников, наличие стяжения сидеритов, сидеритизированной древесины, с редкими прослоями бурого угля sands and sandstones with short lenses of clays, siltstones and pebbles, the presence of siderite concretions, sideritized wood, with rare interlayers of brown coal
		Тимирдях-Хая, левый берег р. Вилуй Timirdyakh-Khaya, left bank of the Vilyuy river		Taxodiaceae: <i>Sequoia minuta Sveshn, Sequoia fastigiate Heer, Sequoia sabulata Heer, Taxodium dubium (Sternb.) Heer, Taxodium tinajorum Heer, Taiwania microphylla Budan, Cupressaceae: Cupressinocladius sp. 1</i> Pinaceae: <i>Pityostrobus lenaensis Sveshn, Pityophyllum spp, Pityospermum sp.</i>	

и алеврито-глинистых пород с редкими маломощными прослоями бурого угля. В песчаниках присутствуют сидеритовые конкреции (Вахрамеев, 1958; Пчелина, 1960; Жерихин, 1978; Головнева, 2004)¹. Кроме того, находки ископаемых смол встречаются в линденской свите, обнажающейся на возвышенности Опока-Хая (р. Вилуй, левый приток р. Лены, примерно в 122 км выше ее устья) и имеющей сантон-кампанский возраст (Головнева, 2005). Литологически свита представлена косослоистыми, мелко- и среднезернистыми сильно каолинизированными песками, в основании песчаников прослеживаются подчинен-

ные им цепочкообразные прослои галечника, тонкие пласты бурого угля и прослои глин (Вахрамеев, 1958; Самойлович, 1964).

Ископаемая смола попадается на берегу озера Тастанх в низовьях р. Хромы (Яно-Индигирская низменность). Отложения на оз. Тастанх В. И. Кайялайнен относил к тастанхской свите (Кайялайнен, 1967), представленной глинами и бурыми углами с остатками лигнитизированной древесины, выше которых залегают светло-серые пески с угольной крошкой и железистокарбонатными конкрециями (Гончаров, Кулькова, 1970). Относительно возраста тастанхских отложений нет единого мнения. А. Н. Криштофович считал, что растительные остатки указывают на палеоценовый возраст (Криштофович, 1958), И. А. Кулькова (1973) относила их к эоцену, а Е. В. Воеводина (Баранова, Бискэ, 1964) даже к олигоцену. Зерна ископаемых смол во всех свитах встречаются в буром угле.

¹ Головнева Л. Б. Позднемеловая флора Сибири: Автореф. ... докт. биол. наук. СПб., 2004. 54 с.

¹ Golovneva L. B. Late Cretaceous Flora of Siberia: Abstract for the Candidate of Biological Sciences Degree. St. Petersburg, 2004, 54 p. (in Russian)



Источником ископаемых смол является растительность соответствующих эпох (в основном голосеменные подкласса хвойных), обладающие способностью к смолообразованию. Считается, что в северном полушарии эту роль могли выполнять представители трех семейств: *Araucariaceae*, *Cupressaceae* (*Taxodiaceae*) и *Pinaceae* (Langenheim, 1969). По данным газовой хромато-масс-спектрометрии, возможным ботаническим источником смол класса Ib (геданиты) являются хвойные семейства *Cupressaceae*, *Taxodiaceae* или *Araucariaceae*. Считается, что смолы класса V (ретиниты) производятся деревьями семейства *Pinaceae* (Seyfullah et al., 2018).

Среди осадков нижней части тимердяской свиты (табл. 1) господствуют хвойные, которые представлены преимущественно таксодиевыми (*Sequoia minuta* Sveshn, *Sequoia fastigiate* Heer, *Sequoia sabulata* Heer, *Taxodium dubium* (Sternb.) Heer, *Taxodium tinajorum* Heer, *Taiwania microphylla* Budan) и в меньшей степени кипарисовыми и сосновыми (*Cupressinocladus* sp. 1, *Pityostrobus lenaensis* Sveshn, *Pityophyllum* spp., *Pityospermum* sp.), (Фрадкина, 1967; Головнева, 2004¹, 2005). В линзах и песчаных слоях в разрезах по р. Лямпушке были собраны остатки растений, среди которых ведущая роль принадлежала таксодиевым (*Parataxodium wigginsi* Arn. et Lowt., *Sequoia* sp.) (Киричкова, 1985). В линденской свите в составе хвойных доминируют представители сосновых (*Abies* sp., *Piceites* sp., *Cedrus pachyderma* Sauer, *Cedrus* cf. *crispa* Sauer, *Pinus insignis* (Naum) Bolkh., *Pinus triuialis* Bolkh., *Pinus aralica* Bolkh., *Pinus exiguus* Bolkh., *Pinus solita* Bolkh., *Pinaceae* gen. sp.) и в меньшей степени кипарисовые и таксодиевые (*Taxodium rotundum* Bolkh., *Taxodium* sp., *Taxodiaceae* gen. sp., *Cupressaceae* gen. sp.) (Самойлович, 1964). Среди хвойных тастахской свиты господствует семейство таксодиевых (*Taxodium*, *Sequoia*, *Metasequoia*, *Glyptostrobus*), в небольшом количестве представлены споры и пыльца семейства сосновых (*Pinus* n/p H, *Pinus* n/p D, *Larix*, *Picea*, *Tsuga*). Большое

количество ископаемых смол является растительностью соответствующих эпох (в основном голосеменные подкласса хвойных), обладающие способностью к смолообразованию. Считается, что в северном полушарии эту роль могли выполнять представители трех семейств: *Araucariaceae*, *Cupressaceae* (*Taxodiaceae*) и *Pinaceae* (Langenheim, 1969). По данным газовой хромато-масс-спектрометрии, возможным ботаническим источником смол класса Ib (геданиты) являются хвойные семейства *Cupressaceae*, *Taxodiaceae* или *Araucariaceae*. Считается, что смолы класса V (ретиниты) производятся деревьями семейства *Pinaceae* (Seyfullah et al., 2018).

Среди осадков нижней части тимердяской свиты (табл. 1) господствуют хвойные, которые представлены преимущественно таксодиевыми (*Sequoia minuta* Sveshn, *Sequoia fastigiate* Heer, *Sequoia sabulata* Heer, *Taxodium dubium* (Sternb.) Heer, *Taxodium tinajorum* Heer, *Taiwania microphylla* Budan) и в меньшей степени кипарисовыми и сосновыми (*Cupressinocladus* sp. 1, *Pityostrobus lenaensis* Sveshn, *Pityophyllum* spp., *Pityospermum* sp.), (Фрадкина, 1967; Головнева, 2004¹, 2005). В линзах и песчаных слоях в разрезах по р. Лямпушке были собраны остатки растений, среди которых ведущая роль принадлежала таксодиевым (*Parataxodium wigginsi* Arn. et Lowt., *Sequoia* sp.) (Киричкова, 1985). В линденской свите в составе хвойных доминируют представители сосновых (*Abies* sp., *Piceites* sp., *Cedrus pachyderma* Sauer, *Cedrus* cf. *crispa* Sauer, *Pinus insignis* (Naum) Bolkh., *Pinus triuialis* Bolkh., *Pinus aralica* Bolkh., *Pinus exiguus* Bolkh., *Pinus solita* Bolkh., *Pinaceae* gen. sp.) и в меньшей степени кипарисовые и таксодиевые (*Taxodium rotundum* Bolkh., *Taxodium* sp., *Taxodiaceae* gen. sp., *Cupressaceae* gen. sp.) (Самойлович, 1964). Среди хвойных тастахской свиты господствует семейство таксодиевых (*Taxodium*, *Sequoia*, *Metasequoia*, *Glyptostrobus*), в небольшом количестве представлены споры и пыльца семейства сосновых (*Pinus* n/p H, *Pinus* n/p D, *Larix*, *Picea*, *Tsuga*). Большое

Таблица 3. Характеристика полос поглощения различных функциональных групп

Table 3. Characteristics of absorption bands of different functional groups

Частота, см ⁻¹ Frequency, cm ⁻¹	Характеристика полос поглощения Characteristics of absorption bands
3644–3200	валентные колебания связанный OH в фенольных, спиртовых и карбоксильных группах stretching vibrations of bound OH in phenol, alcohol and carboxyl groups
2940–2960	валентные симметричные колебания групп CH ₃ stretching symmetric vibrations of CH ₃ groups
2850 и 2930	валентные симметричные колебания групп CH ₂ stretching symmetric vibrations of CH ₂ groups
1722–1736	валентные колебания C=O в эфирах, >C=C-OOR stretching vibrations of C=O in esters, >C=C-OOR
1700–1710	валентные колебания C=O карбоновых кислот stretching vibrations of C=O carboxylic acids
1640–1645	валентные колебания ненасыщенных связей C=C типа R ₁ HC=CHR ₂ в терпеноидах stretching vibrations of unsaturated C=C bonds of the R ₁ HC=CHR ₂ type in terpenoids
1500–1600	валентные колебания ароматических C=C-связей stretching vibrations of aromatic C=C-bonds
1460–1465	симметричные деформационные колебания CH ₂ -групп symmetric deformation vibrations of CH ₂ -groups
1452–1458	антисимметричные деформационные колебания групп CH ₃ antisymmetric deformation vibrations of CH ₃ groups
1377–1385	симметричные деформационные колебания групп –C–(CH ₃) ₂ абиетиновой кислоты symmetric deformation vibrations of –C–(CH ₃) ₂ groups of abietic acid
1250–1230	валентные колебания C–O карбоновых кислот stretching vibrations of C–O carboxylic acids
1160–1180	валентные колебания C–O в сложных эфирах и деформационные колебания OH в карбоксильных кислотах stretching vibrations of C–O in esters and deformation vibrations of OH in carboxylic acids
1085–1087	симметричные валентные колебания C–O–C-связей циклических эфиров symmetric stretching vibrations of C–O–C-bonds of cyclic esters
1026–1030	несколько перекрывающих полос колебаний связей C–O в фенольных гидроксилах и S=O в сульфоксидных группах several overlapping bands of vibrations of C–O bonds in phenolic hydroxyls and S=O in sulfoxide groups
977–955	деформационные асимметричные колебания групп R ₁ HC=CHR ₂ с трансконфигурацией относительно двойной связи asymmetric deformation vibrations of R ₁ HC=CHR ₂ groups with trans configuration relative to the double bond
888	внеплоскостные деформационные колебания C–H в экзоциклической ненасыщенной связи >C=CH ₂ в терпеноидах out-of-plane deformation vibrations of C–H in the exocyclic unsaturated bond >C=CH ₂ in terpenoids
792	внеплоскостные деформационные колебания C–H в соединениях типа R ₁ R ₂ C=CHR ₃ сесквитерпенов out-of-plane deformation vibrations of C–H in compounds of the R ₁ R ₂ C=CHR ₃ type of sesquiterpenes



количество таксодиевых свидетельствует о существовании пониженных увлажненных участков сухи (Гончаров, Кулькова, 1970).

Методы исследования

Ископаемые смолы являются сложными рентгеноаморфными органическими веществами, в силу чего существуют значительные трудности при характеристике их структуры. Одним из методов, отражающих тонкие структурные особенности ископаемых смол (молекулярный состав и соотношение различных функциональных групп), является *инфракрасная спектроскопия (ИКС)*. Это фундаментальный метод, используемый с 1960-х годов, наиболее востребованный для идентификации ископаемых смол. Независимо от возраста и местонахождения ископаемой смолы, ИК-спектр представляет собой своего рода «отпечаток пальца» с полосами поглощения, отражающими основные химические компоненты, которые можно сравнить, чтобы показать сходство или различие этих компонентов между смолами. Химический «отпечаток» смол может дать представление о путях их окаменения, на которые влияют первичные условия окружающей среды (биодеградация, температура, гидрорежим) и старение (низкомолекулярные компоненты со временем разлагаются, а высокомолекулярные соединения подвергаются трансформации). Было доказано, что в процессе созревания основными превращениями, влияющими на химическую структуру смолы, являются полимеризация и потеря летучих компонентов (Nissenbaum, Yaker, 1995).

ИК-спектры поглощения изученных образцов смол получены в Институте геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (Сыктывкар). Образцы предварительно перетирали с бромидом калия, при помощи пресса изготавливали таблетки, которые исследовали на ИК-Фурье-спектрометре «Инфракалом ФТ-801» фирмы «Люмэкс-Сибирь» (Россия) в диапазоне 4000–500 см⁻¹, с разрешением 4 см⁻¹, числом сканирований 32. Оптическую плотность полос (D) определяли методом базисных линий по высоте пиков. Оптическая плотность – это безразмерная величина, равная десятичному логарифму отношения потока излучения F₀, падающего на слой вещества, к потоку прошедшего излучения F, ослаблен-

ного в результате поглощения и рассеяния: D = lg (F/F₀). Расшифровку ИК-спектров проводили, ссылаясь на результаты подобных исследований (Kosmowska-Ceranowicz, 1999; Pagacz et al., 2020; Natkaniec-Nowak et al., 2023). В табл. 3 представлена расшифровка значений характеристических частот.

Дифференциально-термический анализ (ДТА). Термофизические свойства относятся к числу показателей, чувствительных к особенностям молекулярного состава, степени полимеризации ископаемых смол. ДТА природных смол может обеспечить альтернативный подход к изучению процессов их созревания. Результаты предыдущих исследований ископаемых смол методом ДТА позволили сделать ряд интересных выводов.

Было высказано предположение, что термический анализ может помочь в определении возраста смолы, т. к. структура и состав смол изменяются в зависимости от степени их возраста (Ragazzi et al., 2003). Другие авторы (Jablonski et al., 1999; Pagacz et al., 2020; Garcia-Valles et al., 2023) показали, что возраст и степень зрелости смолы могут коррелировать с наблюдаемыми экзотермическими эффектами и теплофизическими свойствами (температурой размягчения и стеклования). Для того чтобы найти взаимосвязь между генезисом смолы и ее термическим поведением, необходимо сравнение с данными других методов, например ИК-спектроскопии.

Термическое поведение порошковых материалов ископаемых смол анализировали на дериватографе Q-1500. Образцы массой около 25–30 мг нагревали в платиновых тиглях от 25 до 1000 °C при скорости нагрева 10 °C/мин. Измерения повторяли дважды для каждого образца.

Обсуждение результатов исследований

Инфракрасная спектроскопия. Из теоретических основ ИКС известно, что интенсивность полос в ИК-спектре зависит от содержания соответствующей функциональной группы. Таким образом, оценка относительной интенсивности полос поглощения (или оптической плотности) каждой группы позволяет судить об их соотношении. Основные изменения в составе функциональных групп были рассчитаны методом ба-

Таблица 4. Содержание химических групп в молекулярном составе ископаемых смол Якутии

Table 4. Content of chemical groups in the molecular composition of fossil resins of Yakutia

Образец Sample	ОН- 3490	Алифатические группы* Aliphatic groups*	Содержание химических групп, волновое число, см ⁻¹ Content of chemical groups, wave number, cm ⁻¹						
			C=O к/ C=O э 1700/1730	C=C аром 1600	C—O к/ C—O э 1250/1160	C—O 1085	S—O 1035	>C=CH ₂ 888	R ₁ R ₂ C=CHR ₃ 792
геданит / gedenite									
МБ-017	0.30	6.91	1.52/1.12	0.30	0.81/0.71	0.31	0.67	0.50	0.54
МБ-018	0.34	6.59	1.11/1.01	0.18	0.68/0.58	0.50	0.60	0.28	0.24
МБ-009	0.28	5.74	1.34/1.16	0.17	0.63/0.64	0.47	0.56	0.28	0.17
ретинит / retinite									
МБ-014	0.41	4.60	0.86/0.67	0.14	0.37/0.40	–	0.20	0.12	0.06

Примечание: * – сумма оптических плотностей полос при 2975, 2845, 1460, 1450, 1380 см⁻¹

Note: * – sum of optical densities of bands at 2975, 2845, 1460, 1450, 1380 cm⁻¹

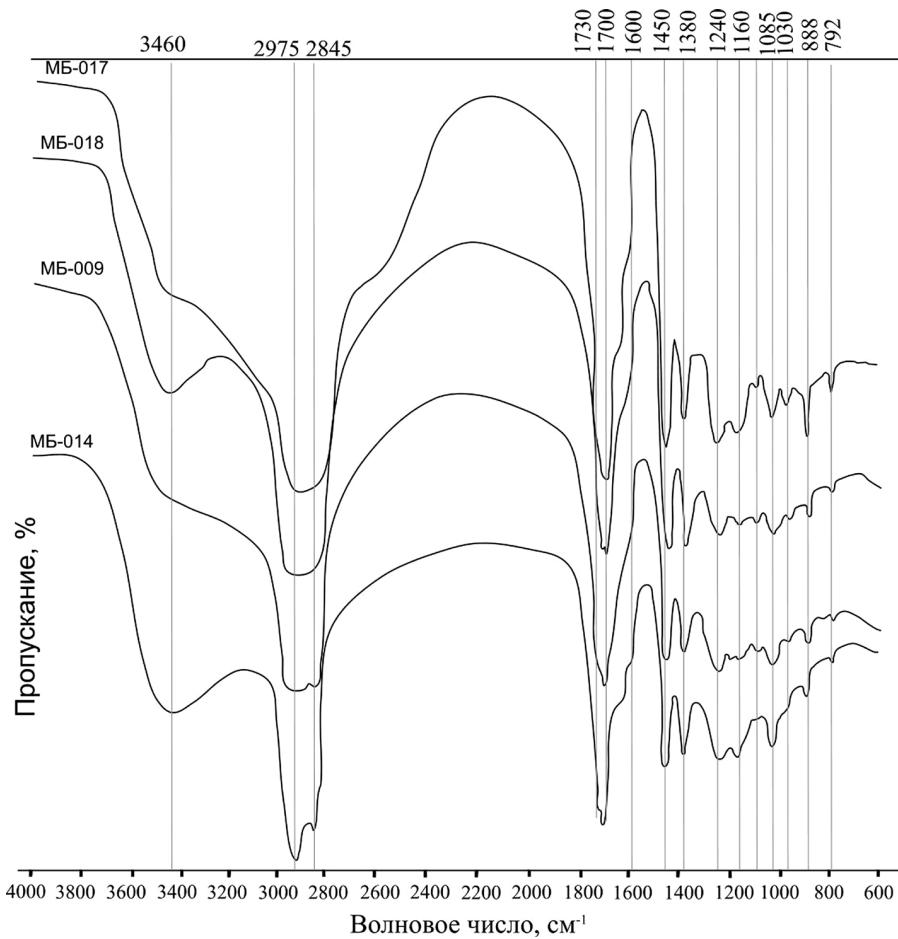


Рис. 3. ИК-спектры поглощения ископаемых смол Якутии

Fig. 3. IR spectra of fossil resins of Yakutia

зисных линий по оптической плотности полос (D) и представлены в таблице 4.

Сравнение инфракрасных спектров изученных ископаемых смол показывает, что они дают очень схожие ИК-спектры в высокочастотном диапазоне длин волн 3500–2600 см⁻¹ (рис. 3). Эти сходства отражают их общее хвойное происхождение (Langenheim, 2003; Seyfullah et al., 2018). Тем не менее в спектрах существуют различия в положении и интенсивности специфических полос поглощения, которые могут быть использованы для диагностики и установления видов смол. Эти тонкие спектроскопические различия отражают прежде всего вариации в строении терпеноидных структур.

Спектры разделяются на две группы, отличающиеся интенсивностью некоторых полос. Первая группа (МБ-009, 017, 018) по спектральным признакам близка к геданиту, вторая (МБ-014) — к ретиниту. Геданиты и ретиниты имеют различия в химическом составе и структуре, что отражается на спектрах поглощения. ИК-спектры геданита отличаются от ретинита большей интенсивностью полос поглощения алифатических, гетеросодержащих и ароматических групп. Большое содержание алифатических групп в геданитах может указывать на наличие более длинных или разветвленных алифатических цепей в их структуре (Lin, Ritz, 1993). Известно, что у смол на основе лабдана из-за диагенетических процессов часть терпенов подвергается процессам перекрестного сшивания, образуя полимерно-решетчатую структуру, которая очень

устойчива к химическому разрушению. В то же время смолы со скелетными структурами пимарана и абietана не обладают функциональными группами, необходимыми для образования стабильных полимеров, поэтому они склонны к разрушению и потере различных структурных компонентов (Langenheim, 2003). Для ретинитов наблюдается одинаковая интенсивность полос при 1250 и 1160 см⁻¹, в то время как для геданитов отмечается их разное отношение с максимумом при 1250 см⁻¹ (Мартиросян, 2012). Отсутствие полосы поглощения при 1085 см⁻¹ в ретинитах и наличие такой в геданитах также свидетельствуют о различиях в их химическом составе.

Анализ содержания полос, связанных с карбонильным и карбоксильным растяжениями в сложных эфирах (1730 и 1250 см⁻¹) и карбоновых кислотах (1700 и 1160 см⁻¹), может применяться для оценки степени окисления, но не подходит для использования в качестве индикатора зрелости, поскольку соотношение карбонильных групп связано не только с процессом созревания, но и с ботаническим происхождением смол и процессами предзахороненного окисления, вызванными, например, воздействием солнечного света или процессами изменения в мелководных лагунных водах. По соотношению данных групп в эфирах и карбоновых кислотах геданиты являются более окисленными по сравнению с ретинитом (табл. 4).

Заметим, что молекулярный состав геданитов Якутии с возрастом (от эоцена до сеномана) меняет-



ся, но незначительно, что подчеркивает устойчивость смол в условиях диагенеза (табл. 4). Сочетание литологических и локальных гидродинамических условий осадочных пород, где встречаются ископаемые смолы, является фактором, оказывающим непосредственное влияние на окислительно-восстановительные условия захоронения ископаемых смол. Так, мелкозернистые отложения (глины), застойные воды с низким содержанием растворенного кислорода играют важную роль в сохранении ископаемых смол.

При этом можем заметить, что уменьшение числа кислородсодержащих групп происходит, видимо, за счет реакций декарбоксилирования и дегидратации. Насыщенные алифатические и ненасыщенные связи (например, $R_1R_2C=CHR_3$) также незначительно уменьшаются, возможно за счет образования новых циклических структур полимерной матрицы. Уменьшается ароматическая составляющая.

Как упоминалось нами ранее, породы, где встречаются изученные ископаемые смолы, представляют собой песчано-глинистые образования с содержанием такого типично диагенетического минерала, как сидерит, что свидетельствует об интенсивности процессов диагенеза в осадке, где захоронялась ископаемая смола. Геохимическая обстановка образования сидерита характеризуется слабощелочной реакцией среды. В такой среде содержащие кислород иловые воды могли взаимодействовать (гидролиз, полимеризация) с геданитом (с его ароматической составляющей) и способствовать образованию различных окискоединений ($-COOH$), активно участвующих в дальнейшем формировании полимерного каркаса через реакции этерификации с образованием, например, эфирных связей $C-O-C$ (1085 cm^{-1}) с большими циклами, содержание которых у геданитов постепенно увеличивается (табл. 4).

Тем не менее, несмотря на то, что химическое воздействие среды, существовавшей в осадке, на живицу разных семейств хвойных происходило при одинаковых условиях — в анаэробной среде заболоченных почв и торфяников (что подтверждается видовым составом растений и насекомых (Жерихин, 1978; Головнева, 2005; Гончаров, Кулькова, 1970), указывающим на обширную заболоченную среду хвойного леса того времени), в результате образовались ископаемые смолы с похожими свойствами (хрупкость, плотность), но разной химической составляющей.

Дифференциальный-термический анализ. Кривые ДТА изученных ископаемых смол демонстрируют явления, отражающие лишь общие черты их термических характеристик (например, эндотермичность для процессов испарения и экзотермические сигналы для

реакций разложения) (рис. 4). Такое поведение, с другой стороны, не так уж нетипично для такого многокомпонентного природного продукта, как ископаемые смолы. Однако ДТА-кривые позволяют выявить некоторые различия (табл. 5). Деградация ископаемых смол в окислительной атмосфере представляет собой многоступенчатый процесс. Разложение ископаемых смол проходит в основном в четыре этапа.

Первый этап — экзотермическое явление, слабое и широкое, оно наблюдается для геданитов между 20 и $140-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ и для ретинита между 20 и $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ и объясняется процессами испарения воды, летучих компонентов и низкомолекулярных соединений (Feist et al., 2007). В первой температурной области наблюдается относительно небольшая потеря массы (около 10%). Второй этап, отвечающий плавлению ископаемых смол, начинается у геданитов при $140-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ и заканчивается при $310-330\text{ }^{\circ}\text{C}$, а у ретинита начинается при $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ и заканчивается при $260\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ему соответствует прямой участок на кривой ДТА, потеря массы от 12 до 16 %. Низкая температура конца второго эффекта у ретинитов по сравнению с геданитами объясняется отсутствием полимерной структуры.

ДТА-кривые изучаемых ископаемых смол на третьем этапе показывают несколько эндотермических эффектов. У геданитов, основанных на преимуществен-

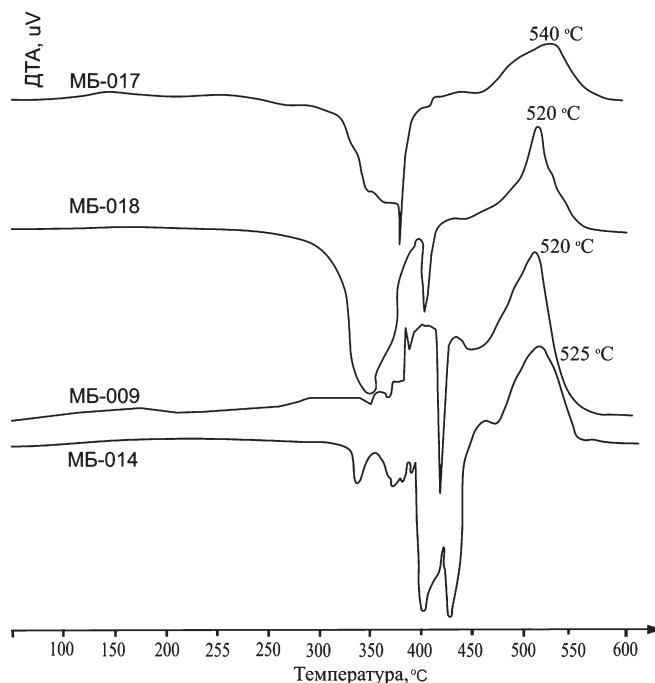


Рис. 4. ДТА-кривые ископаемых смол Якутии

Fig. 4. DTA curves of fossil resins of Yakutia

Таблица 5. Температурные характеристики ископаемых смол Якутии

Table 5. Temperature characteristics of fossil resins of Yakutia

Образец / Sample	Т _{ДТА} , °C, этапы / stages			
	I	II	III	IV (max)
геданит / gedenite				
МБ-017	20–160	160–330	330–450	450–580 (540)
МБ-018	20–150	140–310	310–450	450–560 (520)
МБ-009	20–140	140–310	310–450	450–560 (520)
ретинит / retinite				
МБ-014	20–140	140–260	330–460	460–550 (525)



но на полимерах лабданоидных карбоновых кислот, в диапазоне 300–470 °C эти процессы могут быть связаны с диспропорционированием этих кислот, а также со сложными реакциями их разложения. Для ретинитов, содержащих в основном неполимерные структурные компоненты, в первую очередь абиетиновую кислоту, на данном этапе, вероятно, происходит ее декарбоксилирование, кипение образующегося расплава и испарение выделяющихся газообразных продуктов. Известно, что при температуре 300–310 °C абиетиновая кислота образует ретен — ароматический углеводород, алкилпроизводное фенантрена, который кипит при 340 °C. Потеря массы вещества на третьем этапе весьма значительна — 60–66 %.

Четвертый (заключительный) этап, связанный с горением, наблюдается при 440–600 °C с максимумом при 495–540 °C. Он протекает в одну широкую ступень, что хорошо согласуется с некоторыми литературными данными (Lühr, 2004). Потеря массы составляет около 20–22 %.

Данные ДТА показали, что нет прямой корреляции между возрастом ископаемой смолы и ее термической стабильностью (табл. 5). Тем не менее заметим, что самый зрелый образец ископаемой смолы из тимирдяжской свиты (сеноман) демонстрирует наибольшую интенсивность экзотермического эффекта и меньший температурный максимум по сравнению с более молодой смолой из тастахской свиты (палеоцен-эоцен), имеющей низкую интенсивность экзотермического пика, но больший температурный максимум на последнем этапе разложения. Это можно объяснить тем, что ископаемая смола, содержащая в своем составе меньше ароматических компонентов, выгорает раньше и интенсивнее, и наоборот (табл. 4).

Ботаническое происхождение. Проведен анализ информации по остаткам хвойных пород, произраставших в пределах Лено-Вилюйской впадины и Яно-Индигирской низменности в мел-палеогеновое время, с целью выявления предположительного ботанического источника встречающихся там ископаемых смол (табл. 2). В отложениях, где среди хвойных доминируют представители семейства *Pinaceae*, встречается ретинит, а там, где преобладает пыльца семейства *Cupressaceae* (*Taxodiaceae*) — геданит. Это позволило подтвердить, что представители семейств *Pinaceae* и *Cupressaceae* (*Taxodiaceae*) действительно могут являться основным ботаническим источником образования таких ископаемых смол, как ретинит и геданит соответственно. Таким образом, ретинит и геданит — разновидности ископаемых смол, имеющие различный ботанический источник, что сказывается на их химическом составе. Заметим, остатки пыльцы представителей семейства *Araucariaceae* не были найдены в приведенных выше отложениях, поэтому предположения, что данное семейство может быть источником таких ископаемых смол, как геданиты, по-прежнему до конца не обоснованы. Для однозначного определения ботанического источника данных ископаемых смол необходимы дальнейшие исследования.

Заключение

Впервые проведено исследование молекулярного состава (по данным инфракрасной спектроскопии)

и термических свойств ископаемых смол Якутии из местонахождений Опока-Хая, р. Лямпушки и оз. Тастах, что является важным для диагностики этих смол и дальнейшего стратиграфического сравнения со смолами других арктических регионов, а также выяснения их региональных особенностей. Результаты исследований с помощью ИКС показали, что ископаемые смолы представлены в основном хрупкими разновидностями — геданитами. При этом также могут встречаться ретиниты. Это обстоятельство интересно тем, что на севере Евразии геданит до сих пор был известен в основном лишь в палеогеновых отложениях Балтики, где он встречается в небольшом количестве совместно с сукцинитом. Это указывает на его значительно более широкое распространение, чем считалось ранее.

На основании полученных ИК-спектроскопических данных ископаемых смол Якутии сделаны выводы об особенностях молекулярного состава геданита и ретинита. Геданит по сравнению с ретинитом содержит в своем составе больше кислородсодержащих соединений (карбоновых кислот, спиртов и эфиров) и алифатических и ароматических углеводородов. Это можно объяснить разным ботаническим происхождением (т. е. изначально живица могла содержать больше таких компонентов), особенностями их химической структуры, различным воздействием на ископаемые смолы геохимической обстановки.

Замечено, что образцы ископаемой смолы, имеющие в своем составе меньше ароматических компонентов, выгорают раньше, данный процесс протекает более интенсивно, и наоборот.

Проанализирована информация по хвойным растительным остаткам в пределах местонахождения изучаемых ископаемых смол Якутии, что позволило подтвердить, что представители хвойных семейств *Cupressaceae*, *Taxodiaceae* действительно могут являться основным ботаническим источником при образовании геданита, а семейства *Pinaceae* — ретинита.

Молекулярная характеристика ископаемых смол будет оставаться основным направлением их исследований в обозримом будущем, поскольку изучение молекулярного состава может помочь более глубоко понять устойчивость и изменчивость смол в различных геологических условиях, что, в свою очередь, принесет новые знания о процессах, происходящих в земной коре на протяжении миллионов лет.

Литература / References

- Баранова Ю. Л., Бискэ С. Ф. Стратиграфия кайнозоя и история развития рельефа Восточно-Сибирской низменности // Четвертичная геология и геоморфология Северо-Восточной Сибири. Новосибирск: Наука, 1964. С. 41–63.
Baranova Yu. L., Biske S. F. Stratigraphy of the Cenozoic and the history of the development of the relief of the East Siberian Lowland: Quaternary Geology and Geomorphology of Northeastern Siberia. Novosibirsk: Nauka, 1964, pp. 41–63. (in Russian)
- Болховитина Н. А. Спорово-пыльцевые комплексы мезозойских отложений Вилюйской впадины и их значение для стратиграфии. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 186 с.
Bolkhovitina N. A. Pollen-spore complexes of Mesozoic



- deposits of the Vilyuy Basin and their significance for stratigraphy. Moscow: USSR AS Publishing House, 1959, 186 p. (in Russian)
- Бычков А. А. Очерки Якутской области: С устья реки Лены: (путевые заметки). Томск: Паровая типо-лит. П. И. Макушина. 1899. 68 с.
- Bychkov A. A. Essays on the Yakutsk Region: from the mouth of the Lena River: (travel notes). Tomsk: Printing House of P. I. Makushin, 1899, 68 p. (in Russian)
- Вахрамеев В. А. Стратиграфия и ископаемая флора юрских и меловых отложений Вилюйской впадины и прилегающей части Приверхоянского прогиба. Региональная стратиграфия СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1958. Т. 3. 137 с.
- Vakhrameev V. A. Stratigraphy and fossil flora of Jurassic and Cretaceous deposits of the Vilyuy Basin and adjacent part of the Preverkhoyansk Fold. Regional Stratigraphy of the USSR. Vol. 3. Moscow: USSR AS Publishing House, 1958, 137 p. (in Russian)
- Вахрамеев В. А. Стратиграфия мезозойских отложений восточной и южной частей Сибирской платформы: Проект унифицированной и корреляционной схем // Труды Межвед. совещ. по разработке унифиц. стратигр. схем Сибири. Л.: Гостоптехиздат, 1957. С. 19–26.
- Vakhrameev V. A. Stratigraphy of Mesozoic deposits of the eastern and southern parts of the Siberian Platform: a project of unified and correlation scheme. Proceedings of the Interdepartmental Conference on the Development of Unified Stratigraphic Schemes of Siberia. Leningrad: Gostooptizdat, 1957, pp. 19–26. (in Russian)
- Воллосович К. А. Геологические наблюдения в тундре между нижними течениями рр. Лены и Колымы // Тр. Комис. по изуч. ЯАССР. Вып. 15. Л.: Изд-во АН СССР, 1930. С. 299–357.
- Vollosovich K. A. Geological observations in the tundra between the lower reaches of the Lena and Kolyma rivers. Proceedings of the Commission for the Study of the Yakut Autonomous Soviet Socialist Republic. Issue 15. Leningrad: USSR AS Publishing House, 1930, pp. 299–357. (in Russian)
- Геденшторм М. М. Записки о Сибири. СПб.: тип. Мед. деп. м-ва внутр. дел, 1830. 165 с.
- Gedensthorm M. M. Notes on Siberia. St. Petersburg: Medical Department Printing House, Ministry of Internal Affairs, 1830, 165 p. (in Russian)
- Головнева Л. Б. Фитостратиграфия и эволюция альб-кампансской флоры на территории Сибири // Меловая система России: проблемы стратиграфии и палеогеографии. СПб.: Изд-во СПб ун-та, 2005. С. 177–197.
- Golovneva L. B. Phytostratigraphy and evolution of the Alb-Campanian flora in Siberia. The Cretaceous System of Russia: Problems of Stratigraphy and Paleogeography. St. Petersburg: SPb University Press, 2005, pp. 177–197. (in Russian)
- Гончаров В. Ф., Кулькова И. А. Об эоценовом возрасте та-стахской свиты в Яно-Индигирской низменности // Геология и геофизика. 1970. № 11. С. 87–93.
- Goncharov V. F., Kulkova I. A. On the Eocene age of the Takhtakh suite in the Yano-Indigirka Lowland. Geology and Geophysics, 1970, No. 11, pp. 87–93. (in Russian)
- Грунвальд П. В. Горные богатства Якутии. Якутск: Типография Якутгосиздата, 1927. 127 с.
- Grunwald P. V. Mineral Resources of Yakutia. Yakutsk: Yakutgosizdat Printing House, 1927, 127 p. (in Russian)
- Гусев А. И. Геология, угленосность и нефтеносность низовьев реки Оленек. Л.; М.: Изд-во Главсевморпути, 1950. Т. 1. 99 с.
- Gusev A. I. Geology, coal and oil content of the lower reaches of the Olenek River. Vol. 1. Leningrad, Moscow: Publishing house of Glavsevmorput, 1950, 99 p.
- Жерихин В. В. Развитие и смена меловых и кайнозойских фаунистических комплексов (трапеевые и хелицировые). М.: Наука, 1978. 200 с.
- Zerikhin V. V. Development and change of Cretaceous and Cenozoic faunal complexes (tracheates and helicertates). Moscow: Nauka, 1978, 200 p. (in Russian)
- Кайялайнен В. И. Стратиграфия нижнего кайнозоя Яно-Индигирской (Приморской) низменности // Учен. зап. НИИГА. Регион. геология. 1967. Вып. 10. С. 23–34.
- Kailainen V. I. Stratigraphy of the Lower Cenozoic of the Yano-Indigirka (Primorsky) Lowland. Proceedings of the NIIGA. Regional Geology, 1967, 10, pp. 23–34. (in Russian)
- Кибер А. Извлечение из журнала путешествия доктора Кибера с мнением об оном академика Захарова // Зап. Госуд. адмиралт. департ. 1827. Ч. 13. С. 179–216.
- Kiber A. Extract from the travel journal of Dr. Kiber with an opinion about Academician Zakharov. Proc. of the State Admiralty Department, 1827, No. 13, pp. 179–216. (in Russian)
- Киричкова А. И. Фитостратиграфия и флора юрских и нижнемеловых отложений Ленского бассейна. Л.: Недра, 1985. 223 с.
- Kirichkova A. I. Phytostratigraphy and flora of Jurassic and Lower Cretaceous deposits of the Lena Basin. Leningrad: Nedra, 1985, 223 p. (in Russian)
- Киричкова А. И., Сластенов Ю. Л. Стратиграфия и флора нижнемеловых отложений р. Леписке (Западное Приверхоянье) // Тр. ВНИГРИ. 1966. Вып. 249. С. 147–169.
- Kirichkova A. I., Slastenov Yu. L. Stratigraphy and flora of the Lower Cretaceous deposits of the Lepiske River (Western Preverkhoyansk). Proceedings of VNIIGRI, 1966, 249, pp. 147–169. (in Russian)
- Криштофович А. Н. Ископаемые флоры Пенжинской губы, оз. Тастах и хр. Рарыткын // Тр. Ботан. ин-та АН СССР. Сер. 8. Палеоботаника. 1958. Вып. 3. С. 76–120.
- Kristofovich A. N. Fossil floras of the Penzyinsk Bay, Tastaakh Lake, and Rarytkin Ridge. Proceedings of the Botanical Institute of the USSR Academy of Sciences. Series 8. Paleobotany, 1958, 3, pp. 76–120. (in Russian)
- Кулькова И. А. Палинологические исследования эоценовых отложений Яно-Индигирской низменности. Новосибирск: Наука, 1973. 115 с.
- Kulkova I. A. Palynological studies of Eocene deposits of the Yano-Indigirka Lowland. Novosibirsk: Nauka, 1973, 115 p. (in Russian)
- Мартиросян О. В. Факторы и механизмы структурной эволюции органических минералов и минералоидов. Екатеринбург: УрО РАН, 2012. 241 с.
- Martirosyan O. V. Factors and mechanisms of the structural evolution of organic minerals and mineraloids. Yekaterinburg: Ural Branch of RAS, 2012, 241 p. (in Russian)
- Пчелина Т. М. Литолого-петрографическая характеристика мезозойских пород сангарского района Ленского бассейна // Литологическая характеристика пород



- и состав углей Ленского бассейна. М.: Госгортехиздат, 1960. С. 24–92.
- Pchelina T. M. Lithological and petrographic characteristics of Mesozoic rocks of the Sangar District of the Lena Basin. Lithological characteristics of rocks and coal composition of the Lena Basin. Moscow: Gosgortekizdat, 1960, pp. 24–92. (in Russian)
- Савкевич С. С. Новое в минералогическом изучении янтаря и некоторых других ископаемых смол // Самоцветы. Л.: Наука, 1980. С. 17–28.
- Savkevich S. S. New findings in the mineralogical study of amber and some other fossil resins. Semiprecious Stones. Leningrad: Nauka, 1980, pp. 17–28. (in Russian)
- Фигурин А. Е. Замечания медико-хирурга Фигурина о различных предметах естественной истории и физики, учлененные в Устьянске и окрестностях оного в 1822 г. // Сиб. вестник. 1823. Ч. 20/21. С. 196–197.
- Figurin A. E. Remarks of the medic-surgeon Figurin on various subjects of natural history and physics, made in Ustyan and surrounding areas in 1822. Siberian Herald, 1823, No. 20/21, pp. 196–197. (in Russian)
- Фрадкина А. Ф. Спорово-пыльцевые комплексы мезозоя Западной Якутии. Л.: Недра, 1967. 124 с.
- Fradkina A. F. Spore-pollen complexes of the Mesozoic of Western Yakutia. Novosibirsk: Nauka, 1967. 124 p. (in Russian)
- Швейгер Г. Исследование янтаря // Сиб. вестник. 1822. Ч. 17. С. 15–28.
- Schweiger G. Study of amber. Siberian Herald, 1822, No. 17, pp. 15–28. (in Russian)
- Eichwald E. Ueber Ichthyosauren und Ceratiten Russlands. Bull. Acad. Sci. St.-Ptb. 1841. Bd. 11. No. 8. Col. 108–119.
- Garcia-Valles M., Mariano A. Di., Alfonso P. et. al. Differentiation between copal and amber by their structure and thermal behaviour. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2023. Vol. 148. P. 13027–13037.
- Jablonski P., Golloch A., Borchard W. DSC-measurements of amber and resin samples. *Thermochim. acta*. 1999. Vol. 333. No. 1. P. 87–93.
- Kosmowska-Ceranowicz B. Succinate and some other fossil resins in Poland and Europe (deposits, finds, features and differences in IRS). *Estudios del Museo de ciencias naturales de Alava*. 1999. Vol. 14. No. 2. P. 73–117.
- Langenheim J. H. Plant resins: chemistry, evolution, ecology and ethnobotany. Portland, Cambridge: Timber Press, 2003. 586 p.
- Lin R., Ritz G. P. Studying individual macerals using IR microspectroscopy, and implications on oil versus gas/condensate proneness and «low-rank» generation. *Organic Geochemistry*. 1993. Vol. 20. P. 695–706.
- Lühr C. Charakterisierung und klassifizierung von fossilen Harzen (Characterisation and classification of fossil resins): Ph. D. Duisburg: University Duisburg-Essen, 2004. 258 p.
- Natkaniec-Nowak L., Drzewicz P., Stach P., et. al. The overview of analytical methods for studying of fossil natural resins. *Critical reviews in Analytical chemistry*. 2023. Vol. 21. P. 1–23.
- Nissenbaum A., Yaker D. Stable isotope composition of amber. In: *Amber, resinite, and fossil resins*. Washington: ACS, 1995. P. 32–42.
- Pagacz J., Naglik B., Stach P., Drzewicz P., Natkaniec-Nowak L. Maturation process of natural resins recorded in their thermal properties. *J. Materials Science*. 2020. Vol. 55. No. 10. P. 4504–4523.
- Ragazzi E., Roghi G., Giaretta A., Gianolla P. Classification of amber based on thermal analysis. *Thermochim. Acta*. 2003. Vol. 404. P. 43–54.
- Seyfullah L. J., Beimforde C., Corso J. D. et. al. Production and preservation of resins – past and present. *Biological reviews*. 2018. Vol. 93. No. 3. P. 1684–1714.
- Toll E. Tertiare Pflanzen der Insel Neusibirien. Saint-Petersburg: Acad. Sci., 1890. 22 p. (Mem. Acad. sci. St.-Ptb.; Bd. 37. No. 5).

Поступила в редакцию / Received 14.07.2025



Оценка степени перекристаллизации карбонатов по шлифам на основе машинного обучения

А. В. Журавлев

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия

micropalaeontology@gmail.com

Процессы перекристаллизации в карбонатах могут оказывать влияние на химический и изотопный состав, на сохранность органического вещества и органических остатков, меняют фильтрационно-емкостные свойства породы. Учет этих процессов представляется критическим для корректной интерпретации результатов широкого спектра аналитических исследований. На основе технологии компьютерного зрения и машинного обучения разработаны модели для качественной и количественной экспресс-оценки степени перекристаллизации осадочных карбонатных пород по изображениям шлифов. Обучение моделей осуществлено на базе 300 изображений и 45 000 фрагментов изображений шлифов. Достигнутая точность моделей превышает 90 %. Результаты применения моделей и программного обеспечения на их основе можно использовать для сопоставления геохимической и изотопной информации, а также для экспресс-выбора наименее вторично измененных образцов для проведения аналитических исследований.

Ключевые слова: карбонатные породы, шлифы, перекристаллизация, машинное обучение, классификация изображений

Estimation of the degree of recrystallisation of carbonates based on machine learning using thin sections

A. V. Zhuravlev

Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar, Russia

Recrystallisation processes in carbonates can affect the chemical and isotopic composition, the preservation of organic matter and fossils, change the filtration-capacity properties of the rock. Consideration of these processes seems to be critical for correct interpretation of the results of a wide range of analytical studies. On the basis of computer vision and machine learning technology the models for qualitative and quantitative express estimation of the degree of recrystallisation of sedimentary carbonate rocks are developed on the basis of thin-section images. The models have been trained on the basis of 300 images and 45000 fragments of thin-section images. The achieved accuracy of the models exceeds 90 %. The results of application of models and software based on them can be used for comparison of geochemical and isotopic information, as well as for express selection of the least recrystallised samples for analytical studies.

Keywords: carbonate rocks, thin-sections, recrystallisation, machine learning, image classification

Введение

Процессы перекристаллизации и других вторичных преобразований в осадочных карбонатах могут оказывать влияние на химический и изотопный состав, на сохранность органического вещества и органических остатков, меняют фильтрационно-емкостные свойства породы. Это, в свою очередь, определяет пригодность или непригодность соответствующих образцов для проведения тех или иных анализов и влияет на интерпретацию результатов. В случае когда целью аналитических исследований выступает «первичный» химический или изотопный состав, учет степени измененности породы в ходе вторичных процессов представляется критическим для корректной интерпретации.

Возможны различные способы оценки степени вторичной преобразованности осадочных карбонатных пород:

— экспертиза оценка, учитывающая комплекс различных признаков (Логвиненко, Сергеева, 1986; Систематика..., 1998; Гмид, 2006). Основные недостатки экспертизы оценки — ее трудоемкость, плохая воспроизводимость, неоднозначность и качественный характер;

— оценка по разнообразным геохимическим индексам и содержанию Na, Sr, Mg, Mn, Fe, Zn (Brand, Veizer, 1980; Swart, 2015; Mathieu, 2018 и многие другие). Предполагается, что при раннем диагенезе в карбонатах снижается содержание Na, Sr, Mg и возрастает содержание Mn, Fe, Zn (Brand, Veizer, 1980). Основной недостаток этого метода — ресурсоемкость. Для проведения оценки необходимо выполнение серии геохимических анализов. Поэтому данный способ не подходит в качестве экспресс-метода;

— оценка по среднему размеру кристаллитов первичного микрита, основанная на том, что перекристал-

Для цитирования: Журавлев А. В. Оценка степени перекристаллизации карбонатов по шлифам на основе машинного обучения // Вестник геонук. 2025. 8(368). С. 25–30. DOI: 10.19110/geom.2025.8.4

For citation: Zhuravlev A. V. Estimation of the degree of recrystallisation of carbonates based on machine learning using thin sections. Vestnik of Geosciences, 2025, 8(368), pp. 25–30. DOI: 10.19110/geom.2025.8.4

лизация часто ведет к укрупнению кристаллитов (Brand, Veizer, 1980; Логвиненко, Сергеева, 1986; Flügel, 2010; Платонов, Тугарова, 2017; Журавлев и др., 2025). Основной недостаток этого подхода — относительно высокая трудоемкость, связанная с необходимостью проведения массовых замеров в шлифах. Возможна автоматизация процесса измерений, но при этом снижается достоверность, что обусловлено сложностью автоматического определения границ кристаллитов на изображении шлифа.

Цель данного исследования — разработка экспресс-метода автоматизированной оценки «степени перекристаллизации» осадочных карбонатов по шлифам. Основное назначение такой оценки состоит в определении пригодности породы для изучения «первоначального» изотопного состава углерода и кислорода и возможности использования этих изотопных данных для стратиграфии. Необходимо отметить, что в данной работе под перекристаллизацией понимается «перекристаллизация с частичным привносом вещества» (Григорьев, Жабин, 1975).

Предлагаемый подход основан на технологии компьютерного зрения и машинного обучения. Подобная технология демонстрирует хорошие результаты при анализе шлифов горных пород, в том числе карбонатных (например, Koeshidayatullah et al., 2020; Wang et al., 2023). Основной ее недостаток состоит в том, что системы компьютерного зрения представляют собой классический «черный ящик»: процесс принятия ими решений крайне сложно визуализировать и описать в привычных человеку терминах.

Методы и материалы

Методика машинного обучения заключалась в следующем (рис. 1). На основе экспертной оценки проводился выбор изображений шлифов, заведомо «перекристаллизованных», и «свежих» разностей карбонатов. К первым относились осадочные карбонаты с кристаллической структурой, а ко вторым — с сохранившимся базальным или базально-поровым микривенным цементом. Формирование выборок из крайних разностей обеспечивало снижение влияния субъективного фактора (эксперт не оценивал степень перекристаллизации). На основе выборок осуществлялась тренировка предварительно обученной модели распознавания изображений. Результатом стала модель компьютерного зрения, ориентированная на отнесение изображения шлифа к одному из классов: «перекристаллизованные карбонаты» и «неперекристаллизованные («свежие») карбонаты». Достоверность отнесения изображения к классу перекристаллизованных карбонатов, выраженная в процентах, составляет один из вариантов количественной оценки степени перекристаллизации рассматриваемого участка породы.

Если разбить изображение шлифа на квадратные фрагменты и провести процедуру обучения и классификации по этим фрагментам, то можно получить «карту» шлифа с отмеченными участками с различной степенью перекристаллизации. По такой карте можно оценить степень вторичных изменений породы по соотношению площади перекристаллизованного карбоната к общей изученной площади шлифа, что представляет собой количественную характеристику степени перекристаллизации.

Следует отметить, что такая оценка не является объективной, так как изначально основана на экспертных заключениях. Основное преимущество состоит в скорости получения, единобразности и, соответственно, хорошей воспроизводимости результатов.

В обучающую коллекцию вошли шлифы карбонатов из разрезов девонско-каменноугольного интервала Полярного и Приполярного Урала и Северного Приуралья. На основе экспертной оценки коллекция разделена на два класса: «перекристалли-

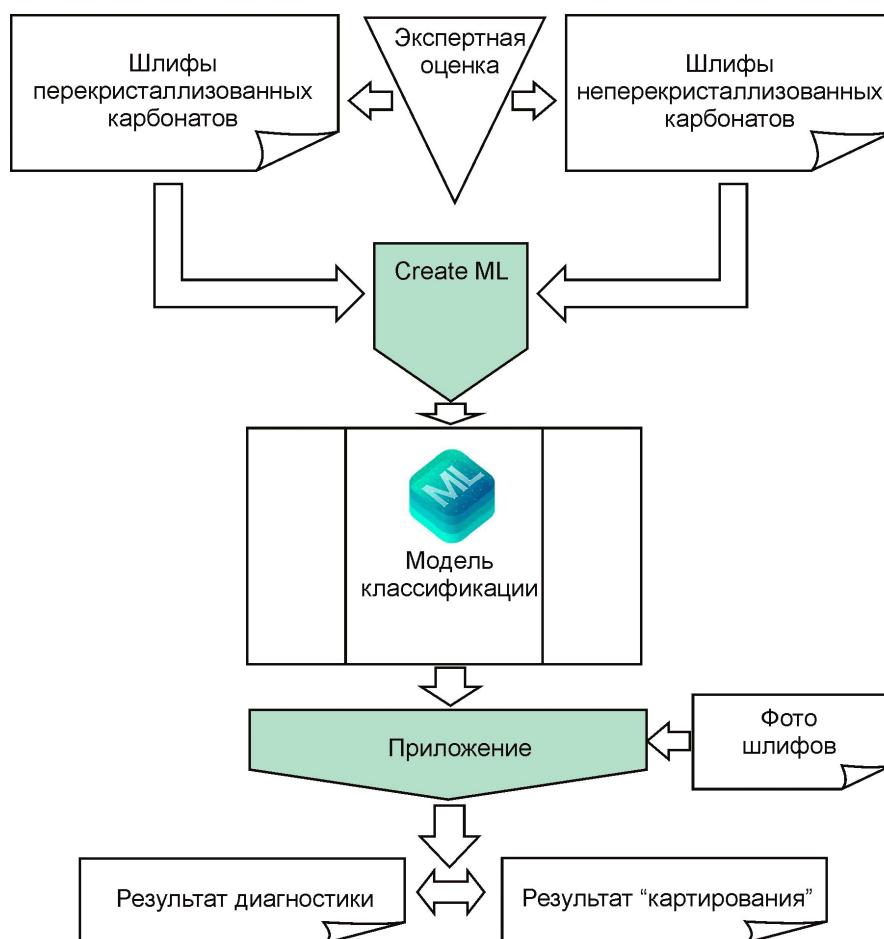


Рис. 1. Схема обучения и использования компьютерной модели для диагностики перекристаллизации карбонатных пород

Fig. 1. Scheme of training and use of a machine learning model for diagnostics of recrystallization of carbonate rocks

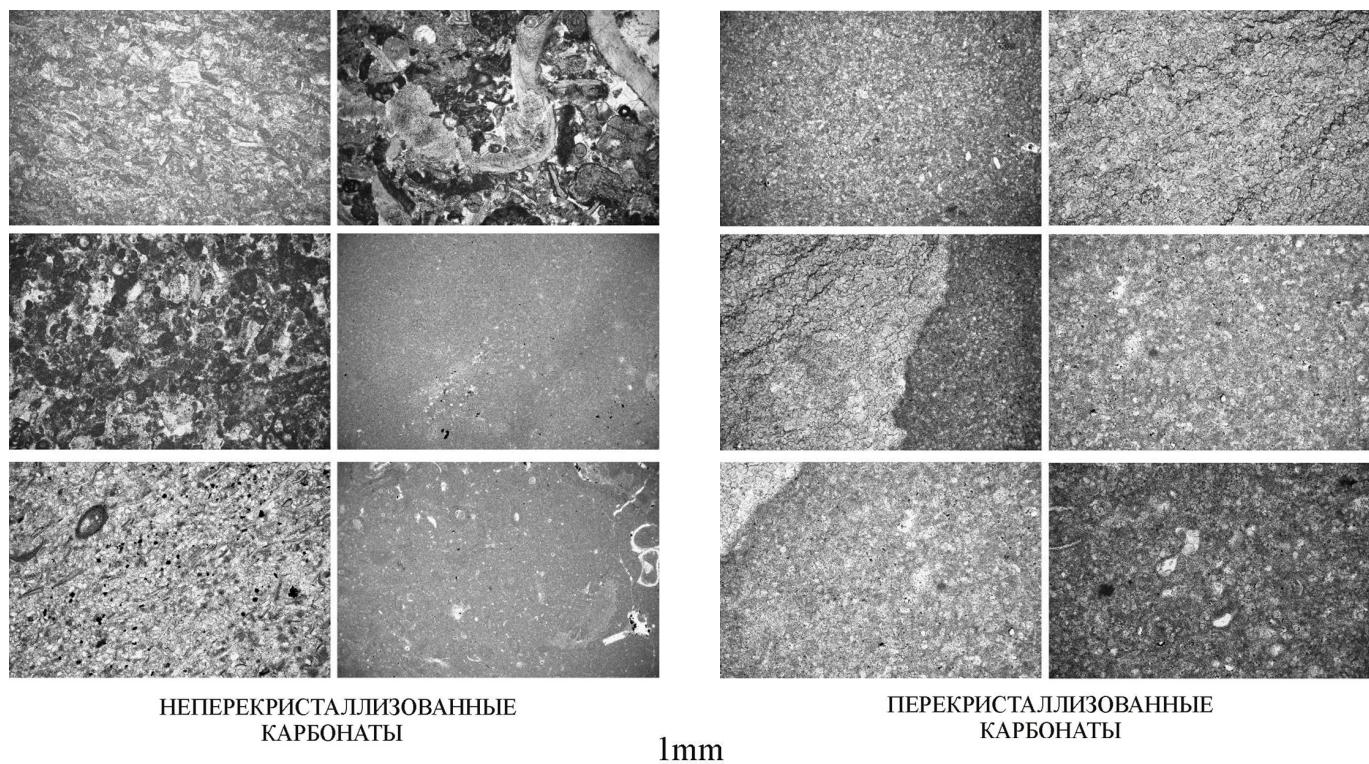


Рис. 2. Примеры микрофотографий шлифов карбонатных пород, использованных для обучения модели
Fig. 2. Examples of micrographs of thin sections of carbonate rocks used to train the model

зованные» карбонаты и «неперекристаллизованные» («свежие») карбонаты (рис. 2). Каждый класс представлен 152 микрофотографиями шлифов (изображения в градациях серого), полученными на микроскопе Olympus BX53M с объективом 5× цифровой камерой E3ISPM20000PA. Размер поля зрения камеры на шлифе составляет примерно 5 × 3.5 мм.

В качестве базовой взята модель классификации изображений Image Feature Print V2 (Apple Inc., 2017–2023). Обучение модели проводилось с использованием утилиты Create ML и фреймворка Core ML (Apple Inc., 2017–2024). Фреймворк Core ML позволяет использовать полученные модели в приложениях на базе различных операционных систем.

Обучение модели осуществлено за 16 итераций и позволило достичь точности 100 %. Проверка на тестовой выборке из более чем 300 изображений показала точность 99 %, только два изображения были неправильно диагностированы как неперекристаллизованный известняк (рис. 3). В тестовую выборку входили шлифы известняков девонско-каменноугольного интервала севера Урала, Пай-Хоя и Московской синеклизы.

Кроме того, была создана модель, обученная на 45 358 фрагментах изображений размером 360 × 360 пикселей (соответствуют площадке на шлифе примерно 0.5 × 0.5 мм). За 23 итерации достигнута точность модели 91 %. Маленькая площадь фрагментов препятствует дальнейшему повышению точности диагностики. Эта модель используется для создания «карт» для изображений шлифов, когда для каждого фрагмента изображения размером 360 × 360 пикселей определяется вероятность его отнесения к классу «перекристаллизованный карбонат».

Результаты и их обсуждение

Тестирование полученных моделей осуществлялось на коллекции шлифов из разреза верхней части сартьюской свиты (серпуховский ярус, противинский горизонт) в бассейне р. Малая Уса (Воркутинское по-перечное поднятие, северо-восток Печорской плиты).

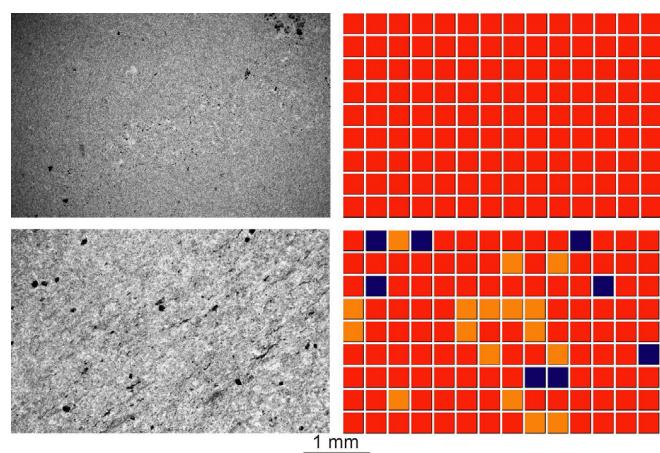


Рис. 3. Ошибочно диагностированные моделью шлифы (отнесены к «неперекристаллизованным» разностям) (слева) и результаты их «картирования» (справа). На картах темно-синим отмечены «неперекристаллизованные» участки, а оранжевым и красным — «перекристаллизованные»

Fig. 3. Thin sections incorrectly diagnosed by the model (classified as “non-recrystallized”) (left) and the results of their “mapping” (right). On the maps, non-recrystallized areas are marked in dark blue, and recrystallized areas are marked in orange and red

Результаты оценки «перекристаллизованности» карбоната по полному изображению и по результатам «картирования» в целом сходны (рис. 4). Примечательно, что изображения «перекристаллизованных» известняков, неправильно диагностированные как «свежие», при картировании показывают либо полную, либо существенную перекристаллизацию (рис. 3), несмотря на то, что формальная достоверность «картирования» ниже достоверности диагностики по полному изображению (91 и 99 % соответственно). Таким образом, количественная оценка «степени перекристаллизации» по результатам «картирования» изображения шлифа представляется более адекватной.

Сравнение результатов автоматической диагностики перекристаллизованных карбонатов с данными по среднему размеру кристаллитов микрита, измеренному по тем же шлифам, показало, что статистически значимых различий среднего размера кристаллитов микрита в «перекристаллизованных» и «свежих» карбонатах (по результатам автоматической классификации) не наблюдается. Тем не менее гистограммы распределения размеров кристаллитов в «перекристаллизованных» и «свежих» разностях несколько отличаются (рис. 5): максимум в «свежих» карбонатах расположен в интервале до 12 мкм, а в «перекристаллизованных» — в интервале от 12 до 15 мкм. Этот результат подтверждает экспертную оценку, согласно которой условная граница перекристаллизованных разностей проводится по размеру кристаллитов микрита около 10 мкм (Платонов, Тугарова, 2017, с. 60–61).

При этом следует отметить отсутствие статистически значимой зависимости изотопного состава кис-

лорода и углерода карбонатов от среднего размера кристаллитов (см. также: Журавлев и др., 2025). Это снижает ценность параметра «размер кристаллитов» для оценки первичности изотопного состава карбонатов. Возможно, отсутствие зависимости изотопного состава от среднего размера кристаллитов связано с тем, что основные изменения изотопного состава происходят на этапе раннего диагенеза, а кристаллиты могут расти на протяжении всех этапов постседиментационных преобразований, включая поздний диагенез и катагенез.

На этом же материале проведено сравнение изотопного состава кислорода карбонатов в «перекристаллизованных» и «свежих» разностях. Учитывая небольшой стратиграфический интервал, охваченный опробованием (часть противинского горизонта), и высокую чувствительность изотопного сигнала по кислороду к вторичным процессам (Виноградов, 2005), можно ожидать, что в «перекристаллизованных» разностях значения $\delta^{18}\text{O}$ должны быть ниже, чем в «свежих». Это предположение подтверждается. В образцах, диагностированных как «перекристаллизованные», среднее значение $\delta^{18}\text{O}$ (20.9 ‰ SMOW, $n = 20$) статистически значимо отличается от среднего значения $\delta^{18}\text{O}$ (21.7 ‰ SMOW, $n = 15$) в образцах, диагностированных как «свежие» (t -критерий Стьюдента = 2.7447, критическое значение — 2.0345). Статистическая оценка проведена с помощью программного обеспечения PAST (Hammer et al., 2001).

Эти наблюдения позволяют с большой долей уверенности предположить, что разработанная система диагностики «степени перекристаллизации» карбонатов по шлифам может использоваться как один из критериев для оценки «перекристаллизованности» изотопного состава карбонатов. Достоверность такой оценки выше, чем по размеру кристаллитов микрита.

С помощью разработанных моделей оценено возможное влияние «перекристаллизации» на изотопные отклонения по неорганическому углероду, которые широко используются в изотопной стратиграфии (Gröcke, 2020). В качестве тестового рассмотрено проявление изотопного экскурса по углероду (SN2) в разрезе на р. Каменке (юг Печоро-Кожвинского мегавала) (Zhuravlev et al., 2023). Этот отрицательный экскурс с небольшой амплитудой (0.5–2.5 ‰) рассматривается как потенциальный изотопно-стратиграфический маркер нижнего подъяруса серпуховского яруса (Zhuravlev et al., 2023; Журавлев и др., 2025).

Литологическая и стратиграфическая характеристики разреза (обнажение 125, координаты N 65°04'38" E 56°45'11.4") были опубликованы ранее (Вевель и др., 2017). По конодонтам и фораминиферам он сопоставлен с нижнсерпуховским подъярусом (конодонтовая зона *Lochriea ziegleri*). Разрез сложен карбонатными циклитами с пак-гнейстоунами в нижней части и вак-пакстоунами в верхней (Вевель и др., 2017) и вскрывает верхнюю часть клямшорской свиты (пачка 4). Отрицательный экскурс SN2 по изотопному составу неорганического углерода ($\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$) зафиксирован в средней части разреза и имеет амплитуду около 2 ‰ (рис. 6).

Для всего разреза проведена оценка «степени перекристаллизации» известняков по шлифам на основе «карт»; в пределах каждого шлифа оценивались несколько участков. Средняя по шлифу доля площади пе-

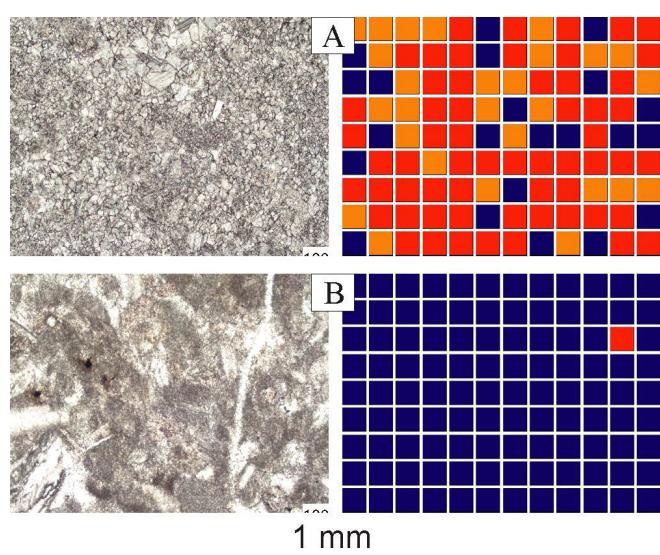


Рис. 4. Примеры «картирования» шлифов «перекристаллизованного» (А) и «неперекристаллизованного» (Б) известняка (по результатам автоматизированной классификации). На картах темно-синим отмечены «неперекристаллизованные» участки, а оранжевым и красным — «перекристаллизованные»

Fig. 4. Examples of thin sections "mapping" of recrystallized (A) and non-recrystallized (B) carbonates (based on the results of automated classification). Non-recrystallized areas are marked in dark blue on the maps, and recrystallized areas are marked in orange and red

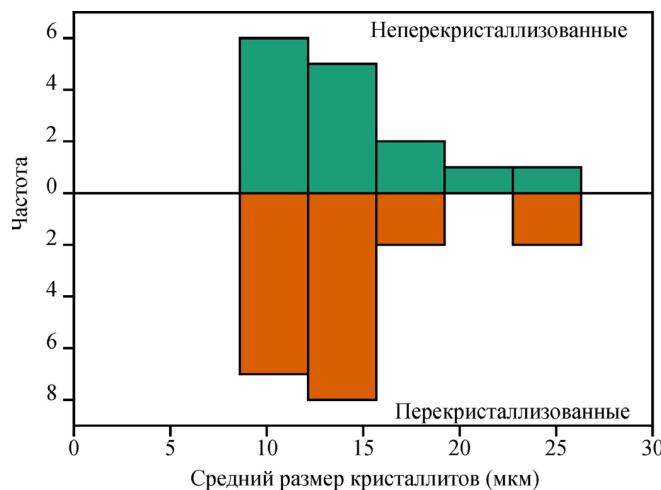


Рис. 5. Сравнение гистограмм распределения среднего размера кристаллитов микрита в «перекристаллизованных» и «неперекристаллизованных» известняках (по результатам автоматизированной классификации) на материале из сартьюской свиты (разрез на руч. Пайсошор, р. Малая Уса, Воркутинское поперечное поднятие, Печорская плита)

Fig. 5. Comparison of histograms of the distribution of the average size of micrite crystallites in recrystallized and non-recrystallized limestones (based on the results of automated classification) using material from the Sartyu Formation (the Paysoshor Creek section, Malaya Usa River, Vorkuta transverse uplift, Pechora plate)

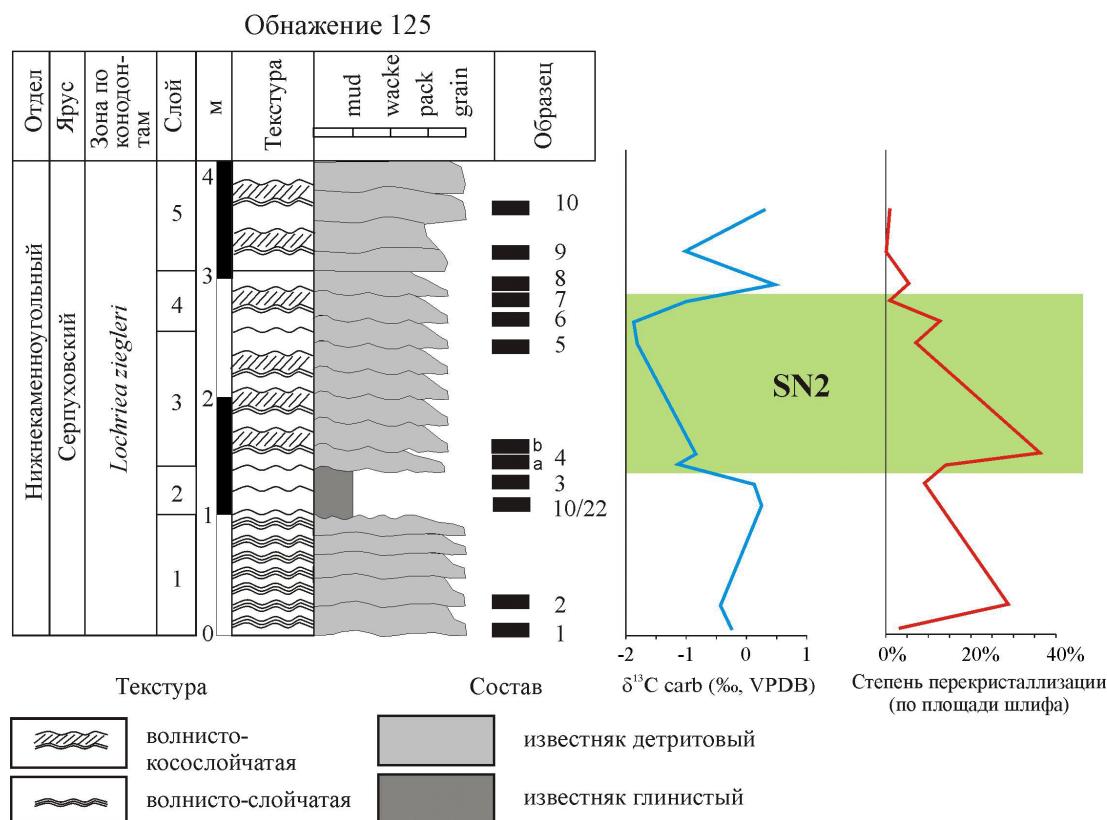


Рис. 6. Разрез средней части клямшорской свиты на р. Каменке (юг Печоро-Кожвинского мегавала, Печорская плита). Приведены графики изотопного состава неорганического углерода и «степени перекристаллизации» карбонатов.

Зеленым прямоугольником отмечен стратиграфический интервал изотопной аномалии SN2

Fig. 6. Log of the middle part of the Klyamshor Formation, the Kamenka River section (south of the Pechora-Kozhvinsky megaswell, Pechora plate). Graphs of the isotopic composition of inorganic carbon and the degree of recrystallization of carbonates are given. The stratigraphic interval of the SN2 isotopic anomaly is marked by the green rectangle

рекристаллизованных участков, выраженная в процентах, вынесена в виде графика (рис. 6). Наибольшие вторичные изменения зафиксированы в шлифах из средней части слоя 1 и нижней части слоя 3, но и в этом случае «перекристаллизованные» участки занимают менее 40 % исследованной площади шлифа.

Изотопное отклонение охватывает интервал разреза, отвечающий слою 3 и нижней части слоя 4, с минимальными значениями $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$ в самой верхней части слоя 3 и самой нижней части слоя 4. Для данного интервала диагностирована слабая степень перекристаллизации карбонатов — перекристаллизованные участки занимают менее 20 % исследованной площади шлифа (рис. 6).

В целом при сопоставлении графиков $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$ и степени перекристаллизации видно отсутствие корреляции этих параметров в рассматриваемом разрезе. Из этого можно сделать предположение о первичной природе изотопного отклонения SN2 в разрезе на р. Каменке.

Выводы

Таким образом, разработанные модели позволяют единообразно проводить качественную и количественную экспресс-оценку степени перекристаллизации карбонатных пород по шлифам с достоверностью более 90 %. Получаемые результаты можно использовать для сопоставления с геохимической и изотопной информацией, а также для быстрого выбора наименее



измененных образцов для проведения аналитических исследований. Последнее целесообразно при планировании геохимического или изотопного опробования, нацеленного на получение первичного (синседиментационного) сигнала. Недостатком методики, как и всех систем на основе компьютерного зрения, является отсутствие возможности визуализировать признаки, на которые опирается модель при классификации изображений. Единственным способом проверки корректности ее работы выступает тестирование.

Разработанные модели в формате Core ML и консольные приложения на их основе доступны по запросу у автора.

Исследования выполнены в рамках темы госзадания 122040600008-5 «Эволюция биоты и среды ее обитания как основа расчленения и геологической корреляции осадочного чехла Печорской плиты и ее складчатого обрамления». Автор выражает благодарность рецензентам за замечания и рекомендации, способствовавшие улучшению работы.

Литература / References

- Вевель Я. А., Груздев Д. А., Журавлев А. В. Фораминиферы и конодонты мелководных отложений раннесерпуховского возраста в разрезе на р. Каменка (Юг Печоро-Кожвинского мегавала) // Труды Института геологии Коми научного центра УрО Российской академии наук. 2017. Вып. 130. С. 14–23.
- Vevel Y. A., Gruzdev D. A., Zhuravlev A. V. Foraminifers and conodonts of the shallow-water deposits of early Serpukhovian age in the Kamenka section (south of Pechora-Kozhva megawell). Proc. of Institute of geology Komi SC UB RAS, 2017, 130, pp. 14–23. (in Russian)
- Виноградов В. И. Отражение глобальных изменений природной среды в изотопных характеристиках осадочных пород // Биосфера—экосистема—биота в прошлом Земли: палеобиогеографические аспекты: К 100-летию со дня рождения академика В. В. Менnera: Труды Геологического института РАН. 2005. Вып. 516. С. 433–466.
- Vinogradov V. I. Signs of global changes of environment in the isotopic characteristics of sedimentary rocks. Biosphere-ecosystem-biota in the past of the Earth: paleobiogeographic aspects. On the 100th anniversary of the birth of Academician V. V. Menner. Proc. of the Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, 2005, 516, pp. 433–466. (in Russian)
- Гмид Л. П. Литологические аспекты изучения карбонатных пород-коллекторов // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2006. № 1. URL: <https://www.ngtp.ru/rub/8/07.pdf>
- Gmid L. P. Lithological aspects of studying of carbonate reservoir rocks // Petroliferous geology. Theory and practice, 2006, No. 1. URL: <https://www.ngtp.ru/rub/8/07.pdf>. (in Russian)
- Григорьев Д. П., Жабин А. Г. Онтогения минералов. М.: Наука, 1975. 339 с.
- Grigor'ev D. P., Zhabin A. G. Ontogeny of minerals. Moscow: Nauka, 1975, 339 pp. (in Russian)
- Журавлев А. В., Вевель Я. А., Груздев Д. А. Серпуховская изотопная аномалия по неорганическому углероду: ве-
- роятные причины и перспективы использования в стратиграфии Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2025. Т. 20. № 1. URL: https://www.ngtp.ru/rub/2025/6_2025.html
- Zhuravlev A. V., Vevel Y. A., Gruzdev D. A. The Serpukhovian isotope anomaly in inorganic carbon possible causes and prospects for its application in the stratigraphy of the Timan-Pechora petroleum province // Petroliferous geology. Theory and practice, 2025, V. 20, No. 1. URL: https://www.ngtp.ru/rub/2025/6_2025.html EDN: LZGDXD (in Russian)
- Логвиненко Н. В., Сергеева Э. И. Методы определения осадочных пород: Учеб. пос. для вузов. Л.: Недра, 1986. 240 с.
- Logvinenko N. V., Sergeeva E. I. Methods of diagnostics of carbonate rocks. Leningrad: Nedra, 1986, 240 p. (in Russian)
- Систематика и классификации осадочных пород и их аналогов / В. Н. Шванов, В. Т. Фролов, Э. И. Сергеева и др. СПб.: Недра, 1998. 352 с.
- Systematics and classification of sedimentary rocks and their analogues. V. N. Shvanov, V. T. Frolov, E. I. Sergeeva et al. St. Petersburg: Nedra, 1998, 352 p. (in Russian)
- Brand U., Veizer J. Chemical diagenesis of a multicomponent carbonate system — 1: trace elements // Journal of sedimentary petrology. 1980. 50(4). P. 1219–1236.
- Flügel E. Microfacies of Carbonate Rocks. Analysis, Interpretation and Application. Heidelberg-Dordrecht-London-New York: Springer, 2010. 984 p. DOI: 10.1007/978-3-642-03796-2_7
- Gröcke D. R. Chapter 1. Carbon isotope stratigraphy: Principles and applications. Stratigraphy and Timescales 5. Cambridge: Academic Press, 2020. P. 1–40. DOI: 10.1016/bs.sats.2020.08.002
- Hammer Ø., Harper D. A. T., Ryan P. D. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis // Palaeontologia Electronica. 2001. 4(1). URL: http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm
- Koeshidayatullah A., Morsilli M., Lehrmann D. J., Al-Ramadan K., Payne J. L. Fully automated carbonate petrography using deep convolutional neural networks // Marine and Petroleum Geology. 2020. 122. 104687. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2020.104687.
- Mathieu L. Quantifying Hydrothermal Alteration: A Review of Methods // Geosciences. 2018. 8(245). DOI: 10.3390/geosciences8070245
- Swart P. K. The geochemistry of carbonate diagenesis: The past, present and future // Sedimentology. 2015. 62. P. 1233–1304. DOI: 10.1111/sed.12205
- Wang H., Cao W., Zhou Y., Yu P., Yang W. Multitarget Intelligent Recognition of Petrographic Thin Section Images Based on Faster RCNN // Minerals. 2023. 13. 872. DOI: 10.3390/min13070872
- Zhuravlev A. V., Vevel Y. A., Gruzdev D. A., Erofeevsky A. V. Late Mississippian (early Serpukhovian) carbon isotope record of northern Laurussia: A proposal for the Viséan/Serpukhovian boundary // Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. 2023. 40(1). P. 35–43. DOI: 10.22201/cgeo.20072902e.2023.1.1722.

Поступила в редакцию / Received 03.07.2025



Государственная регистрация результатов интеллектуальной деятельности в 2025 году

State registration of intellectual devilerables in 2025

The Museum Database encompasses the entire museum collection: the main fund, the working collections fund, the historical-archival fund, and the library fund. It implements a division into funds bearing the same name and collections consisting of museum items. The development is based on a relational data design approach, and PostgreSQL was chosen as the DBMS (Database Management System). A web interface based on Django technologies has been developed to implement the user interface and management functions. This development ensures the centralized storage of information about museum specimens from the funds of the A. A. Chernov Geological Museum and provides cross-platform access to the data via the museum website.

Several software products have been developed and patented at the Institute of Geology: an application for acquiring and processing AFM data, as well as a database for museum specimens.

The CrystalGrowthTool application is created to obtain kinetic data on crystal growth from solution using AFM images. It is developed in Python using the PyQt5 toolkit and is compatible with Windows XP (SP2) and later operating systems. The application facilitates and accelerates the routine process of obtaining coordinates for the edges of growing steps for subsequent analysis. CrystalGrowthTool minimizes the number of points required for the software description of a step and then tracks the movement of these steps. It can operate in various coordinate systems (spherical and elliptical), which is convenient for describing dislocation hillocks. The CrystalGrowthTool application can be used in various fields of knowledge to calculate the advancement velocity of objects.

База данных фондов Геологического музея им. А. А. Чернова

A. A. Chernov Geological Museum database

Современные музеи, особенно научно-исследовательские, сталкиваются с задачей эффективного управления растущими объемами информации о коллекциях. Фонды Геологического музея им. А. А. Чернова, включающие обширные коллекции каменного материала и уникальные историко-архивные фонды, отражающие деятельность Института геологии с начала XX века, требуют внедрения современных методов каталогизации и доступа к данным. Традиционные методы не позволяют осуществлять быстрый многофакторный поиск и оперативно обновлять информацию. Разработка комплексной базы данных является ключевым шагом в решении этих задач, обеспечивающим сохранность, доступность и научную ценность коллекций в цифровую эпоху.

На протяжении нескольких лет ведутся работы по созданию специализированной базы данных для систематизации и управления фондами Геологического музея им. А. А. Чернова. Целью работы является разработка информационной системы, обеспечивающей эффективное хранение, оперативный поиск, корректировку и анализ данных о музеиных предметах и архивных материалах. База данных полностью охватывает всю совокупность музей-



ного собрания, представленного основным фондом, состоящим из монографических и выставочных коллекций, фондом рабочих коллекций, историко-архивным и библиотечным фондами. В соответствии с наименованием и составом фондов в базе данных реализовано их разделение на одноименные (рис. 1).

Фонды состоят из коллекций, а коллекции — из музейных предметов. В основном фонде и фонде рабочих коллекций музейные предметы представлены преимущественно материальными носителями первичной геологической информации о недрах (образцами горных пород, минералов, керна, пластовых жидкостей, флюидов, газов и т. д.). В свою очередь, материальные носители первичной геологической информации о недрах, входящие в состав основного фонда, имеют как одинаковые, так и индивидуальные для каждого типа наборы атрибуции. В фонде рабочих коллекций материальные носители имеют однотипную атрибуцию. Аналогичным образом представлены музейные предметы историко-архивного и библиотечного фондов.

В основе разработки лежал реляционный подход к проектированию данных. В качестве системы управ-



База данных фондов Геологического музея им. А. А. Чернова

Геологический музей

основной фонд

Авторы	Добавить	Изменить
Выставочные образцы	Добавить	Изменить
Коллекции	Добавить	Изменить
Образцы ПИ	Добавить	Изменить
Образцы магматических пород	Добавить	Изменить
Образцы мемориальных коллекций	Добавить	Изменить
Образцы метаморфических пород	Добавить	Изменить
Образцы минералов	Добавить	Изменить
Образцы осадочных пород	Добавить	Изменить
Образцы фауны	Добавить	Изменить
Образцы флоры	Добавить	Изменить
Печатные работы	Добавить	Изменить
Типы коллекций	Добавить	Изменить

ФОНД РАБОЧИХ КОЛЛЕКЦИЙ

Авторы	Добавить	Изменить
Коллекции	Добавить	Изменить
Образцы	Добавить	Изменить

ИСТОРИКО-АРХИВНЫЙ ФОНД

Авторы	Добавить	Изменить
Коллекции	Добавить	Изменить
Предметы	Добавить	Изменить
Типы коллекций	Добавить	Изменить

Последние действия

Мои действия

- Песчаник Образец отложений породы
- кремень с пиритом Образец минерала
- известник пиритизированный Образец минерала
- флюорит в кальците Образец минерала
- известник флюоритизированный Образец минерала
- известник с флюоритом Образец минерала
- Известник перекристаллизованный с флюоритом Образец минерала
- флюорит с кальцитом Образец минерала
- мокховый агат включениями аметиста и гидроксидов железа и кварца Образец мемориальной коллекции
- агатовая жеода с кристаллами мориона Образец мемориальной коллекции

Рис. 1. Главная страница базы данных

Fig. 1. The main page of the database

ления базами данных (СУБД) была выбрана PostgreSQL как надежная и масштабируемая платформа. Проектирование схемы базы данных осуществлялось с учетом специфики фондов Геологического музея им. А. А. Чернова и включало создание взаимосвязанных таблиц, отражающих их структуру.

Для реализации пользовательского интерфейса и функций управления был разработан веб-интерфейс на основе технологий Django, что обеспечивает кросс-платформенный доступ.

В результате работы была создана база данных фондов Геологического музея им. А. А. Чернова Института геологии им. акад. Н. П. Юшкина, обеспечивающая централизованное хранение всей информации об имеющихся музейных предметах в фондах: минералах (рис. 2), горных породах, образцах полезных ископаемых, палеонтологических образцах, историко-архивных, библиотечных и медиаматериалах (фото- и видеоархивы).

Приложение доступно авторизованным пользователям по ссылке <https://museum.geo.komisc.ru>. Важным аспектом реализации является четкое разделение данных: база содержит исключительно научную и музейную информацию, персональные данные в нее не включены.

База данных реализует функции каталогизации, многоаспектного поиска (по названию, местонахождению, автору, году поступления и др.), ведения учётных записей и вывод результатов поиска, формирования новых экспозиций и выставок. Разработанная система ориентирована на использование специалистами-геологами и музейными работниками для научно-исследовательской и фондовой деятельности.

Внедрение базы данных для фондов Геологического музея им. А. А. Чернова значительно повышает эффективность научно-исследовательской работы и музейной деятельности. Она не только решает задачи оперативного учета и поиска, но и открывает новые возможности для анализа научных данных, ретроспективного изучения истории геологических исследований в регионе и интеграции в более крупные информационные ресурсы (национальные и международные геологические порталы).

мл. н. с. К. С. Попвасев
к. г.-м. н. И. С. Астахова

База данных фондов Геологического музея им. А. А. Чернова

Главная > Основной фонд > Образцы минералов

Начните печатать для фильтрации...

ОСНОВНОЙ ФОНД

Авторы	Добавить	Изменить
Выставочные образцы	Добавить	
Коллекции	Добавить	
Образцы ПИ	Добавить	
Образцы магматических пород	Добавить	
Образцы мемориальных коллекций	Добавить	
Образцы метаморфических пород	Добавить	
Образцы минералов	Добавить	
Образцы осадочных пород	Добавить	
Образцы фауны	Добавить	
Образцы флоры	Добавить	
Печатные работы	Добавить	
Типы коллекций	Добавить	

ФОНД РАБОЧИХ КОЛЛЕКЦИЙ

Авторы	Добавить	Изменить
Коллекции	Добавить	
Образцы	Добавить	

ИСТОРИКО-АРХИВНЫЙ ФОНД

Авторы	Добавить	Изменить
Коллекции	Добавить	

Выберите Образец минерала для изменения

Действие: Выполнить Выбрано 0 объектов из 100

КОЛЛЕКЦИЯ	НОМЕР МУЗЕЙНЫЙ	НАЗВАНИЕ ОБРАЗЦА	АВТОРЫ	КОЛ-ВО ЕДИНИЦ ХРАНЕНИЯ	РЕГИОН	ТЕКСТОВАЯ ПРИВЯЗКА	МЕСТО ХРАНЕНИЯ
634 - Сфалерит и сфалерит-галенитовые руды	109	Кристаллы кальцита	Макеев Александр Борисович	1	Пай-Хой	Пай-Хой, руч. флюоритовый	каб. 14 шкаф 34 витр. - лоток 12 полка -
634 - Сфалерит и сфалерит-галенитовые руды	108	Темносерый расслабленный известняк с флюоритовыми прожилками	Макеев Александр Борисович	1	Пай-Хой	Пай-Хой, руч. флюоритовый	каб. 14 шкаф 34 витр. - лоток 12 полка -
634 - Сфалерит и сфалерит-галенитовые руды	107	Кальцит-флюоритовая жила в сером известняке	Макеев Александр Борисович	1	Пай-Хой	Пай-Хой, руч. флюоритовый	каб. 14 шкаф 34 витр. - лоток 12 полка -
634 - Сфалерит и сфалерит-галенитовые руды	106	Флюоритовый прожилок в сером известняке	Макеев Александр Борисович	1	Пай-Хой	Пай-Хой, руч. флюоритовый	каб. 14 шкаф 34 витр. - лоток 12 полка -
634 - Сфалерит и сфалерит-галенитовые руды	10	Кальцитовая жила с флюоритом	Макеев Александр Борисович	1	Пай-Хой	Пай-Хой, руч. флюоритовый	каб. 14 шкаф 34 витр. - лоток 12 полка -
634 - Сфалерит и сфалерит-галенитовые руды	104	Кальцитовый прожилок с сульфитом	Макеев Александр Борисович	1	Пай-Хой	Пай-Хой, руч. флюоритовый	каб. 14 шкаф 34 витр. - лоток 12 полка -
634 - Сфалерит и сфалерит-галенитовые руды	103	Флюорит	Макеев Александр Борисович	1	Пай-Хой	Пай-Хой, руч. флюоритовый	каб. 14 шкаф 34 витр. - лоток 12 полка -
634 - Сфалерит и сфалерит-галенитовые руды	102	Флюоритизированный известняк с флюоритом	Макеев Александр Борисович	1	Пай-Хой	Пай-Хой, руч. флюоритовый	каб. 14 шкаф 34 витр. - лоток 12 полка -
634 - Сфалерит и сфалерит-галенитовые руды	101	Гематит в флюоритизированном известняковом доломите	Макеев Александр Борисович	1	Пай-Хой	Пай-Хой, руч. флюоритовый	каб. 14 шкаф 34 витр. - лоток 12 полка -
634 - Сфалерит и сфалерит-галенитовые руды	100	Кальцитовый прожилок с красн. сфалеритом в известняке	Макеев Александр Борисович	1	Пай-Хой	Пай-Хой, руч. флюоритовый	каб. 14 шкаф 34 витр. - лоток 12 полка -
634 - Сфалерит и сфалерит-галенитовые руды	99	Красный сфалерит в флюорит-кальцитовом прожилке	Макеев Александр Борисович	1	Пай-Хой	Пай-Хой, руч. флюоритовый	каб. 14 шкаф 34 витр. - лоток 12 полка -
634 - Сфалерит и сфалерит-галенитовые руды	98	Кадмивый сфалерит; флюорит; сульфит	Макеев Александр Борисович	1	Пай-Хой	Пай-Хой, руч. флюоритовый	каб. 14 шкаф 34 витр. - лоток 12 полка -
634 - Сфалерит и сфалерит-галенитовые руды	97	Кадмивый сфалерит лимонно-жел., сульфит в кальцитовом прожилке	Макеев Александр Борисович	1	Пай-Хой	Пай-Хой, руч. флюоритовый	каб. 14 шкаф 34 витр. - лоток 12 полка -
634 - Сфалерит и сфалерит-галенитовые руды	96	Вюрцит; красн. сфалерит; сульфит в кварц-кальцитовом прожилке известняка сланца	Макеев Александр Борисович	1	Пай-Хой	Пай-Хой, руч. флюоритовый	каб. 14 шкаф 34 витр. - лоток 12 полка -

Добавить образец минерала +

ДОБРО ПОЖАЛОВАТЬ, Константин. ОТКРЫТЬ САЙТ / ИЗМЕНИТЬ ПАРОЛЬ / ВЫЙТИ ☀

Рис. 2. Вид вкладки «Образцы минералов»

Fig. 2. View of the “Minerals Samples” tab



Приложение для получения кинетических данных по изображениям атомно-силовой микроскопии роста кристаллов в растворе

Application for kinetic data from atomic force microscopy images of crystal growth in solution

В 2025 году коллективом под руководством старшего научного сотрудника лаборатории экспериментальной минералогии Н. Н. Пискуновой, в состав которого вошли студенты и преподаватели Института точных наук и информационных технологий Сыктывкарского государственного университета им. Питирима Сорокина Д. И. Цветов, Н. Н. Бабикова и В. А. Устюгов, создано приложение для получения кинетических данных по изображениям *in-situ* атомно-силовой микроскопии (АСМ) роста кристаллов из раствора. Приложение *CrystalGrowthTool* создано на языке Python с помощью инструмента PyQt5, оно подходит для Windows XP с SP2 и более новых версий и занимает 544 391 Кб.

АСМ в настоящее время является единственным инструментом, позволяющим в молекулярном масштабе *in-situ* следить за эволюцией ступеней на кристаллической грани в растворе. Задача определения скорости тангенциального роста ступеней в АСМ является первостепенной после феноменологического описания наблюдаемых процессов. «Ручной» способ снятия данных с изображений АСМ хорошо зарекомендовал себя (см. список литературы), но при всех плюсах является крайне время- и энергозатратным, тормозя обработку готовых экспериментов на месяцы и годы. Поэтому коллективом разработан метод автоматизированного получения кинетических данных по последовательным изображениям атомно-силовой микроскопии роста и растворения кристаллов.

Создано компьютерное приложение для ПК *CrystalGrowthTool*, значительно облегчающее и ускоряющее рутинный процесс получения координат краев растущих ступеней в количестве, достаточном для статистического анализа. Запись координат тысяч точек на пересечении профиля ступени с линиями специальной сетки, расстояние между которыми составляет первые десятки нанометров, заменена в этом приложении на возможность гораздо меньшим количеством точек наметить профиль ступени (рис. 1, а). Если ступень почти прямая, то для создания контура в приложении можно обойтись четырьмя точками. Следующим шагом приложение само генерирует точки на всех пересечениях контура и сетки (рис. 1, б).

Машинным способом можно нарисовать очень плотную сетку, поэтому приложение позволяет получить множество координат за небольшое время. Приложение также наклоняет линии сетки под лю-



бым углом, в зависимости от того, как двигаются ступени. В нем есть возможность сгенерировать радиальную круговую или эллиптическую сетку, что подходит для дислокационных холмиков разной формы. Приложение также автоматически однообразно обрезает снимки, если это необходимо.

При загрузке каждого следующего снимка эксперимента на него автоматически переносятся старые профили ступеней. Эти профили пользователь должен передвинуть в их новые положения и снова сгенерировать по профилям множество точек. Далее необходимо нажать кнопку «Сохранить в Excel». Файл для сохранения в электронные таблицы выбирается в *Настройках*, и важно помнить, что при записи он должен быть закрыт. Запись

тысяч значений координат на листе *Excel* производится в соответствии с номерами ступени, снимка и линии сетки, создавая таким образом массив, размерность которого равна трем. Из-за однозначной адресации элемента в пределах массива исключаются случайные сдвиги строк, что полностью подготавливает данные для дальнейшей статистической обработки. При этом происходит перевод данных из значений в пикселях в микрометры или нанометры согласно масштабу снимка. Далее в таблицах можно строить распределения, рассчитывать среднюю тангенциальную скорость роста, среднюю ширину террас, скорость нормального прироста грани и их флуктуации по методике, которая подробно описана нами (Пискунова, 2022).

Работа приложения может быть сохранена как проект, когда тип сетки, уже выбранные профили ступеней и отмеченные точки объединяются в один архив со снимками для данного эксперимента и сохраняются в формате «имяфайла.crystal».

Так как при работе с приложением контуры ступени обозначаются при помощи компьютерной мыши, точность снятия данных в автоматизированном способе также зависит от сенсора мыши. Для монитора 1920 × 1080 минимальное расстояние, которое различит сенсор мыши с CPI (counts per inch), равным 400, составляет 0.0625 мм. Если изображение занимает на экране 20 см, то для реального ростового эксперимента с площадкой сканирования 15 × 15 мкм² точность снятия координат в горизонтальной плоскости будет 4.7 нм, а для эксперимента с площадкой 7 × 7 мкм²

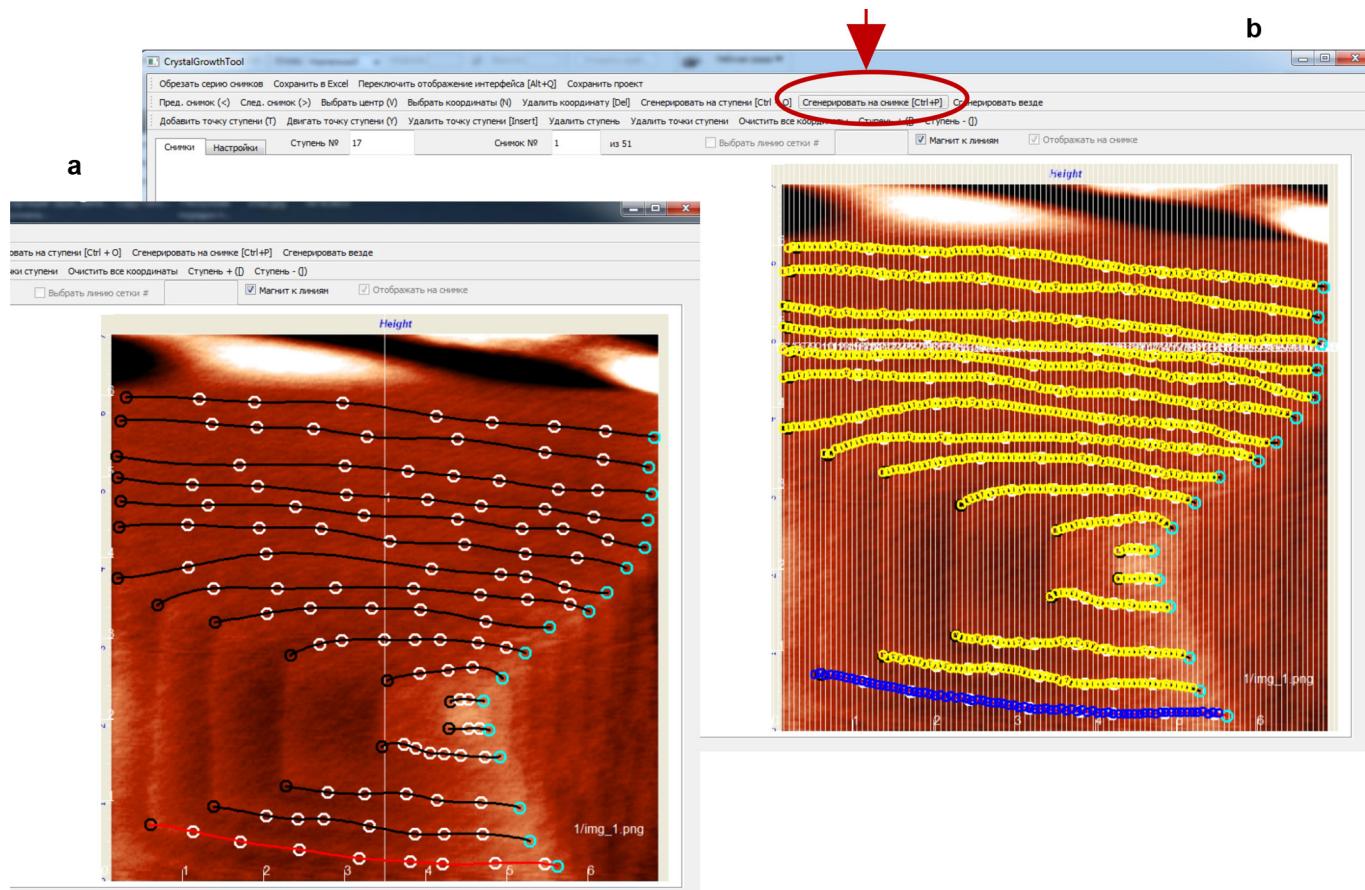


Рис. 1. Пример работы приложения *CrystalGrowthTool*, в котором намечаются контуры ступеней (а), затем включается сетка, нумерованные линии которой перпендикулярны фронту движения ступеней. На следующем этапе нажатием кнопки «Сгенерировать» (отмечена овалом) приложение автоматически добавляет точки в местах пересечения профиля ступеней и линий сетки (б)

Fig. 1. Example of the *CrystalGrowthTool* application in action, where the step contours are outlined (a), then a grid is enabled, with numbered lines perpendicular to the steps movement. In the next step, by clicking "Generate" button (marked with an oval), the application automatically adds points at the intersections of the step profile and the grid lines (b)

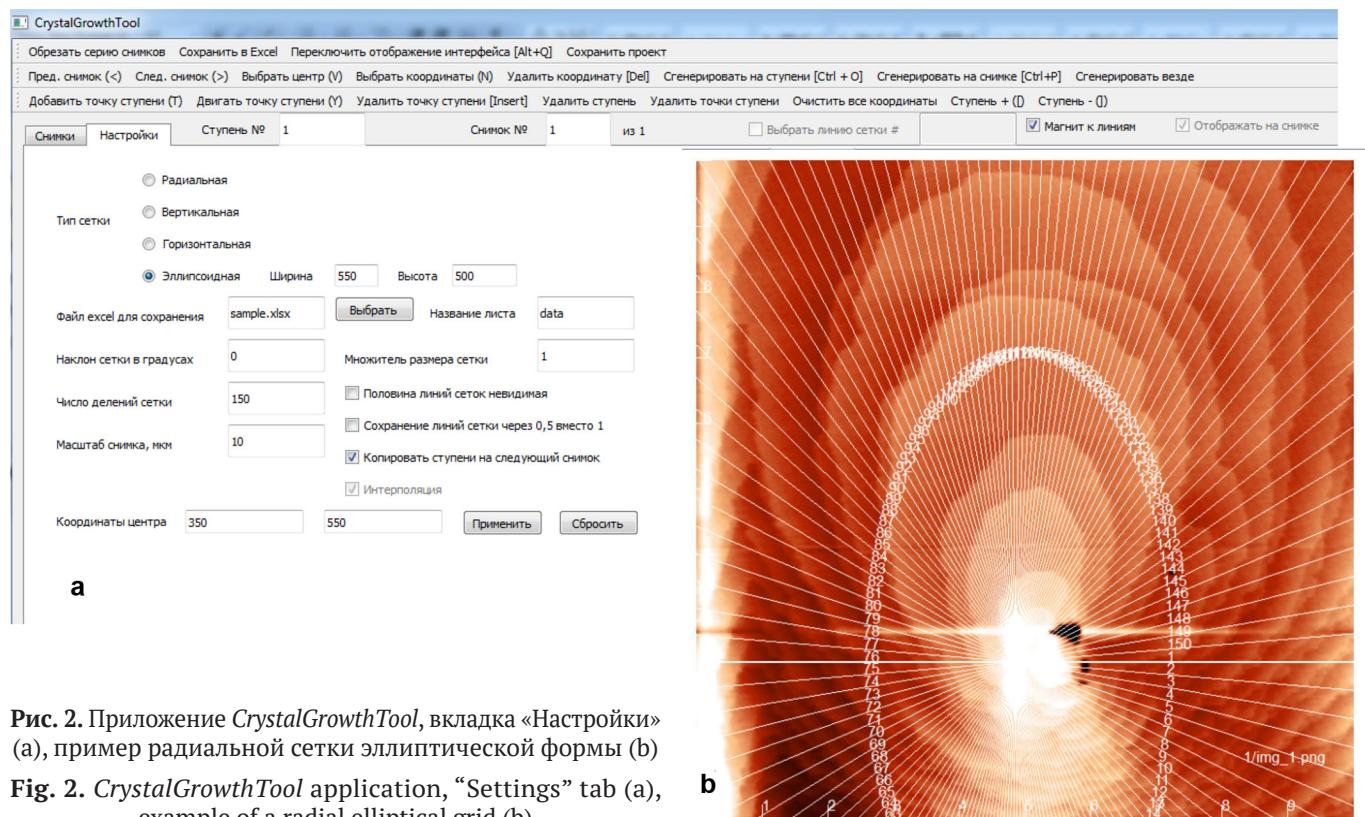


Рис. 2. Приложение *CrystalGrowthTool*, вкладка «Настройки» (а), пример радиальной сетки эллиптической формы (б)

Fig. 2. *CrystalGrowthTool* application, “Settings” tab (a), example of a radial elliptical grid (b)



точность составит 2.2 нм. Использование автоматизированного способа полностью избавляет от случайных ошибок, которые неизбежно допускает пользователь при «ручном» сборе данных. На этапе отладки приложения нами отмечалось выпадение некоторого количества данных при слаживании из-за небрежного обрисовывания профиля ступени, но для заинтересованного пользователя это легко исправимо.

В данный момент приложение используется в работе с новыми АСМ-экспериментами. Проведено сравнение полученных с его помощью результатов с данными обработки координат «ручным» способом для двух экспериментов из работ (Piskunova, 2021, 2024). Сравнивались средние расстояния, пройденные ступенями за 4.5 минуты для каждой пары снимков. Для эксперимента из работы (Piskunova, 2021) средние расстояния, полученные с помощью *CrystalGrowthTool*, в каждый момент времени были больше, чем полученные «ручным» методом, на величину от 5 до 5.7 нм. С учетом того, что точность в данном эксперименте составляла 4.7 нм, а автоматических данных было больше в среднем на 115 значений, результат сравнения можно считать приемлемым. Небольшое расхождение результатов не влияет на общий вывод работы (Piskunova, 2021).

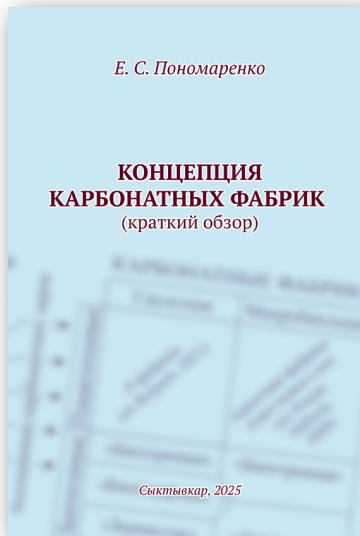
Сравнение расстояний, полученных с помощью *CrystalGrowthTool* для эксперимента (Piskunova, 2024), показало значения, большие для всех 38 пар снимков на величины от 0.5 до 1.1 нм, не превышающие точность (2.7 нм) и также не меняющие выводы работы. Все это позволяет сделать выбор в пользу компьютерного приложения. Приложение *CrystalGrowthTool* может быть использовано в различных областях знания при работе с любыми последовательными изображениями, для которых стоит задача вычисления скорости продвижения объектов.

* * *

- Пискунова Н. Н. // Записки Российской минералогического общества. 2022. Ч. CLI. № 5. С. 112. <https://doi.org/10.31857/S0869605522050069>
- Piskunova N. N. // Journal of Crystal Growth. 2021. V. 575. 126359. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2021.126359>
- Piskunova N. N. // Journal of Crystal Growth. 2023. V. 603. 127013. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2022.127013>
- Piskunova N. N. // Journal of Crystal Growth. 2024. V. 631. 127614. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2024.127614>

д. г.-м. н. Н. Н. Пискунова

Новые издания / New publications



УДК 551.73:552.54 (470.1)

Пономаренко Е. С. Концепция карбонатных фабрик (краткий обзор) / Ответственный редактор: д. г.-м. н. А. И. Антошкина. Рецензенты: д. г.-м. н. В. А. Жемчугова, к. г.-м. н. А. Н. Сандула. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2025. 120 с.

23 рис., 1 табл., список литературы – 276 наименований.
ISBN 978-5-98491-106-1

Концепция карбонатных фабрик – это новое перспективное направление в карбонатной седиментологии, появившееся более 20 лет назад, но активно развивающееся в последние годы. Представленная концепция, по сути, является классификационной схемой, основанной на генетических и (палео-) экологических характеристиках. Данная работа представляет не только краткий обзор основных положений этой концепции, но и результаты их практического применения на примере палеозойских отложений Северного Урала и Южного Тимана. Кроме того, рассматривается связь концепции карбонатных фабрик с другими литологическими направлениями и высказывается субъективное мнение автора на некоторые вопросы относительно типов литогенеза и классификации карбонатных пород.

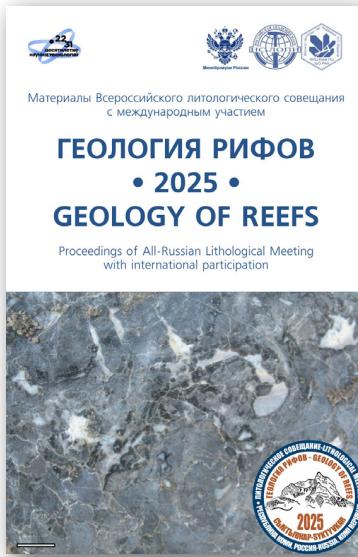
Книга может быть полезна как студентам, аспирантам и молодым ученым, увлеченным карбонатными отложениями, так и исследователям с уже устоявшимися взглядами на природу вещей.

Ponomarenko E. S. The concept of carbonate mills (brief review). Syktyvkar: IG Komi SC UB RAS, 2025. 120 p.

23 figures, 1 table, 276 references.

The carbonate factory principle is a promising new direction in carbonate sedimentology that emerged more than 20 years ago but has been actively developed in recent years. The concept is a classification scheme based on genetic and (palaeo-)ecological traits. This paper presents not only a brief overview of the main provisions of this concept but also results of its practical application using the example of Palaeozoic deposits of the Northern Urals and Southern Timan. In addition, the relation of the carbonate factory principle to other lithological scientific fields is considered, and the author's subjective opinion on some questions concerning the types of lithogenesis and classification of carbonate rocks is expressed.

The book can be useful for students, postgraduates and young scientists interested in carbonate deposits, as well as for researchers with established views on the nature of things.



УДК 55 (063)

ГЕОЛОГИЯ РИФОВ – 2025: Материалы Всероссийского литологического совещания с международным участием / Отв. редактор А. И. Антошкина, ред. А. Н. Сандула, В. А. Салдин, Г. Н. Каблис, О. В. Габова, К. В. Ордин. Сыктывкар: ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, 2025. 134 с.

Представлены материалы докладов Всероссийского литологического совещания с международным участием «Геология рифов – 2025». Рассмотрены разные аспекты всестороннего изучения рифов: общие проблемы рифообразования, литолого-фациальная и палеонтологическая характеристики. Обсуждаются проблемы комплексной интерпретации рифов по сейсмическим и скважинным данным, а также их связь с полезными ископаемыми. Приведены результаты геохимических исследований рифогенных формаций. Поднимаются ряд вопросов литологического изучения и генетической интерпретации микробиолитов и процессов бактериального литогенеза.

Сборник представляет интерес для широкого круга специалистов, занимающихся исследованием рифогенных и специфических карбонатных образований.

UDK 55(063)

Geology of Reefs – 2025: Proceedings of All-Russian Lithological Meeting with International Participation / A. I. Antoshkina (responsible editor), A. N. Sandula, V. A. Saldin, O. V. Gabova, G. N. Kablis, K. V. Ordin. Syktyvkar: IG FRC Komi SC UB RAS, 2025. 134 p.

The proceedings of the All-Russian Lithological Meeting with international participation «Geology of Reefs - 2025» are presented. The most important aspects of the multidisciplinary study of reefs, general problems of reef-building, facies features of various types of organic buildups, problems of seismic stratigraphy of reef-containing formations, and mineral resources of reef units are discussed. The results of geochemical studies of reef complexes are published. A number of issues concerning lithological study and genetic interpretation of microbialites are considered.

The collection is of interest to a large number of specialists working on reefs.



Пономаренко Е. С. Палеозойские органогенные постройки бассейна
р. Ильч, Северный Урал. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2025. 100 с.

78 рис., список литературы – 164 наименования.

Данная работа подготовлена к полевому геологическому практикуму, приуроченному ко Всероссийскому литологическому совещанию «Геология рифов – 2025», запланированному к проведению в г. Сыктывкаре 23–25 июня 2025 г. Представлено краткое описание основных установленных в бассейне р. Ильч органогенных построек (западный склон Северного Урала), охватывающих возрастной диапазон от позднего ордовика до ранней перми. Кроме того, затронуты вопросы литологии окружающих пород нерифового генезиса. Книга будет интересна широкому кругу специалистов в области литологии и может быть использована в качестве путеводителя.

Ponomarenko E. S. Paleozoic organic buildups from the Ilych River basin, Northern Urals. Syktyvkar: IG Komi SC UB RAS, 2025, 100 p.

78 figs., 164 references.

The publication has been prepared for a field geological workshop timed to coincide with the All-Russian Lithological Conference «Reef Geology 2025», scheduled in Syktyvkar on June 23–25, 2025. A brief description of the main organic buildups identified in the Ilych River basin (western slope of the Northern Urals), covering the age range from the Late Ordovician to the Early Permian, is presented. The lithology of the enclosing non-reef rocks is also discussed. The book may be of interest to a wide range of specialists in the field of lithology and can be used as a guide.

Редакторы издательства:

О. В. Габова, К. В. Ордин (английский)

Компьютерная верстка

А. Ю. Перетягина

Выписка из реестра средств массовой информации ПИ № ФС77-75455 от 19.04.2019, выданное Роскомнадзором. Отпечатано: 30.09.2025. Формат бумаги 60 × 84 1/8. Печать RISO. Усл. п. л. 4.0. Тираж 140. Заказ 1253. Учредитель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук» (ФИЦ Коми НЦ УрО РАН). Редакция, издательство, типография: издательско-информационный отдел Института геологии имени академика Н. П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук» (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН).

Адрес редакции: 167982, Республика Коми, Сыктывкар, Первомайская, 54. Тел.: (8212) 24-51-60. Эл. почта: vestnik@geo.komisc.ru

На обложке использованы фото П. Безносова, А. Перетягина, Н. Уляшевой, А. Иевлевой, Н. Сокериной