



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

Сентябрь  
September  
2021,  
№ 9 (321)

## Главный редактор

А. М. Асхабов

## Chief Editor

A. M. Askhabov

## Редакционный совет

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

## Editorial Board

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

## Редакционная коллегия

А. И. Антошкина, Т. М. Безносова (ответственный секретарь), И. Н. Бурцев, Д. А. Бушнев, И. В. Козырева, О. Б. Котова (заместитель главного редактора), С. К. Кузнецов, Т. П. Майорова, А. М. Пыстин, О. В. Удоратина

## Editorial team

A. I. Antoshkina, T. M. Beznosova (Executive Secretary), I. N. Burtsev, D. A. Bushnev, I. V. Kozyreva, O. B. Kotova (Deputy Chief Editor), S. K. Kuznetsov, T. P. Mayorova, A. M. Pystin, O. V. Udoratina

## Технический редактор

Г. Н. Каблис

## Technical Editor

G. N. Kablis

## Заведующий редакцией

Т. А. Некучаева

## Managing Editor

T. A. Nekuchaeva

## НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

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

### Предыдущее название:

Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН

Пятилетний импакт-фактор  
РИНЦ журнала (2020) – 0,532



## SCIENTIFIC JOURNAL

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

### Former title:

Vestnik of Institute of Geology of Komi SC UB RAS

Five-year RSCI  
impact factor (2020) – 0.532

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

**Содержание****Content**

| <b>Обзорная статья</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | <b>Review article</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Первые результаты комплексных исследований современных микроорганизмов физико-химическими и минералого-геохимическими методами<br><i>В. И. Силаев, А. В. Кокин, Н. В. Павлович, С. Н. Шанина, Д. В. Киселева, Е. А. Васильев, О. В. Мартиросян, И. В. Смолева, В. Н. Филиппов, А. Ф. Хазов, А. С. Шуйский, Т. Н. Щемелинина, Г. В. Игнатьев, А. В. Слюсарь</i> .....3 | First results of complex studies of modern microorganisms by physico-chemical and mineral-geochemical methods<br><i>V. I. Silaev, A. V. Kokin, N. V. Pavlovich, S. N. Shanina, D. V. Kiseleva, E. A. Vasiliev, O. V. Martirosyan, I. V. Smoleva, V. N. Philippov, A. F. Khazov, A. S. Shuisky, T. N. Schemelinina, G. V. Ignatiev, A. V. Slyusar</i> .....3 |
| <b>Научные статьи</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | <b>Scientific articles</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| От минералов к новым материалам.<br>Приоритеты в производстве материалов в XXI веке<br><i>А. М. Асхабов</i> .....34                                                                                                                                                                                                                                                   | From minerals to new materials.<br>Priorities in the production of materials in the 21 <sup>st</sup> century<br><i>A. M. Askhabov</i> .....34                                                                                                                                                                                                               |
| Результаты работы Архангельской сейсмической сети за 2016—2020 гг. и ее вклад в сейсмический мониторинг Арктики<br><i>А. П. Турова, Е. Р. Морозова</i> .....39                                                                                                                                                                                                        | Operating results of the Arkhangelsk seismic network over the past five years and its contribution to the Arctic seismic monitoring<br><i>A. P. Turova, E. R. Morozova</i> .....39                                                                                                                                                                          |
| Неизвестное письмо Л. А. Попугаевой из архива профессора Д. П. Григорьева<br><i>Ю. Л. Войтеховский</i> .....45                                                                                                                                                                                                                                                        | Unknown letter of L. A. Popugaeva from the archive of Professor D. P. Grigoriev<br><i>Yu. L. Voytekhevsky</i> .....45                                                                                                                                                                                                                                       |
| <b>Хроника, события, факты. История науки</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | <b>Chronicle, events, facts. History of Science</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 30-я Всероссийская научная конференция «Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского сегмента» .....52                                                                                                                                                                                                                                              | 30 <sup>th</sup> All-Russian scientific conference «Structure, substance, history of the lithosphere of the Timan-North Ural segment» .....52                                                                                                                                                                                                               |

Правила  
оформления  
статей



Vestnik  
article  
Formatting





## Первые результаты комплексных исследований современных микроорганизмов физико-химическими и минералого-геохимическими методами

В. И. Силаев<sup>1</sup>, А. В. Кокин<sup>2</sup>, Н. В. Павлович<sup>3</sup>, С. Н. Шанина<sup>1</sup>, Д. В. Киселева<sup>4</sup>,  
Е. А. Васильев<sup>5</sup>, О. В. Мартиросян<sup>6</sup>, И. В. Смолева<sup>1</sup>, В. Н. Филиппов<sup>1</sup>, А. Ф. Хазов<sup>1</sup>,  
А. С. Шуйский<sup>1</sup>, Т. Н. Щемелинина<sup>7</sup>, Г. В. Игнатьев<sup>1</sup>, А. В. Слюсарь<sup>8</sup>

<sup>1</sup>Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, [silaev@geo.komisc.ru](mailto:silaev@geo.komisc.ru)

<sup>2</sup>Южно-Российский институт управления — филиал Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ, Ростов-на-Дону, [alex@av.kokin.ru](mailto:alex@av.kokin.ru)

<sup>3</sup>Ростовский-на-Дону противочумный институт Роспотребсоюза, Ростов-на-Дону, [info@tularemia.ru](mailto:info@tularemia.ru)

<sup>4</sup>Институт геологии и геохимии УрО РАН, Екатеринбург

<sup>5</sup>Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург

<sup>6</sup>Геологический институт РАН, Москва

<sup>7</sup>Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар

<sup>8</sup>Ростовская-на-Дону клиническая больница ЮОМЦ России, Ростов-на-Дону

Исследованы 14 образцов грамотрицательных и грамположительных бактерий, одноклеточных дрожжей и зеленых водорослей с использованием оптической, атомно-силовой и аналитической сканирующей электронной микроскопии, термического анализа, газовой хроматографии, инфракрасной спектроскопии, масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой и изотопной масс-спектрометрии. По форме клетки микроорганизмы варьируются от палочковидных до чечевицепоподобных и глобуло-коккообразных, по размеру — от мезонанометровых до микрометровых. Между крайними размерами клеток установлена сильная положительная корреляция. В химическом составе исследованных микроорганизмов обнаружена примесь неорганических химических элементов — Mg, Ca, Ba, Sr, Si, Na, K, Cu, Zn, P, S, Cl — и субмикронные по размеру выделения минеральных фаз — карбонатов, фосфатсульфатов, гидрогенсульфатфосфатов, гидрогенфосфатов, галита, каолинита, металлических сплавов латунного состава, бадделеита. В число 45 микроэлементов, выявленных в микроорганизмах, входят 7 элементов-эссенциалов (Э), 17 физиогенно-активных (ФА) и 19 абиотических (АБ). Суммарная концентрация микроэлементов колеблется в диапазоне 0.003–0.26 мас. %. Значение эссенциального коэффициента — Э/АБ — составляет в среднем  $196 \pm 153$ . Микроорганизмы характеризуются смешанным жиробелковым элементным составом. В них выявлены 14 аминокислот, относящихся к алифатической, ароматической, основной, кислой, гидроксильной, имино и серусодержащей группам. Суммарное содержание аминокислот колеблется от 409 до 942 ( $682 \pm 221$ ) мг/г. До половины аминокислот представлены левым (L) и правым (D) энантиомерами. Степень рацемизации (D/L) колеблется в пределах 0.01–0.37. Наиболее изотопно-тяжелым составом углерода в сочетании с относительно изотопно-лёгким азотом характеризуются дрожжи *Rhodotorula glutinis* и микроводоросли *Chlorella vulgaris*. В бактериях установлен статистически более лёгкий углерод в сочетании со значительно более тяжелым азотом. По ряду свойств — химическому составу органического вещества, микроэлементам, степени обогащения элементами-антибионтами, содержанию аминокислот и степени их рацемизации — грамотрицательные и грамположительные бактерии различаются. В целом же исследованные биологические микроорганизмы по элементному и аминокислотному составу, изотопии углерода и азота принципиально отличаются от абиогенных органических веществ, выявленных в метеоритах и продуктах современного вулканизма.

**Ключевые слова:** мультидисциплинарные научные исследования, бактерии, одноклеточные дрожжи, хлорелла, микростроение, химический и аминокислотный состав, микроэлементы, изотопный состав углерода и кислорода, абиогенное органическое вещество в метеоритах и продуктах современного вулканизма.

**Для цитирования:** Силаев В. И., Кокин А. В., Павлович Н. В., Шанина С. Н., Киселева Д. В., Васильев Е. А., Мартиросян О. В., Смолева И. В., Филиппов В. Н., Хазов А. Ф., Шуйский А. С., Щемелинина Т. Н., Игнатьев Г. В., Слюсарь А. В. Первые результаты комплексных исследований современных микроорганизмов физико-химическими и минералого-геохимическими методами // Вестник геонаук. 2021. 9(321). С. 3–33. DOI: 10.19110/geov.2021.9.1.

**For citation:** Silaev V. I., Kokin A. V., Pavlovich N. V., Shanina S. N., Kiseleva D. V., Vasiliev E. A., Martirosyan O. V., Smoleva I. V., Philippov V. N., Khazov A. F., Shuisky A. S., Schemelinina T. N., Ignatiev G. V., Slyusar A. V. First results of complex studies of modern microorganisms by physico-chemical and mineral-geochemical methods. Vestnik of Geosciences, 2021, 9(321), pp. 3–33, doi: 10.19110/geov.2021.9.1.

# First results of complex studies of modern microorganisms by physico-chemical and mineral-geochemical methods

V. I. Silaev, A. V. Kokin, N. V. Pavlovich, S. N. Shanina, D. V. Kiseleva,  
E. A. Vasiliev, O. V. Martirosyan, I. V. Smoleva, V. N. Philippov, A. F. Khazov,  
A. S. Shuisky, T. N. Schemelinina, G. V. Ignatiev, A. V. Slyusar

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

<sup>2</sup>South-Russian Institute of Management of Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Rostov-on-Don

<sup>3</sup>Rostov-on-Don Plague Control Research Institute of the Federal Service for Surveillance in the Sphere of Consumers Rights Protection and Human Welfare, Rostov-on-Don

<sup>4</sup>Institute of Geology and Geochemistry UB RAS, Yekaterinburg

<sup>5</sup>Saint Petersburg Mining University

<sup>6</sup>Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow

<sup>7</sup>Institute of Biology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar

<sup>8</sup>Rostov-on-Don Clinical Hospital of the Southern District Medical Center

We studied 14 samples of gram-negative and gram-positive bacteria, unicellular yeasts and green algae using optical, atomic force and analytical scanning electron microscopy, thermal analysis, gas chromatography, infrared spectroscopy, inductively coupled plasma mass spectrometry and isotope mass spectrometry. In shape, the cells of microorganisms vary from rod-shaped to lenticular and coccoid, in size they range from mesonanometer to micrometer. A strong positive correlation was found between the extreme cell sizes. An admixture of inorganic chemical elements — Mg, Ca, Ba, Na, K, Cu, Zn, P, S, Cl and submicron-sized precipitates of mineral phases — carbonates, phosphate sulfates, hydrogen sulfate phosphates, hydrogen phosphates, halite, kaolinite, was found in the chemical composition of the studied microorganisms, metal alloys of brass composition, baddeleyite. Among the 45 microelements identified in microorganisms, there were 7 essential elements (E), 17 physiogenically active (FA) and 19 abiotic (AB). The total concentration of trace elements ranged from 0.003–0.26 wt. %. The value of the essential coefficient —  $E / AB$  — averaged  $196 \pm 153$ . Microorganisms were characterized by a mixed fat-protein elemental composition, they contained 14 amino acids belonging to the aliphatic, aromatic, basic, acidic, hydroxyl, imino and sulfur-containing groups. The total amino acid content ranged from 409 to 942 ( $682 \pm 221$ ) mg/g. Up to half of the amino acids were represented by the left (L) and right (D) enantiomers. The degree of racemization ( $D / L$ ) ranged from 0.01 to 0.37. Yeast and chlorella were characterized by the most isotopically heavy composition of carbon in combination with relatively isotopically light nitrogen. In bacteria, a statistically lighter carbon was found in combination with a much heavier nitrogen. According to a number of properties — the chemical composition of organic matter, microelements, the degree of enrichment with antibiotic elements, the content of amino acids and the degree of their racemization — gram-negative and gram-positive bacteria differed. In general, the studied biological microorganisms were fundamentally different from the abiogenic organic substances found in meteorites and products of modern volcanism regarding their elemental and amino acid composition, carbon and nitrogen isotopes.

**Keywords:** multidisciplinary research, bacteria, unicellular yeast, chlorella, microstructure, chemical and amino acid composition, trace elements, isotopic composition of carbon and oxygen, abiogenic organic matter in meteorites and products of modern volcanism.

*Светлой памяти академика Николая Павловича Юшкина — основоположника мультидисциплинарного научного направления ВИТАМИНЕРАЛОГИЯ посвящается.*

## Введение

Одноклеточные микроорганизмы — уникальные биологические образования, появившиеся на Земле раньше эукариотов (ядерные живые организмы) и с тех пор весьма активно участвующие в разнообразных геологических процессах породо- и минералообразования [2, 8, 12, 13, 15, 22, 27, 28, 29, 52]. С более общих научных позиций, согласно парадигме академика Н. П. Юшкина о биоминеральных взаимодействиях [38, 39], микробиальный мир является непосредственным продуктом биоминеральных взаимодействий, начавшихся еще в космическом пространстве, и имеет с минеральным миром общий источник происхождения — неконденсированные ионно-молекулярные структуры. Эта парадигма в настоящее время подтверждается не только многочисленными находками неземных микроорганизмов в метеоритах (Оргей, Алаис, Альенде, Ефремовка, Муррей, Мурчисон, Нагойя), но и некоторыми экспериментальными данными. К последним,

например, относятся результаты опытов по фиксации углерода на каталитических осадках переходных металлов при температуре 80–120 °C с образованием упорядоченного ряда химических соединений от гидроксидов до аминокислот с общей формулой последних —  $R-CH_2-CH_2-COOH$ , где  $R = H, CH_3, C_2H_5, HOCH_2$ , а  $A = OH$  или  $NH_2$  [46]. Кроме того, недавно был установлен факт соответствия распределения микроэлементов в современных земных бактериях закону периодичности первичной распространенности химических элементов в Солнечной системе [17]. Таким образом, широко известный феномен биостимулированного породо- и минералообразования на Земле [5–7, 23] можно рассматривать как вполне естественное продолжение коэволюции минеральной и живой материй, начавшейся еще в космосе.

К сожалению, следует констатировать, что до настоящего времени уровень изучения микроорганизмов современными методами экспериментального



естествознания остается, за редким исключением, крайне низким [8, 14, 21, 24, 25]. Поэтому предпринятое нами исследование современных микроорганизмов с использованием хорошо зарекомендовавшего себя комплекса физико-химических и минералогеохимических методов можно признать весьма актуальным. Особое значение такого рода исследования приобрели в настоящее время в связи с открытием ор-

ганоидов абиогенного происхождения в продуктах современного континентального и океанического вулканизма [31–33].

### Объекты и методы исследований

В качестве объектов исследований выступили две группы штаммов микроорганизмов (табл. 1). В пер-

Таблица 1. Объекты исследований / Table 1. Objects of research

| № п/п | № обр.<br>Sample No. | Вид<br>Species                                                                                            | Характеристика<br>Characteristics                                                                               | Вес, мг<br>Weight, mg | Происхождение<br>образца<br>Origin of sample                                                   | Источник<br>Source                                                                |
|-------|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| 1     | БАК-1                | <i>Pseudomonas yamanorum</i> sp. VKM B-3033D                                                              | псевдомонадовые грамотрицательные аэробные бактерии<br>pseudomonad gram-negative aerobic bacteria               | 40                    | выделены из грунта железнодорожного полотна<br>isolated from the soil of a railway track       | Институт биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН<br>Institute of Biology, FRC Komi SC UB RAS |
| 2     | БАК-2                | «                                                                                                         | «                                                                                                               | «                     | «                                                                                              | «                                                                                 |
| 3     | ДРЖ-1                | <i>Rhodotorula glutinis</i> VKM Y-2998D                                                                   | аэробные розовые дрожжи<br>aerobic rose yeast                                                                   | «                     | выделены из нефтяного шламонакопителя<br>isolated from an oil sludge pond                      | «                                                                                 |
| 4     | ДРЖ-2                | «                                                                                                         | «                                                                                                               | 40                    | «                                                                                              | «                                                                                 |
| 5     | МВД-1                | <i>Chlorella vulgaris</i> Beijer. f. <i>Globosa</i> V. Andr IPPAS C-2024                                  | хлорелла — одноклеточная микроводоросль<br>chlorella — a single-celled microalga                                | 50                    | выделена из почвы на стоянке оленеводов<br>isolated from the soil at a reindeer breeders' camp | «                                                                                 |
| 6     | МВД-2                | «                                                                                                         | «                                                                                                               | 50                    | «                                                                                              | «                                                                                 |
| 7     | ПЧИ-1                | <i>Escherichia coli</i> 1015 энтеропатогенная (клинический изолят)<br>Enteropathogenic (clinical isolate) | кишечная палочка — грамотрицательная бактерия<br>escherichia coli is a gram-negative bacterium                  | 50                    | выделена из человека<br>isolated from a human                                                  | Ростовский-на-Дону противочумный институт<br>Rostov-on-Don Anti-Plague Institute  |
| 8     | ПЧИ-2                | <i>Vibrio cholerae</i> O139 16077 (токсигенный штамм)<br>(toxigenic strain)                               | холерный вибрион — грамотрицательная анаэробная бактерия<br>vibrio cholerae — gram-negative anaerobic bacterium | 34                    | «                                                                                              | «                                                                                 |
| 9     | ПЧИ-3                | <i>Vibrio cholerae</i> O139 17918 (атоксигенный штамм)<br>(atoxigenic strain)                             | «                                                                                                               | 25                    | выделена из воды<br>isolated from water                                                        | «                                                                                 |
| 10    | ПЧИ-4                | <i>Vibrio cholerae</i> Eltor 19667 (токсигенный)<br>(toxigenic)                                           | «                                                                                                               | 36                    | выделена из человека<br>isolated from a human                                                  | «                                                                                 |
| 11    | ПЧИ-5                | <i>Vibrio cholerae</i> Eltor 19430 (атоксигенный)<br>(atoxigenic)                                         | «                                                                                                               | 45                    | выделена из воды<br>isolated from water                                                        | «                                                                                 |
| 12    | ПЧИ-6                | <i>Francisella tularensis</i> subsp. <i>holartica</i> 15 НИИЭГ (вакцинный)                                | туляремийный грамотрицательный микроб<br>tularemia gram-negative microbe                                        | 100                   | выделена из человека<br>isolated from a human                                                  | «                                                                                 |



| № п/п | № обр.<br>Sample<br>No. | Вид<br>Species                                                                                                       | Характеристика<br>Characteristics                                                                                                                   | Вес, мг<br>Weight,<br>mg | Происхождение<br>образца<br>Origin of sample | Источник<br>Source |
|-------|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|----------------------------------------------|--------------------|
| 13    | ПЧИ-7                   | <i>Francisella tula-<br/>rensis subsp.<br/>hol-arctica</i> 503<br>(природный,<br>вирулентный)<br>(natural, virulent) | «                                                                                                                                                   | 82                       | «                                            | «                  |
| 14    | ПЧИ-8                   | <i>Staphylococcus<br/>aureus</i> 12617                                                                               | золотистый стафи-<br>лококк — грамполо-<br>жительная шаро-<br>видная бактерия<br>staphylococcus<br>aureus — gram-<br>positive globular<br>bacterium | 54                       | «                                            | «                  |

вую группу вошли шесть образцов бактерий рода *Pseudomonas*, розовых одноклеточных дрожжей *Rhodotorula glutinis* и одноклеточных зеленых водорослей *Chlorella vulgaris*, полученных в Институте биологии Коми НЦ УрО РАН в ходе разработки методов биочистки природных почв от нефтезагрязнений. Вторую группу составили восемь образцов обеззараженной массы штаммов болезнетворных бактерий, переданных нам на исследования из Ростовского-на-Дону противочумного института Роспотребнадзора [26]. В ча-

сти исследований второй группы образцов между Противочумным институтом и Институтом геологии Коми НЦ УрО РАН был заключен договор о научном сотрудничестве, отчетом по которому и является настоящая статья.

Бактерии рода *Pseudomonas* и розовые дрожжи представлены афанитовой массой, варьирующей по окраске от светло-оранжевой до оранжевой (рис. 1). Хлорелла образует агрегаты хлопьевидных частиц насыщенно-зеленого цвета размером 100—300 мк (рис. 2).

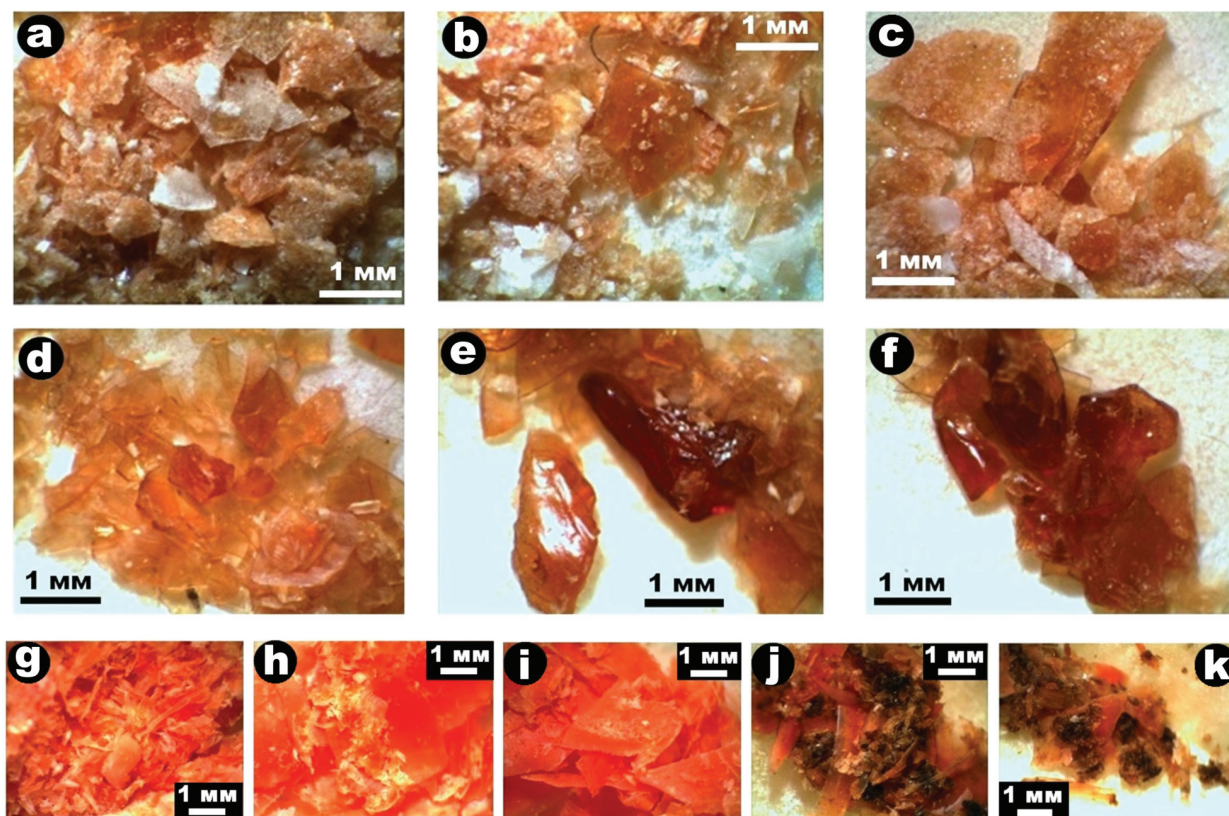


Рис. 1. Внешний вид колоний псевдомонад (а–f) и дрожжей — до (g–i) и после (j, k) опыта по биологической очистке почв от нефтезагрязнений

Fig. 1. Appearance of colonies of pseudomonads (a–f) and yeast — before (g–i) and after (j, k) experiment on the biological cleaning of soils from oil pollution



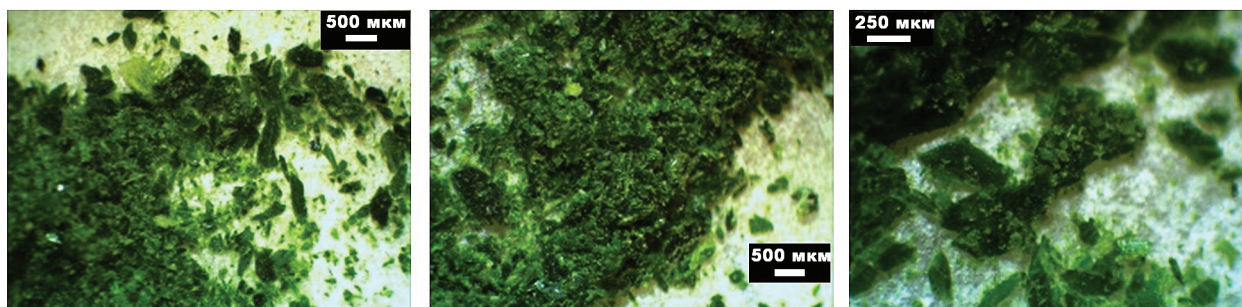


Рис. 2. Внешний вид образца хлореллы / Fig. 2. *Chlorella vulgaris* sample appearance

Для колоний кишечной палочки характерен довольно чистый желтый цвет, а скопления холерного вибриона отличаются светло-бурой окраской (рис. 3). Массы туляремиального микроба резко выделяются темно-бурым цветом, а золотистому стафилококку свойственна ярко-оранжевая окраска (рис. 4).

В ходе исследований применялся широкий комплекс современных аналитических методов, хорошо

зарекомендовавший себя в приложении ко многим палеонтологическим, минералогическим и археологическим объектам. В упомянутый комплекс вошли: оптическая (OLYMPUS BX51) и аналитическая сканирующая электронная микроскопия (JSM-6400 Jeol; Tescan Vega 3); атомно-силовая микроскопия («Интегра Прима» фирмы NT-MDT, В. А. Радаев); термический анализ (DTG-60A/60 АН, Shimadzu, Е. М. Тропников); газовая

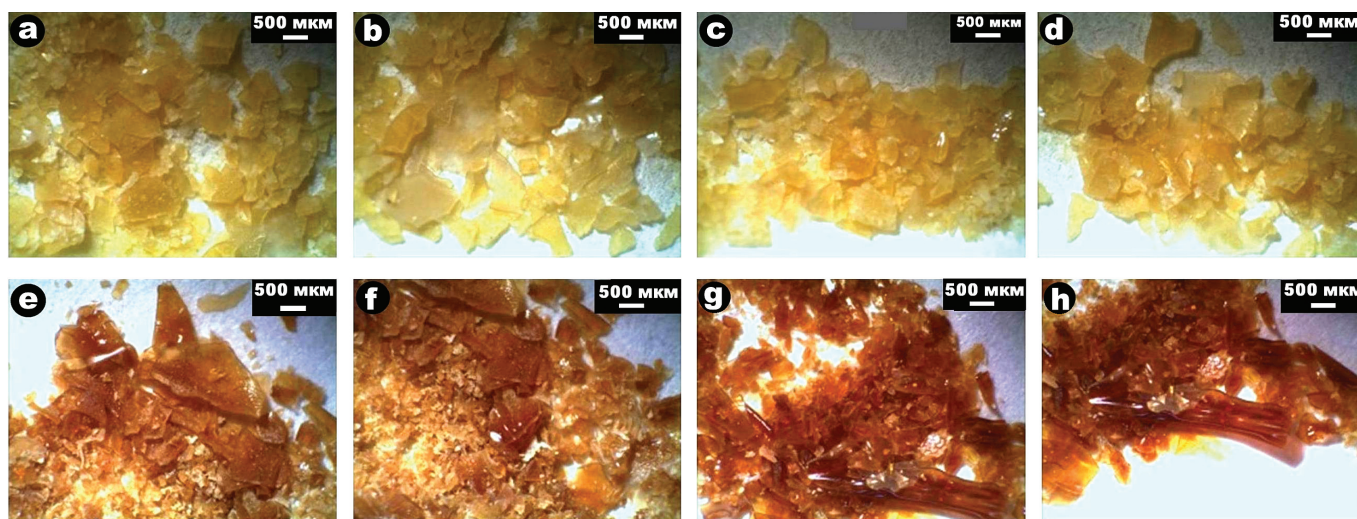


Рис. 3. Внешний вид колоний кишечной палочки (a—d) и холерного вибриона (e—h)

Fig. 3. The appearance of colonies of *Escherichia coli* (a—d) and *Vibrio cholerae* (e—h)

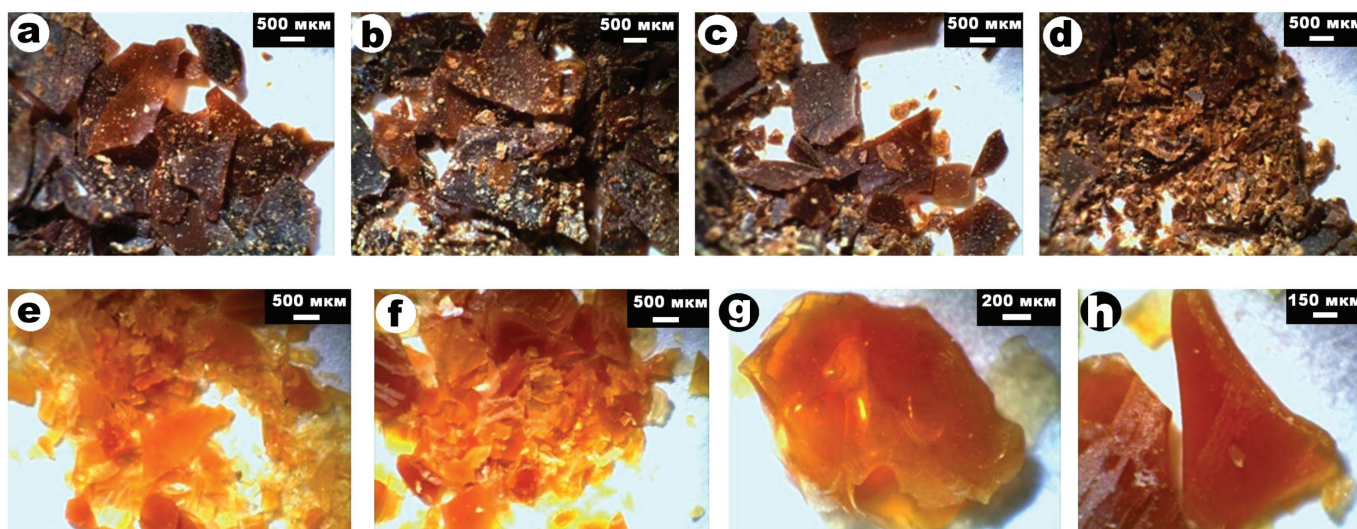


Рис. 4. Внешний вид масс туляремиального микроба (a—d) и золотистого стафилококка (e—h)

Fig. 4. Appearance of masses of tularemia microbe (a—d) and *Staphylococcus aureus* (e—h)



хроматография (GC-17A Shimadzu с пламенно-ионизационным детектором); масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (NexION 300S Perkin Elmer, Н. В. Чередниченко); инфракрасная спектроскопия (VERTEX-70 с микроскопом HYPERION 1000); изотопная масс-спектрометрия (Delta V Advantage).

### Микростроение, химический состав и биоминеральные примеси

Микростроение бактерий исследовалось методом атомно-силовой микроскопии. Полученные результаты можно обобщить следующим образом.

Масса штамма *Pseudomonas yamanorum* sp. (рис. 5) сложена палочковидными формами, часто с линейными цепочками углублений. Статистический размер бактерий —  $(1.552 \pm 0.304) \times (0.558 \pm 0.12)$  мкм, коэффициент удлинения составляет  $2.89 \pm 0.85$ . Коэффициент парной корреляции между крайними размерами — 0.3. При больших увеличениях в пределах палочек выявляется сеть разориентированных червеобразных субиндивидов размером  $(0.138 \pm 0.01) \times (0.028 \pm 0.01)$  мкм. Коэффициент их удлинения —  $5.3 \pm 1.46$ , коэффициент парной корреляции между крайними размерами — 0.53.

Розовые дрожжи *Rhodotorula glutinis* (рис. 5) образованы плотными агрегатами уплощенных прямоугольных форм, большей частью с угловато-прямолинейными торцами. Размеры форм варьируются в пределах  $(3.111 \pm 1.744) \times (0.595 \pm 0.321)$  мкм, коэффициент удлинения составляет  $5.7 \pm 2.69$ . Коэффициент парной корреляции между крайними размерами — 0.58.

Для штамма *Chlorella vulgaris* (рис. 5) характерны лентовидные формы шириной  $(1.877 \pm 0.637)$  мкм с мелкими изометричными ямками. При больших увеличениях выявляются глобуло- и чечевицеобразные частицы размером  $(0.114 \pm 0.184) \times (0.082 \pm 0.115)$  мкм и коэффициентом удлинения  $1.34 \pm 0.43$ .

В штамме кишечной палочки (рис. 6) собственно палочковидные формы оказались редкими. Здесь преобладают кокко-кольцеобразные формы с углублением в центре (черное на АСМ-изображениях). Статистический размер таких форм —  $(0.588 \pm 0.197) \times (0.534 \pm 0.147)$  мкм, коэффициент вытянутости —  $1.09 \pm 0.12$ . Коэффициент корреляции между крайними размерами — 0.94. Величина биоминеральных нанофаз, обнаруженных на АСМ-изображениях колоний, колеблется в пределах 20–50 нм.

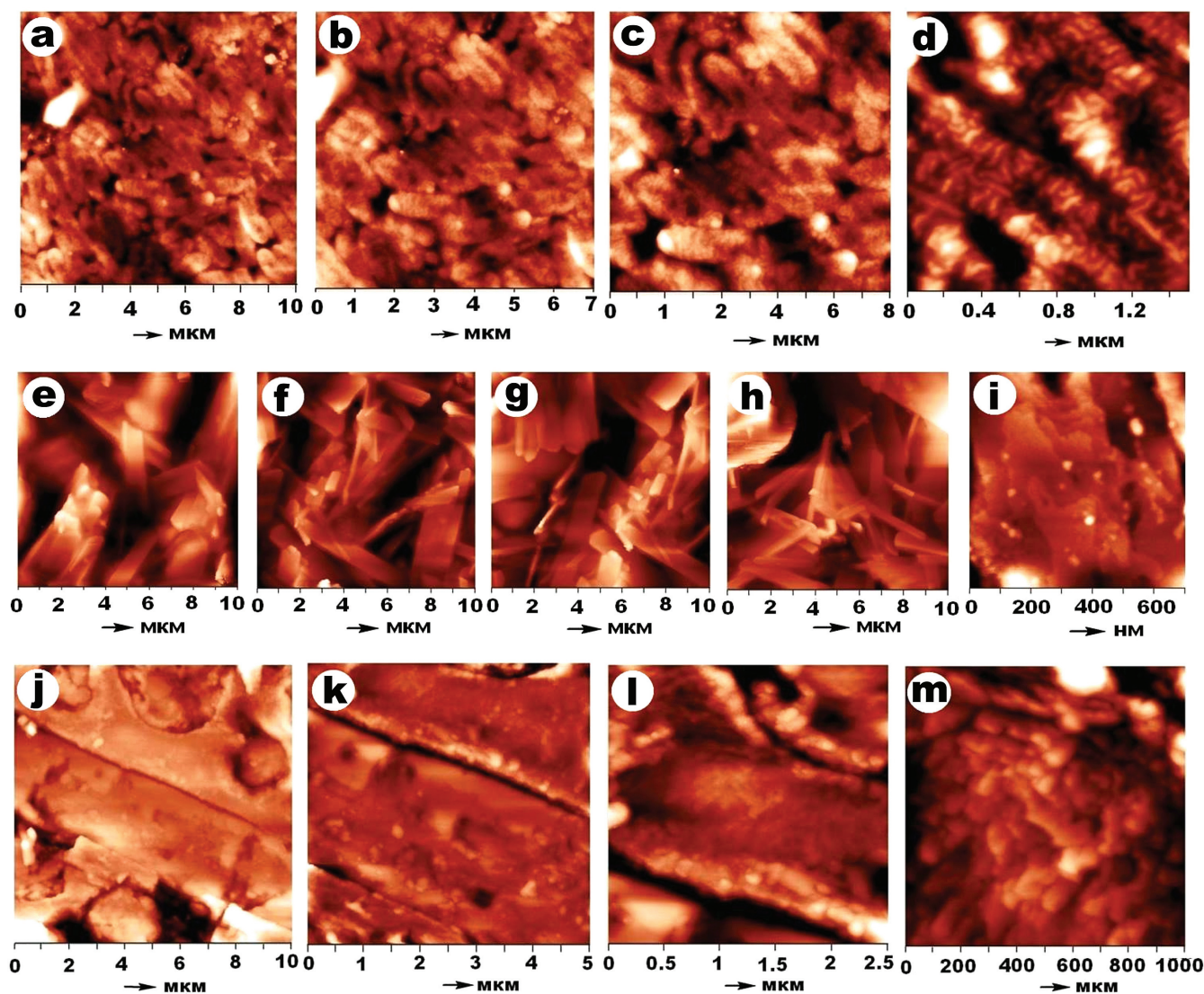
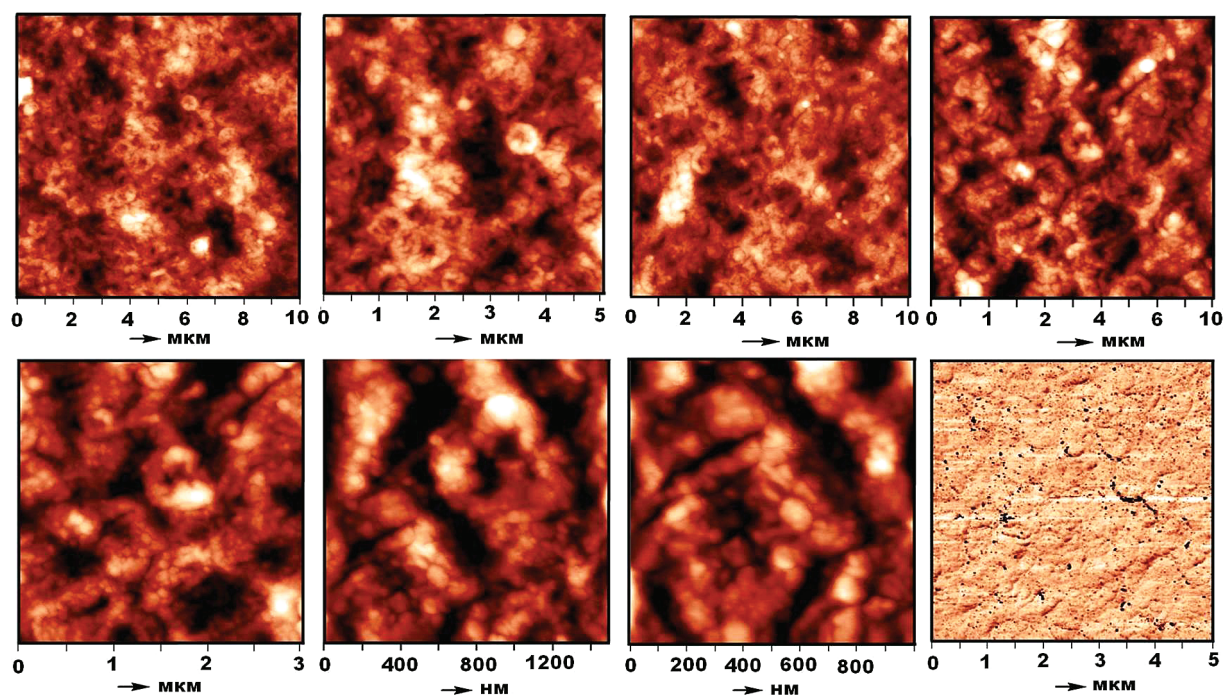


Рис. 5. АСМ-изображения псевдомонад (а–д), дрожжей (е–и) и хлореллы (j–m)

Fig. 5. AFM images of pseudomonads (a–d), yeast (e–i) and chlorella (j–m)





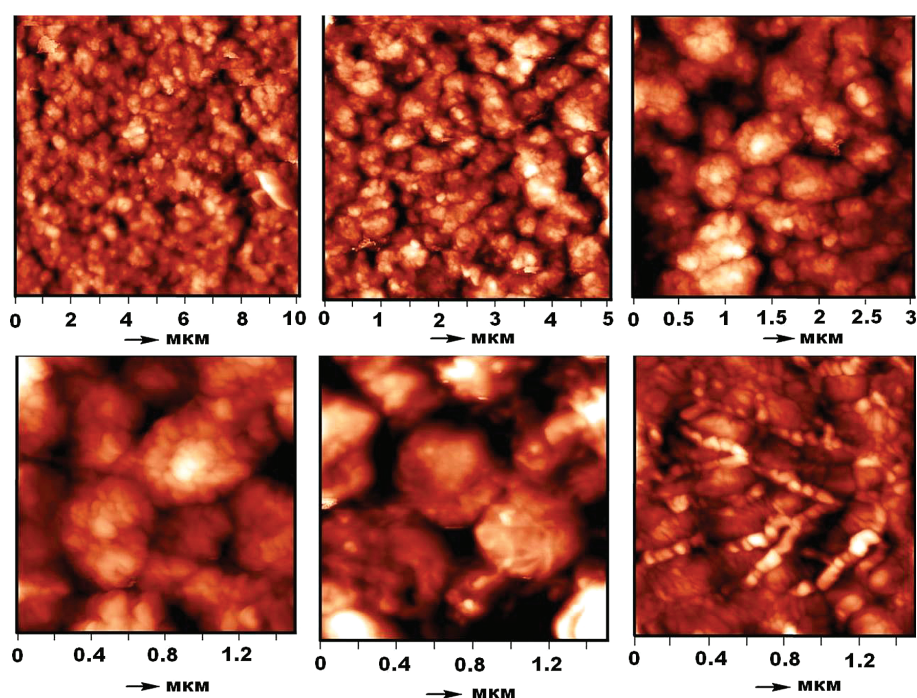
**Рис. 6.** АСМ-изображения кишечной палочки. В нижнем ряду на крайнем справа изображении черным цветом показаны наноразмерные выделения биоминералов

**Fig. 6.** AFM images of *Escherichia coli*. In the bottom row, on the far right of the image, nano-sized precipitates of biominerals are shown in black

В массе холерного вибриона (рис. 7) палочковидные формы тоже встречаются редко, их размер  $(1.5-4) \times (0.2-0.4)$  мкм со значением коэффициента удлинения 9–9.5. Преобладают же гроздьевидные агрегаты, сложенные субиндивидами чечевицеобразной формы. Агрегаты варьируются по размеру в статистических пределах  $(0.57 \pm 0.129) \times (0.404 \pm 0.113)$ , коэффициент их удлинения составляет  $1.47 \pm 0.33$ . Коэффициент парной корреляции между крайними размерами — 0.68. Кроме того, наблюдаются тонкие цепочки, образован-

ные очень мелкими (50–100 нм) коккоидными телами. Размер таких цепочек составляет  $(0.831 \pm 0.38) \times (0.69 \pm 0.012)$  мкм.

Туляремийный микроб (рис. 8) представлен сплошной массой коккоидных и чечевицеобразных бацилл размером  $(0.452 \pm 0.23) \times (0.335 \pm 0.18)$  мкм с коэффициентом удлинения  $1.38 \pm 0.41$ . Коэффициент корреляции между крайними размерами составляет 0.89. На фоне сплошных масс наблюдают линейные колонии более мелких, примерно на порядок, коккобацилл.



**Рис. 7.** АСМ-изображения холерного вибриона / **Fig. 7.** AFM images of *Vibrio cholerae*



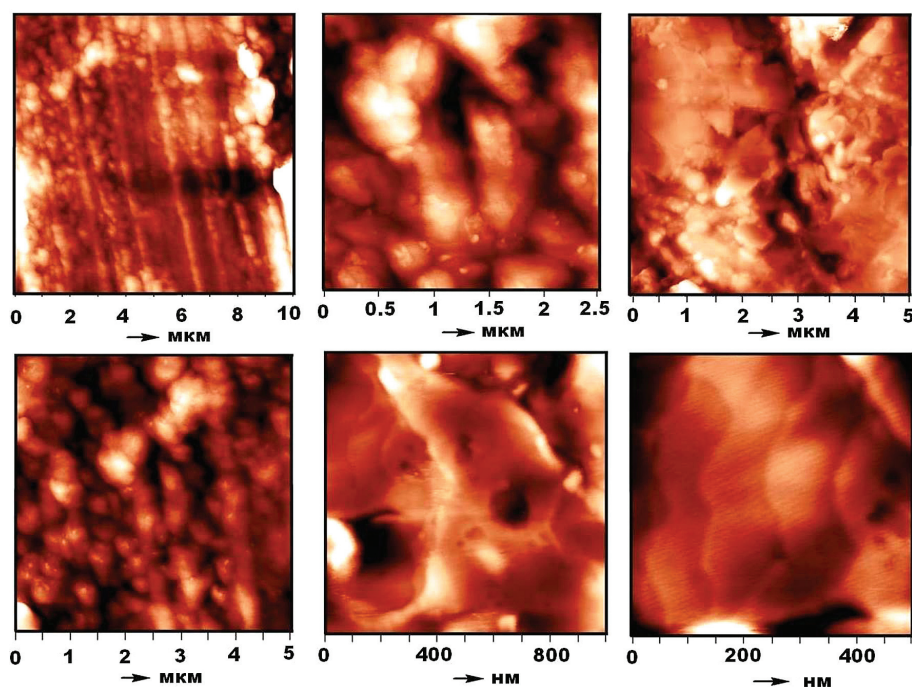


Рис. 8. АСМ-изображения туляремийного микроба / Fig. 8. AFM images of tularemia microbe

В колонии золотистого стафилококка преобладают шаровидные формы двух типов (рис. 9): 1) крупные, агрегатного сложения, на порядок более мелкие коккоиды и 2) мелкие коккоиды в рассеянном распределении. Формы первого типа варьируются по размеру в статистических пределах  $(0.453 \pm 0.16) \times (0.415 \pm 0.14)$  мкм, коэффициент вытянутости —  $1.09 \pm 0.1$ . Коэффициент парной корреляции между крайними размерами 0.96. Мелкие формы характеризуются размером  $(0.081 \pm 0.037) \times (0.074 \pm 0.035)$  мкм, коэффициентом вытянутости  $1.13 \pm 0.12$  и коэффициентом парной корреляции между крайними размерами 0.98. Спорадически встречаются палочковидные бактерии размером  $(0.43 \pm 0.21) \times (0.11 \pm 0.03)$  мкм, с коэффициентом удлинения  $4.29 \pm 2.54$ .

Химический состав неорганической компоненты изучался методом аналитической СЭМ (табл. 2). В результате проведенных исследований в микроорганизмах установлены Mg, Ca, Na, K, P, S, Cl (рис. 10) и, кроме того, спорадически встречающиеся Ba, Sr, Si, Cu, Zn. Суммарное содержание неорганических элементов колеблется в пределах 1.95—14.52 мас. %. По этому признаку исследованные образцы выстраиваются в следующую последовательность (мас. %): золотистый стафилококк (1.95) < псевдомонады (2.94—3.75) < холер-

ный вибрион (3.36) < кишечная палочка (4.8) < туляремийный микроб (5.21) < дрожжи (6.7—6.82) < хлорелла (14.52). При этом проанализированные микроорганизмы заметно варьируются по пропорциям обогащения неорганическими элементами. Штамм *Pseudomonas yamanorum* sp. характеризуется последовательностью снижения степени обогащения:  $S > Cl > K > P > Ca > Mg$ . В образце псевдомонад после опытов биоочистки почв от нефтезагрязнений эта последовательность несколько изменилась:  $Cl > P > S > K > Si$ . Для кишечной палочки установлена последовательность:  $Cl > P > K$ ; для холерного вибриона:  $Cl > P > S < Ca > K$ ; для туляремийного микроба:  $P > Cl > K > S > Na > Ca > Si$ ; для золотистого стафилококка:  $Cl > S > P$ .

Таким образом, для исследованных бактерий выявляется примерно одинаковая тенденция снижения степени обогащения неорганическими элементами в направлении от неметаллов — хлора, фосфора и серы — к щелочным и щелочноземельным металлам. Одноклеточные дрожжи *Rhodotorula glutinis* обнаруживают более сложную последовательность обогащения, в которой неметаллы и металлы чередуются:  $P > K > S > Cl > Na > Zn > Cu$ . Хлорелла демонстрирует особенную последовательность обогащения, в которой на лидирующие позиции выходят скорее металлы, чем неметал-

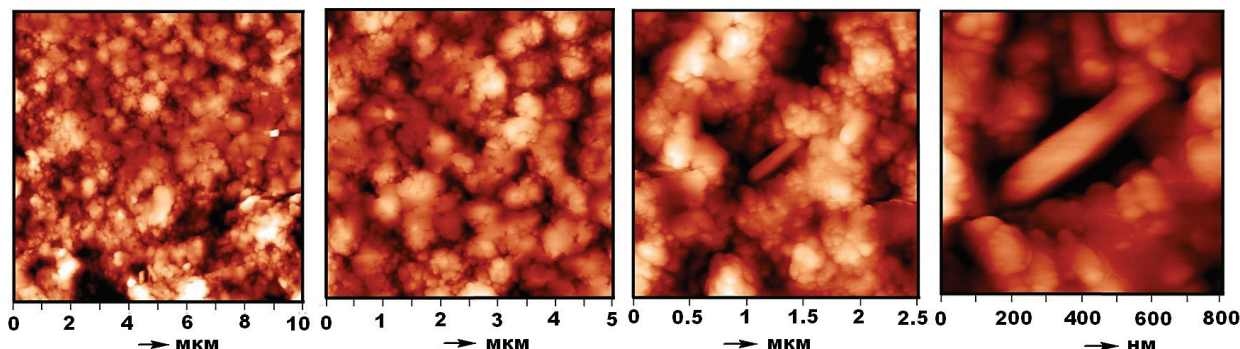


Рис. 9. АСМ-изображения золотистого стафилококка / Fig. 9. AFM images of *Staphylococcus aureus*

**Таблица 2.** Содержание неорганических элементов-примесей в исследованных микроорганизмах, мас. %

**Table 2.** The content of inorganic elements-impurities in the investigated microorganisms, wt. %

| № п/п                          | Образец<br>Sample | Si             | Ti           | Cu            | Zn             | Mg             | Ca             | Ba           | Sr           | Na             | K              | P              | S              | Cl             | Сумма<br>Total |
|--------------------------------|-------------------|----------------|--------------|---------------|----------------|----------------|----------------|--------------|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 1                              | БАК-1             | н. о.<br>n/d   | н. о.<br>n/d | н. о.<br>n/d  | н. о.<br>n/d   | 0.29           | 0.41           | н. о.<br>n/d | н. о.<br>n/d | н. о.<br>n/d   | 0.53           | 1.67           | 0.7            | 0.86           | 4.46           |
| 2                              |                   | «              | «            | «             | «              | н. о.<br>n/d   | 0.22           | н. о.<br>n/d | н. о.<br>n/d | н. о.<br>n/d   | 0.43           | 1.02           | 0.88           | 0.49           | 3.04           |
| Среднее ± СКО<br>Average ± RMS |                   | 0              | 0            | 0             | 0              | 0.15 ±<br>0.21 | 0.32 ±<br>0.13 | 0            | 0            | 0              | 0.48 ±<br>0.07 | 0.35 ±<br>0.46 | 0.79 ±<br>0.13 | 0.68 ±<br>0.26 | 3.75 ±<br>1.0  |
| 3                              | БАК-2             | 0.16           | н. о.<br>n/d | н. о.<br>n/d  | н. о.<br>n/d   | н. о.<br>n/d   | 0.17           | н. о.<br>n/d | н. о.<br>n/d | н. о.<br>n/d   | 0.25           | 0.52           | 0.48           | 1.44           | 3.02           |
| 4                              |                   | 0.2            | «            | «             | «              | «              | 0.29           | «            | «            | «              | 0.29           | 0.56           | 0.53           | 1.07           | 2.94           |
| 5                              |                   | 0.15           | «            | «             | «              | «              | «              | 0.4          | «            | «              | «              | 0.27           | 0.54           | 0.41           | 1.08           |
| Среднее ± СКО<br>Average ± RMS |                   | 0.17 ±<br>0.03 | 0            | 0             | 0              | 0              | 0              | 0            | 0            | 0              | 0.27 ±<br>0.02 | 0.54 ±<br>0.02 | 0.47 ±<br>0.06 | 1.2 ±<br>0.21  | 2.94 ±<br>0.03 |
| 6                              | ДРЖ-1             | н. о.<br>n/d   | н. о.<br>n/d | н. о.<br>n/d  | н. о.<br>n/d   | н. о.<br>n/d   | н. о.<br>n/d   | н. о.<br>n/d | н. о.<br>n/d | 0.89           | 2.83           | 2.72           | 0.38           | 0.77           | 7.59           |
| 7                              |                   | «              | «            | «             | «              | «              | «              | «            | «            | 0.92           | 2.49           | 2.59           | 0.38           | 0.35           | 6.73           |
| 8                              |                   | «              | «            | «             | «              | «              | «              | «            | «            | н. о.          | 1.94           | 2.01           | 0.36           | 0.38           | 4.69           |
| 9                              |                   | «              | «            | «             | «              | «              | «              | «            | «            | 0.37           | 2.91           | 2.31           | 0.48           | 0.43           | 6.5            |
| 10                             |                   | «              | «            | «             | «              | «              | «              | «            | 2.53         | 0.36           | 2.46           | 2.82           | 1.79           | 0.33           | 10.29          |
| 11                             |                   | «              | «            | «             | «              | «              | «              | «            | н. о.<br>n/d | н. о.<br>n/d   | 2.15           | 2.27           | 0.34           | 0.37           | 5.13           |
| Среднее ± СКО<br>Average ± RMS |                   | 0              | 0            | 0             | 0              | 0              | 0              | 0            | 0.42 ± 1.3   | 0.51 ±<br>0.41 | 2.46 ±<br>0.36 | 2.45 ±<br>0.31 | 0.61 ±<br>0.57 | 0.43 ±<br>0.17 | 6.82 ±<br>2.01 |
| 12                             | ДРЖ-2             | н. о.<br>n/d   | н. о.<br>n/d | н. о.<br>n/d  | н. о.<br>n/d   | н. о.<br>n/d   | н. о.<br>n/d   | н. о.<br>n/d | н. о.<br>n/d | 0.98           | 2.86           | 2.9            | 0.45           | 0.46           | 7.65           |
| 13                             |                   | «              | «            | «             | «              | «              | «              | «            | «            | 0.66           | 3.73           | 4.53           | 0.63           | 0.66           | 10.21          |
| 14                             |                   | «              | «            | «             | «              | «              | «              | «            | «            | н. о.<br>n/d   | 2.17           | 2.3            | 0.22           | 0.43           | 5.12           |
| 15                             |                   | «              | «            | 1.72          | 1.27           | «              | «              | «            | «            | «              | 2.03           | 1.98           | 0.26           | 0.36           | 7.62           |
| 16                             |                   | «              | «            | н. о.<br>n/d  | н. о.<br>n/d   | «              | «              | «            | «            | «              | 2.23           | 2.48           | 0.28           | 0.38           | 5.37           |
| 17                             |                   | «              | «            | «             | «              | «              | «              | «            | «            | «              | «              | 1.74           | 1.78           | 0.45           | 0.23           |
| Среднее ± СКО<br>Average ± RMS |                   | 0              | 0            | 0.29 ±<br>0.7 | 0.21 ±<br>0.52 | 0              | 0              | 0            | 0            | 0.27 ±<br>0.44 | 2.46 ±<br>0.72 | 2.66 ±<br>0.99 | 0.38 ±<br>0.16 | 0.42 ±<br>0.14 | 6.7 ± 2.22     |

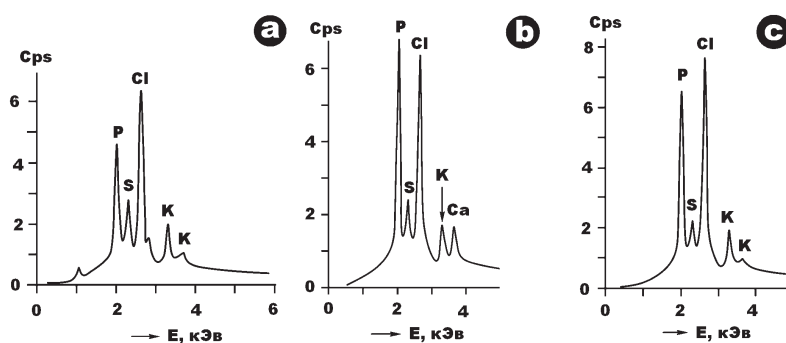


| № п/п                          | Образец<br>Sample | Si             | Ti           | Cu           | Zn           | Mg             | Ca             | Ba             | Sr           | Na           | K              | P              | S              | Cl             | Сумма<br>Total  |       |
|--------------------------------|-------------------|----------------|--------------|--------------|--------------|----------------|----------------|----------------|--------------|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-------|
| 18                             | МВД               | н. о.<br>n/d   | н. о.<br>n/d | н. о.<br>n/d | н. о.<br>n/d | 1.02           | н. о.<br>n/d   | н. о.<br>n/d   | н. о.<br>n/d | н. о.<br>n/d | 4.59           | 2.59           | 2.69           | н. о.<br>n/d   | 10.89           |       |
| 19                             |                   | «              | «            | «            | «            | 3.73           | «              | «              | «            | «            | 6.35           | 4.77           | 4.48           | 0.2            | 19.53           |       |
| 20                             |                   | «              | «            | «            | «            | 3.21           | «              | 10.23          | «            | «            | 5.21           | 3.91           | 5.04           | н. о.<br>n/d   | 27.6            |       |
| 21                             |                   | 2.39           | «            | «            | «            | н. о.<br>n/d   | «              | н. о.<br>n/d   | «            | «            | 3.35           | 0.5            | 1.07           | «              | 7.31            |       |
| 22                             |                   | 3.71           | «            | «            | «            | «              | «              | «              | «            | «            | 3.27           | 0.69           | 1.15           | «              | 8.82            |       |
| 23                             |                   | н. о.<br>n/d   | «            | «            | «            | «              | 1.79           | «              | «            | «            | «              | 5.54           | 3.43           | 3.29           | 0.27            | 14.32 |
| 24                             |                   | «              | «            | «            | «            | «              | 1.87           | «              | «            | «            | «              | 4.82           | 2.91           | 3.38           | 0.21            | 13.19 |
| Среднее ± СКО<br>Average ± RMS |                   | 0.87 ±<br>1.53 | 0            | 0            | 0            | 1.66 ±<br>1.45 | 0              | 1.46 ±<br>3.87 | 0            | 0            | 4.73 ±<br>1.12 | 2.69 ±<br>1.59 | 3.01 ±<br>1.52 | 0.1 ±<br>0.12  | 14.52 ±<br>7.02 |       |
| 25                             | ПЧИ-1             | н. о.<br>n/d   | н. о.<br>n/d | н. о.<br>n/d | н. о.<br>n/d | н. о.<br>n/d   | н. о.<br>n/d   | н. о.<br>n/d   | н. о.<br>n/d | н. о.<br>n/d | 0.56           | 1.45           | 0.67           | 2.12           | 4.8             |       |
| 26                             | ПЧИ-2             | «              | «            | «            | «            | «              | «              | «              | «            | «            | н. о.          | 0.4            | 0.52           | 3.63           | 4.55            |       |
| 27                             |                   | «              | «            | «            | «            | «              | «              | «              | «            | «            | 0.16           | 0.56           | 0.65           | 2.57           | 3.94            |       |
| 28                             |                   | «              | «            | «            | «            | «              | «              | «              | «            | «            | н. о.          | 0.86           | 0.92           | 3.73           | 5.51            |       |
| 29                             |                   | «              | «            | «            | «            | «              | «              | «              | «            | «            | 0.17           | 0.37           | 0.72           | 2.46           | 3.72            |       |
| 30                             | ПЧИ-3             | «              | «            | «            | «            | «              | «              | «              | «            | «            | н. о.          | 0.57           | 0.84           | 1.29           | 2.7             |       |
| 31                             |                   | «              | «            | «            | «            | «              | «              | «              | «            | «            | «              | 0.55           | 0.8            | 0.99           | 2.34            |       |
| 32                             |                   | «              | «            | «            | «            | «              | «              | «              | «            | «            | «              | 0.37           | 0.7            | 0.67           | 1.74            |       |
| 33                             |                   | «              | «            | «            | «            | «              | 0.24           | «              | «            | «            | «              | 0.9            | 0.64           | 1.72           | 3.5             |       |
| 34                             |                   | «              | «            | «            | «            | «              | 0.19           | «              | «            | «            | «              | 0.8            | 0.79           | 1.84           | 3.62            |       |
| 35                             | ПЧИ-4             | «              | «            | «            | «            | «              | «              | «              | «            | «            | «              | 0.29           | 0.42           | 0.33           | 1.04            |       |
| 36                             |                   | «              | «            | «            | «            | «              | «              | «              | «            | «            | «              | 0.26           | 0.58           | 2.42           | 3.26            |       |
| 37                             |                   | «              | «            | «            | «            | «              | «              | «              | «            | «            | «              | 0.27           | 0.44           | 0.68           | 1.39            |       |
| 38                             |                   | «              | «            | «            | «            | «              | «              | «              | «            | «            | «              | 0.52           | 0.56           | 1.85           | 2.93            |       |
| 39                             | ПЧИ-5             | «              | «            | «            | «            | «              | 0.37           | «              | «            | «            | 0.78           | 1.92           | 0.64           | 2.25           | 5.96            |       |
| 40                             |                   | «              | «            | «            | «            | «              | «              | «              | «            | «            | н. о.          | 0.2            | 0.26           | 1.34           | 1.8             |       |
| 41                             |                   | «              | «            | «            | «            | «              | 0.43           | «              | «            | «            | 0.43           | 2.16           | 0.69           | 2.08           | 5.79            |       |
| Среднее ± СКО<br>Average ± RMS |                   | 0              | 0            | 0            | 0            | 0              | 0.08 ±<br>0.15 | 0              | 0            | 0            | 0.1 ±<br>0.22  | 0.69 ±<br>0.57 | 0.64 ±<br>0.17 | 1.87 ±<br>0.98 | 3.36 ±<br>1.53  |       |
| 42                             | ПЧИ-6             | н. о.<br>n/d   | н. о.<br>n/d | н. о.<br>n/d | н. о.<br>n/d | н. о.<br>n/d   | н. о.<br>n/d   | н. о.<br>n/d   | н. о.<br>n/d | н. о.<br>n/d | 0.48           | 1.72           | 0.35           | 1.52           | 4.07            |       |
| 43                             |                   | «              | «            | «            | «            | «              | «              | «              | «            | «            | 0.32           | 3.19           | 0.54           | 1.22           | 5.27            |       |
| 44                             |                   | «              | «            | «            | «            | «              | «              | «              | «            | «            | 0.44           | 0.68           | 0.14           | 1.06           | 2.32            |       |
| 45                             |                   | «              | «            | «            | «            | «              | «              | «              | «            | «            | 0.18           | 2.17           | 0.64           | 1.79           | 4.78            |       |
| 46                             |                   | «              | «            | «            | «            | «              | «              | «              | «            | «            | 0.18           | 1.79           | 0.34           | 0.79           | 3.1             |       |
| 47                             |                   | «              | «            | «            | «            | «              | «              | «              | «            | «            | 0.25           | 1.85           | 0.45           | 0.75           | 3.3             |       |

Окончание таблицы 2 / End of table 2

| № п/п                          | Образец<br>Sample | Si             | Ti           | Cu           | Zn           | Mg           | Ca             | Ba           | Sr           | Na             | K              | P              | S              | Cl             | Сумма<br>Total |       |
|--------------------------------|-------------------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|--------------|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------|
| 48                             | ПЧИ-7             | «              | «            | «            | «            | «            | «              | «            | «            | «              | 0.31           | 2              | 0.44           | 0.87           | 3.62           |       |
| 49                             |                   | «              | «            | «            | «            | «            | 0.52           | «            | «            | «              | 0.59           | 1.68           | 0.56           | 1.56           | 4.91           |       |
| 50                             |                   | «              | «            | «            | «            | «            | н. о.<br>n/d   | «            | «            | 1.07           | 0.68           | 2.89           | 0.6            | 3.13           | 8.37           |       |
| 51                             |                   | 0.28           | «            | «            | «            | «            | «              | «            | «            | н. о.<br>n/d   | 0.5            | 2.16           | 0.31           | 1.61           | 4.86           |       |
| 52                             |                   | н. о.<br>n/d   | «            | «            | «            | «            | «              | «            | «            | «              | 0.33           | 1.61           | 0.2            | 1.83           | 3.97           |       |
| 53                             |                   | «              | «            | «            | «            | «            | «              | «            | «            | «              | 0.69           | 1.47           | 0.4            | 1.98           | 4.54           |       |
| 54                             |                   | «              | «            | «            | «            | «            | «              | «            | «            | «              | 0.55           | 1.54           | 0.41           | 2.14           | 4.64           |       |
| 55                             |                   | «              | «            | «            | «            | «            | «              | «            | «            | «              | 0.63           | 2.23           | 0.3            | 1.89           | 5.05           |       |
| 56                             |                   | «              | «            | «            | «            | «            | «              | «            | «            | «              | 0.43           | 2              | 0.58           | 2.49           | 5.5            |       |
| 57                             |                   | «              | «            | «            | «            | «            | «              | «            | «            | «              | 0.51           | 2.13           | 0.5            | 2.35           | 5.49           |       |
| 58                             |                   | «              | «            | «            | «            | «            | «              | «            | «            | «              | 0.72           | 2.45           | 0.64           | 1.94           | 5.75           |       |
| 59                             |                   | «              | «            | «            | «            | «            | «              | «            | «            | «              | 1.4            | 0.93           | 2.41           | 0.5            | 5.64           | 10.88 |
| 60                             |                   | «              | «            | «            | «            | «            | «              | «            | «            | «              | н. о.<br>n/d   | 0.64           | 2.49           | 0.49           | 1.84           | 5.46  |
| 61                             |                   | «              | «            | «            | «            | «            | «              | «            | «            | «              | 1.17           | 0.9            | 2.92           | 0.55           | 2.82           | 8.36  |
| Среднее ± СКО<br>Average ± RMS |                   | 0.01 ±<br>0.06 | 0            | 0            | 0            | 0            | 0.03 ±<br>0.12 | 0            | 0            | 0.18 ±<br>0.45 | 0.51 ±<br>0.22 | 2.07 ±<br>0.58 | 0.45 ±<br>0.14 | 1.96 ±<br>1.08 | 5.21 ±<br>1.99 |       |
| 62                             | ПЧИ-8             | н. о.<br>n/d   | н. о.<br>n/d | н. о.<br>n/d | н. о.<br>n/d | н. о.<br>n/d | н. о.<br>n/d   | н. о.<br>n/d | н. о.<br>n/d | н. о.<br>n/d   | н. о.<br>n/d   | 0.24           | 0.33           | 1.38           | 1.95           |       |



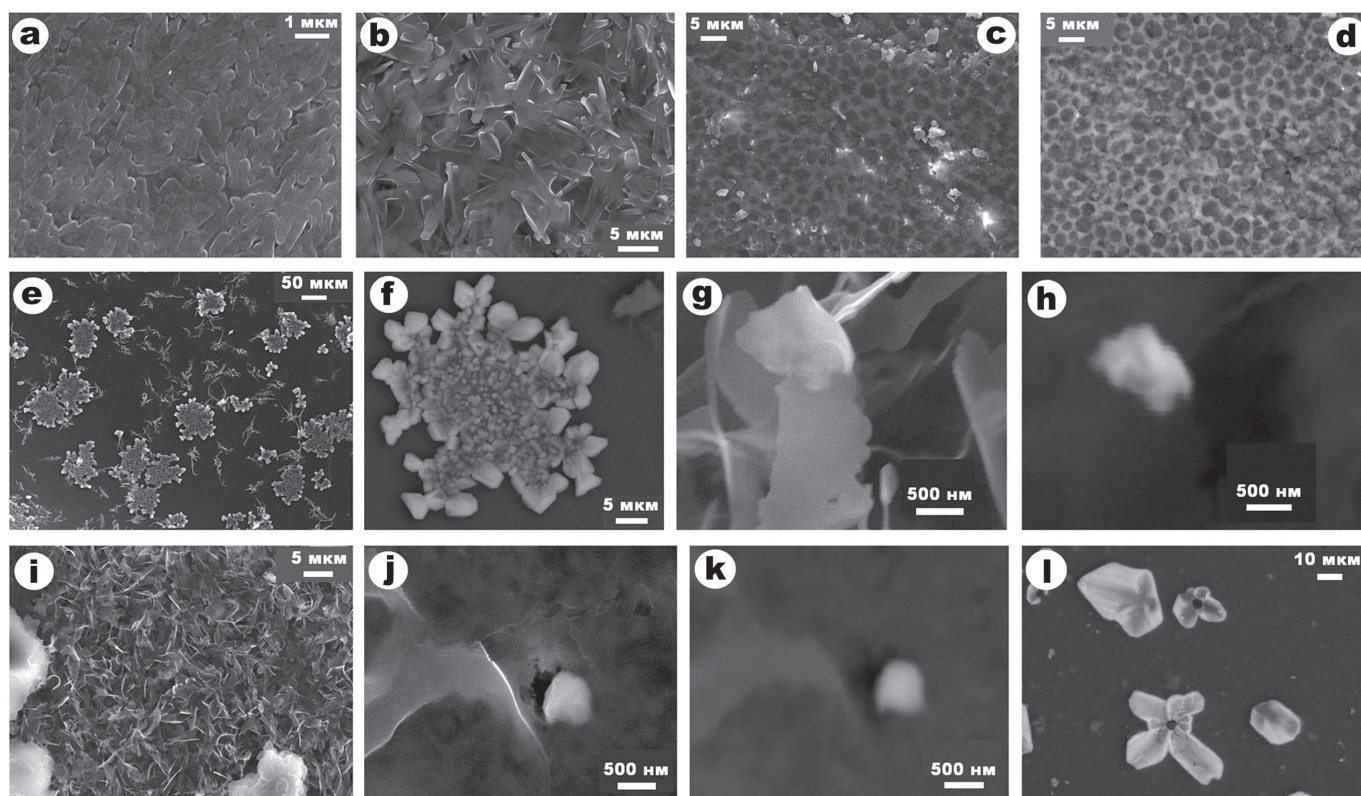


**Рис. 10.** Типичные энергодисперсионные спектры, полученные от органического вещества микроорганизмов: а — кишечная палочка, б — холерный вибрион, с — туляремиальный микроб

**Fig. 10.** Typical energy dispersive spectra obtained from organic substances of microorganisms: а — *Escherichia coli*, б — *Vibrio cholerae*, с — tularemia microbe

лы:  $K > S > P > Mg > Ba > Si > Cl$ . Важно подчеркнуть, что в исследованных микроорганизмах неметаллические элементы-примеси характеризуются гораздо большей однородностью распределения (среднее значение коэффициента вариации составляет 57 %), чем металлические (185 %). Это может свидетельствовать о разной степени сродства неорганических элементов с органическим веществом микроорганизмов.

В результате электронно-микроскопических исследований практически во всех микроорганизмах были установлены нанометровые до субмикронных выделения биоминеральных фаз (рис. 11), как раз и концентрирующих отмеченные выше примеси неорганических элементов. Так, в псевдомонадах установлены кальцит  $Ca[CO_3]$  и гидрогенфосфат магния  $H_{1.1-1.16}Mg_{0.9-0.95}[PO_4]$ . В патогенных бактериях (кишечная па-



**Рис. 11.** Внутреннее строение и наномикроразмерные биоминеральные фазы в составе микроорганизмов: а — псевдомонады; б — дрожжи; с, d — кишечная палочка; е, f — холерный вибрион, выделения гипса на поверхности колонии; g, h — туляремиальный микроб, соответственно нановыделения латуни и гипс внутри колонии; k, l — золотистый стафилококк, соответственно нановыделения бадделеита и микросростки гипса внутри колонии. СЭМ-изображения в режимах вторичных (а—с, е—g, i, j, l) и упругоотраженных (d, h, k) электронов

**Fig. 11.** Internal structure and nano-micro-sized biomineral phases in the composition of microorganisms: а — pseudomonas; б — yeast; с, d — *Escherichia coli*; е, f — *Vibrio cholera*, — gypsum secretions on the surface of the colony; g, h — tularemia microbe, respectively, nano-emission of brass and gypsum inside the colony; k, l — *Staphylococcus aureus*, respectively, nano-emission of baddeleyite and micro-growth of gypsum inside the colony. SEM images in the modes of secondary (а—с, е—g, i, j, l) and elastically reflected (d, h, k) electrons



лочка, холерный вибрион, туляремиальный микроб и золотистый стафилококк) обнаружены галит NaCl (большая часть на поверхности штаммов), кальцит, доломит  $\text{CaMg}[\text{CO}_3]_2$ , каолинит  $\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$ , бадделеит  $\text{ZrO}_2$  и металлический сплав латунного состава  $\text{Cu}_{0.55-0.67}\text{Zn}_{0.36-0.45}$  (рис. 12). В дрожжах *Rhodotorula glutinis* выявлены два гидрогенсульфатфосфата бария: 1)  $\text{H}_{0.31-0.58}(\text{Ba}_{2.1-2.17}\text{Cu}_{0.08-0.1}\text{K}_{0.04-0.06}\text{Zn}_{0-0.07})_{2.24-2.31}[\text{PO}_4]_{1.02-1.04}[\text{SO}_4]_{0.96-0.98}$  или с целочисленными коэффициентами —  $\text{H}_2\text{Ba}_9[\text{PO}_4]_4[\text{SO}_4]_4$  и 2)  $\text{H}_{2.42}(\text{Ba}_{0.95}\text{K}_{0.49}\text{Cu}_{0.08}\text{Zn}_{0.07})_{1.59}[\text{PO}_4]_{1.11}[\text{SO}_4]_{0.89}$  или  $\text{H}_{21-22}(\text{Ba}_{8.5-9}\text{K}_{4-4.5}(\text{Cu,Zn})_{1-1.5})_{14-14.5}[\text{PO}_4]_{10}[\text{SO}_4]_8$ . Кроме того, здесь же зарегистрированы два фосфатсульфата бария:

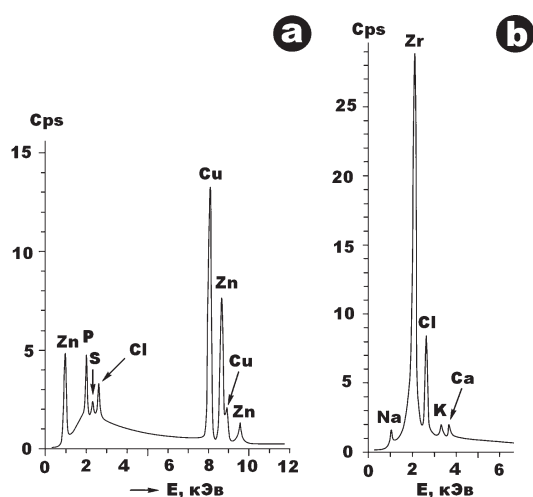


Рис. 12. Энергодисперсионные спектры, полученные от микровыделений латунного сплава (а) и бадделеита (б) в органическом веществе соответственно туляремиального микроба и золотистого стафилококка

Fig. 12. Energy dispersive spectra obtained from microprecipitations brass alloy (a) and baddeleyite (b) in organic matter, respectively tularemia microbe and *Staphylococcus aureus*

1)  $(\text{Ba}_{1.33-1.46}\text{K}_{0.04-0.21})_{1.37-1.67}[\text{SO}_4]_{0.74-0.88}[\text{PO}_4]_{0.12-0.16}(\text{OH})_{0.74-1.01}$  или с целочисленными коэффициентами —  $(\text{Ba}_{22}\text{K})_{23}[\text{SO}_4]_{12}[\text{PO}_4]_{2.5}(\text{OH})_{13.5}$  и 2)  $(\text{Ba}_{3.04-3.86}\text{K}_{0.07-0.01})[\text{PO}_4]_{0.91-0.92}[\text{SO}_4]_{1.08-1.09}$  или  $\text{H}_{17-20}(\text{Ba}_{24-27}\text{K}_{0.5-1})_{25-27.5}[\text{PO}_4]_{6.5-7.5}[\text{SO}_4]_{7.5-9}(\text{OH})_{17-20}$ . В хлорелле выявлены гидрогенсульфатфосфаты  $\text{H}_{0.51-2.88}(\text{K}_{0.57-1.5}\text{Mg}_{0.45-0.74}\text{Ba}_{0-1.28})_{1.63-2.66}[\text{PO}_4]_{0.54-1.05}[\text{SO}_4]_{0.95-1.46}$  или с целочисленными коэффициентами —  $\text{H}_{1.5}(\text{K}_{1-9}\text{Mg}_{1-4}\text{Ba}_{0-2.5})_{4.5-13}[\text{PO}_4]_{1-6.5}[\text{SO}_4]_{2-6}$ .

Следует подчеркнуть, что отмеченный выше факт обнаружения в микроорганизмах естественных для них биоминералов не является пионерским. Ранее сульфаты, карбонаты, пирит, оксигидроксиды железа, самородно-металлические фазы и металлоорганические соединения с Cu, Fe, Cr, Ni, Mn, Al, Au уже отмечались как компоненты бактериальных клеток в пигментном холелите [10].

### Микроэлементы

Содержание микроэлементов в исследованных микроорганизмах определялось высокочувствитель-

ным методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. В результате проведенного анализа в составе объектов были установлены 45 микроэлементов, суммарная концентрация которых варьируется в диапазоне 0.003—0.26 мас. % (табл. 3). В направлении роста этой концентрации проанализированные микроорганизмы образуют следующую последовательность: туляремиальный микроб < холерный вибрион < кишечная палочка < золотистый стафилококк << оригинальный штамм холерного вибриона (ПЧИ-5) < дрожжи < псевдомонадные бактерии << хлорелла. В целом распределение микроэлементов в изученных микроорганизмах согласуется с универсальным законом их распределения в природных объектах в зависимости от атомных масс: в направлении от легких к тяжелым содержание микроэлементов в бактериях сокращается [18].

В связи с известным фактом прогрессивного накопления микроэлементов в органическом веществе и костях при фоссилизации значительный интерес представляет сопоставление степени обогащения микроэлементами исследованных микроорганизмов и органических тканей ископаемых животных. Сравнение показало, что суммы микроэлементов даже в хорошо сохранившихся органических тканях предголоценового мамонта системно сдвинуты относительно современных микроорганизмов в сторону значительно больших концентраций (рис. 13).

Расчеты отношений биокларков (средних содержаний в бактериях и наземных растениях) к их кларкам в терригенных горных породах [11] позволяет подразделить элементы по степени родства к биоорганическому веществу на три группы (рис. 14): 1) эссенциальные — жизненно необходимые и потому концентрирующиеся в организмах; 2) функционально-активные — промежуточные по характеру распределения между организмами и горными породами; 3) абиотические — концентрирующиеся в горных породах и большей частью токсичные для организмов. Применительно к исследованным микроорганизмам функциональный состав микроэлементов выглядит следующим образом: эссенциальных элементов в них 9 (Zn, As, Se, Rb, Mo, Ag, Cd, Pb, Bi); физиогенно-активных — 17 (Li, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Ga, Sr, Y, Zr, Sn, Sb, Cs, Ba, U); абиотических — 19 (B, Sc, Nb, W, Tl, лантаноиды). Групповые содержания и пропорции между ними в составе исследованных образцов широко варьируются, но при этом сохраняется принцип подавляющего преобладания эссенциальных элементов над абиотическими (среднее отношение Э/АБ =  $196 \pm 153$ ), что отражает, очевидно, естественное состояние нефоссилизированных организмов. Например, для фоссилизированных тканей предголоценового мамонта эти значения на 1—2 порядка ниже. Тем не менее между собой исследованные нами микроорганизмы по величине коэффициента Э/АБ несколько различаются, выстраиваясь в следующую последовательность его уменьшения: дрожжи > холерный вибрион > хлорелла > кишечная палочка > туляремиальный микроб > псевдомонады > золотистый стафилококк. Обращает также на себя внимание, что бактерии, выращенные в стерильных условиях, и микроорганизмы, выделенные из почв (псевдомонады, дрожжи, хлорелла), по этому коэффициенту системно не различаются.

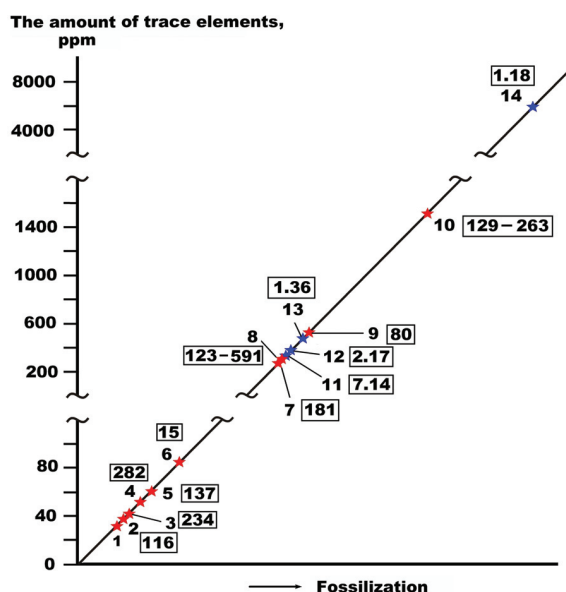
**Таблица 3.** Содержание микроэлементов в исследованных микроорганизмах, мг/т

| Элементы<br>Elements | БАК-1       | БАК-2       | ДРЖ-1       | ДРЖ-2       | МВД-1       | МВД-2       | ПЧИ-1       | ПЧИ-2       | ПЧИ-3       | ПЧИ-4       | ПЧИ-5       | ПЧИ-6       | ПЧИ-7       | ПЧИ-8       |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Li                   | 12          | н. о. / n/d | н. о. / n/d | н. о. / n/d | 260         | 209         | 43          | н. о. / n/d | н. о. / n/d | н. о. / n/d | н. о. / n/d | н. о. / n/d | н. о. / n/d | 819         |
| B                    | н. о. / n/d | «           | «           | «           | 10580       | 621         | н. о. / n/d | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           |
| Sc                   | «           | «           | «           | «           | н. о. / n/d | н. о. / n/d | «           | «           | «           | «           | 22          | «           | «           | «           |
| Ti                   | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | 126705      | «           | «           | «           |
| V                    | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | 10754       | «           | «           | «           |
| Cr                   | «           | 1566        | 205         |             | 236         | «           | 621         | «           | «           | 3129        | 39921       | 128         | 1166        | 3217        |
| Mn                   | 10296       | 487         | 7370        | 6589        | 9008        | 7175        | 2353        | 1876        | 2146        | 1931        | 23369       | 800         | 1011        | 3885        |
| Co                   | н. о. / n/d | 27          | 4           | н. о. / n/d | 8           | н. о. / n/d | 42          | 14          | 8           | 15          | 1045        | н. о.       | 14          | 85          |
| Ni                   | 2811        | 716         | 914         | 1442        | 1713        | 1699        | 396         | 5734        | 2003        | 1005        | 17107       | 1927        | 855         | 2738        |
| Cu                   | 2435        | 6907        | 637         | 1492        | 6460        | 3192        | 1501        | 5536        | 2661        | 2204        | 83303       | 6242        | 4714        | 6365        |
| Zn                   | н. о.       | н. о.       | н. о.       | н. о.       | 1352189     | 146032      | 33832       | 16624       | 15058       | 21009       | 42662       | 13625       | 16670       | 10735       |
| Ga                   | 261         | 43          | 159         | 126         | 262         | 222         | 127         | 70          | 73          | 47          | 534         | 169         | 207         | 277         |
| As                   | н. о. / n/d | н. о. / n/d | н. о. / n/d | н. о. / n/d | н. о. / n/d | н. о. / n/d | 886         | н. о. / n/d | н. о. / n/d | н. о. / n/d | 1843        | 320         | 332         | 582         |
| Se                   | «           | «           | «           | «           | «           | «           | 1025        | «           | «           | «           | н. о. / n/d | н. о. / n/d | н. о. / n/d | 2994        |
| Rb                   | 3506        | 2063        | 777         | 634         | 10442       | 12496       | 721         | 140         | 87          | 25          | 2968        | 226         | 794         | 1147        |
| Sr                   | 69816       | 5935        | 7569        | 7235        | 8834        | 7032        | 12168       | 4759        | 3707        | 3967        | 2677        | 1627        | 1537        | 36250       |
| Y                    |             |             | 7           | 8           | 28          |             | 28          | 41          | 28          | 27          | 173         | 25          |             | 64          |
| Zr                   |             |             | 362         |             | 335         |             |             |             |             |             | 334         |             |             |             |
| Nb                   |             |             | 92          | 44          | 103         | «           | 25          | «           | «           | «           | 130         | «           | «           | «           |
| Mo                   | 1695        | 2079        | 6180        | 5669        | 2103        | 562         | 453         | «           | «           | «           | 137         | «           | «           | 735         |
| Ag                   | 7736        | 37          | 752         | 4220        | 575         | 2208        | 200         | 854         | 338         | 121         | 95          | 269         | 187         | 425         |
| Cd                   | 188         | 261         | 97          | 289         | 163         | 282         | 112         | 190         | 277         | 161         | 205         | 278         | 205         | 128         |
| Sn                   | н. о. / n/d | н. о. / n/d | н. о. / n/d | н. о. / n/d | 52          | н. о. / n/d | н. о. / n/d | н. о. / n/d | н. о. / n/d | 22          | н. о. / n/d | н. о. / n/d | н. о. / n/d | н. о. / n/d |
| Sb                   | «           | «           | «           | «           | 43          | «           | 126         | «           | «           | «           | 81          | «           | 10          | «           |
| Cs                   | 22          | 27          |             |             | н. о. / n/d |             | 7           | «           | «           | «           | 27          | «           | 3           | 14          |
| Ba                   | 415747      | 25327       | 89023       | 480467      | 1166984     | 243046      | 3161        | 19797       | 13095       | 14678       | 13597       | 7382        | 8373        | 10953       |
| La                   | н. о. / n/d | н. о. / n/d | н. о. / n/d | н. о. / n/d | н. о. / n/d | н. о. / n/d | 39          | н. о. / n/d | н. о. / n/d | н. о. / n/d | н. о. / n/d | н. о. / n/d | н. о. / n/d | 83          |
| Ce                   | «           | «           | «           | «           | «           | «           | 69          | «           | «           | «           | «           | «           | «           | 254         |
| Pr                   | «           | «           | «           | «           | «           | «           | 16          | «           | «           | «           | «           | «           | «           | 53          |
| Nd                   | «           | «           | «           | «           | «           | «           | 76          | «           | «           | «           | «           | «           | «           | 267         |
| Sm                   | «           | «           | «           | «           | «           | «           | н. о. / n/d | «           | «           | «           | «           | «           | «           | 72          |
| Eu                   | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | 32          |
| Gd                   | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | 74          |
| Tb                   | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | 10          |
| Dy                   | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | 40          |
| Ho                   | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | 8           |
| Er                   | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | 17          |
| Tm                   | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | 2           |
| Yb                   | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | «           | 14          |



Окончание таблицы 3 / End of table 3

| Элементы<br>Elements                                   | БАК-1       | БАК-2       | ДРЖ-1       | ДРЖ-2       | МВД-1   | МВД-2       | ПЧИ-1 | ПЧИ-2       | ПЧИ-3       | ПЧИ-4       | ПЧИ-5  | ПЧИ-6       | ПЧИ-7 | ПЧИ-8 |
|--------------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------|-------------|-------|-------------|-------------|-------------|--------|-------------|-------|-------|
| Lu                                                     | «           | «           | «           | «           | «       | «           | «     | «           | «           | «           | «      | «           | «     | 2     |
| W                                                      | 3           | «           | «           | «           | 61      | 23          | 27    | «           | 77          | 84          | 108    | «           | 155   | 424   |
| Tl                                                     | 173         | 24          | «           | «           | «       | «           | 28    | «           | н. о. / n/d | н. о. / n/d | 17     | «           | 8     | 12    |
| Pb                                                     | 932         | 896         | 162         | 388         | 1914    | 480         | 1155  | 2768        | 1691        | 1971        | 2043   | 457         | 268   | 1334  |
| Bi                                                     | н. о. / n/d | н. о. / n/d | н. о. / n/d | н. о. / n/d | 9       | н. о. / n/d | 21    | 544         | 558         | 404         | 261    | н. о.       | н. о. | 24    |
| U                                                      | «           | 23          | 27          | 25          | 104     | 27          | н. о. | н. о.       | н. о.       | н. о.       | 27     | «           | 4     | 128   |
| Сумма<br>Total                                         | 515633      | 46418       | 114337      | 508628      | 2572466 | 425306      | 59258 | 58947       | 41807       | 50800       | 370145 | 33475       | 36513 | 84263 |
| Эссенциалы (ЭС)<br>Essentials                          | 14057       | 5359        | 7995        | 11225       | 1367499 | 162087      | 38405 | 21120       | 18009       | 23691       | 50214  | 15175       | 18460 | 18232 |
| Физиогенно-<br>активные (ФА)<br>Physiogenically active | 501400      | 41058       | 106277      | 497384      | 1194327 | 262602      | 20573 | 37827       | 23721       | 27025       | 319654 | 18300       | 17894 | 64795 |
| Антибионты (АБ)<br>Antibionts                          | 176         | н. о. / n/d | 65          | 19          | 10640   | 617         | 280   | н. о. / n/d | 77          | 84          | 277    | н. о. / n/d | 159   | 1236  |
| ЭС/АБ<br>Essentials/Antibionts                         | 80          | н. о. / n/d | 123         | 591         | 129     | 263         | 137   | н. о. / n/d | 234         | 282         | 181    | н. о. / n/d | 116   | 15    |

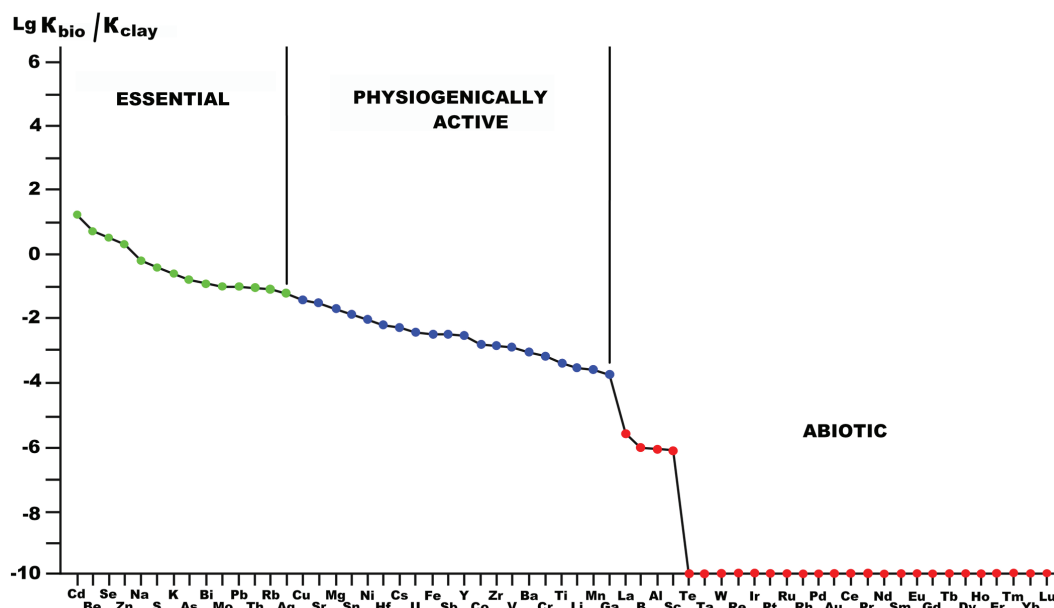


**Рис. 13.** Вариации суммарной концентрации микроэлементов в исследованных микроорганизмах и фоссилизованных органических тканях таймырского предголоценового мамонта. Микроорганизмы: 1, 2 — туляремийный микроб; 3, 4 — холерный вибрион; 5 — холерный вибрион и кишечная палочка; 6 — золотистый стафилококк; 7 — аномальный *Vibrio cholerae* Eltor 19430; 8 — дрожжи; 9 — псевдомонады; 10 — хлорелла. Ткани мамонта: 11 — волосы; 12 — кожа; 13 — жировая ткань; 14 — мышечная ткань. В рамках приведены значения Э/АБ

**Fig. 13.** Variations in the total concentration of trace elements in the studied microorganisms and fossilized organic tissues of the Taimyr pre-Holocene mammoth. Microorganisms: 1, 2 — tularemia microbe; 3, 4 — *Vibrio cholerae*; 5 — *Vibrio cholerae* and *Escherichia coli*; 6 — *Staphylococcus aureus*; 7 — abnormal *Vibrio cholerae* Eltor 19430; 8 — yeast; 9 — pseudomonas; 10 — chlorella. Mammoth tissues: 11 — hair; 12 — leather; 13 — adipose tissue; 14 — muscle tissue. The frames show E/AB values

Корреляционный анализ показывает, что около 62 % микроэлементов в составе исследованных микроорганизмов связаны между собой сильными положительными связями (коэффициенты парной корреляции колеблются от 0.3 до 1). В целом выявляется шесть групп таких элементов: 1) Sc, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Ga, As, Sr, Y, Zr, Nb, Sb, Cs, Pb, Mo; 2) W, Ga, As, Se, Y, Bi; 3) Sr, Sc, Se, U, W; 4) Zn, Rb, Zr, Nb, Sn, Ba, U, W; 5) Sr, Zr, Ag, Cs, Tl; 6) Mo, Ag, Ba. При этом в число положительно связанных между собой элементов входят 8 из 9 (89 %) эссенциалов, 16 из 17 (94 %) физиогенно-активных и только 4 из 19 (21 %) антибионтов. Из чего следует, что увязанными между собой в составе микроорганизмов являются преимущественно эссенциальные и физиогенно-активные микроэлементы, и лишь изредка антибиотические.

Сравнительный анализ показал, что исследованные образцы микроорганизмов различаются не только по суммарным и групповым содержаниям, но и по ассоциациям наиболее характерных (типоморфных) для них микроэлементов. Так, для псевдомонад в качестве типоморфных выступают Mn, Sr, Ag, Ba, Tl. В образце псевдомонад после опыта биоочистки к ним добавился Cr. В дрожжах в качестве типоморфных зарегистрированы Mn, Mo, Ba, Ag. Для хлореллы характерны Li, B, Mn, Cu, Zn, Rb, Ag, Ba, U, а для кишечной палочки — Zn, As, Se, Sb, La, Ce, Pr, Nd (при сумме лантаноидов около 200 мг/т). В большинстве образцов холерного вибриона в качестве типоморфных содержатся Ni, Cu, Y, Pb, Bi, Cr. При этом в одном штамме из четырех изученных (ПЧИ-5) обнаружилась гораздо более широкая ассоциация таких элементов — Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Rb, Y, Zr, Nb, Sb, W, Pb. Для туляремийного микроба типичными оказались только Cu и W. Наконец, золотистый стафилококк — единственная в нашем случае грамположительная бактерия — содержит наиболее широкую группу типоморфных микроэлементов, включающую Li, Cr, Co, Ni, Cu,



**Рис. 14.** Функциональные группы микроэлементов в живых организмах. На ординате показаны логарифмы отношений кларков химических элементов в наземных растениях и в терригенных породах

**Fig. 14.** Functional groups of trace elements in living organisms. The ordinate — logarithms of the ratio of the clarkes of chemical elements in terrestrial plants and in terrigenous rocks



As, Se, Sr, Y, Mo, W, Pb, U и даже все лантаноиды. Последнее особенно примечательно, поскольку именно лантаноиды являются наиболее токсичными для живых организмов абиотическими элементами.

### Элементный и аминокислотный состав органического вещества

Состав органического вещества хорошо тестируется термическим анализом. Полученные нами данные показали, что нагревание вещества микроорганизмов сопровождается несколькими этапами термических превращений (рис. 15). В интервале 90–190 °C происходит низкотемпературная дегидратация, представленная одним-двумя небольшими эндотермическими эффектами. При больших температурах осуществляется термическое окисление, отражающееся серией экзотермических эффектов и значительной потерей массы. На первом этапе окисляется углеводно-липидная (жировая) компонента органического вещества, выгорающая в интервале 260–370 °C с образованием на кривой нагревания нескольких экзотермических пиков, интенсивность которых повышается с ростом температуры. Второй этап окисления приходится на диапазон 390–560 °C и соответствует выгоранию белковой компоненты органического вещества, которое тоже протекает неравномерно с образованием двух-трех экзотермических эффектов разной интенсивности. Среди последних эффект с максимумом при 550–560 °C демонстрирует максимальную интенсивность.

Следует подчеркнуть, что в картине термических преобразований исследованных микроорганизмов сильно преобладают эффекты выгорания именно белковой составляющей при сохранении высокой температуры ее окисления, что разительно отличается от соответствующих картин термического окисления существенно фоссилизованных биоорганических веществ. В последнем случае эффект выгорания часто сводит-

ся к практически единичному экзотермическому эффекту средней интенсивности в области относительно низких температур 300–350 °C.

Сравнительный анализ приводит к выводу, что большинство проанализированных микроорганизмов характеризуются близкими термическими свойствами. Исключением являются два образца. Это, во-первых, холерный вибрион, на кривой нагревания которого в интервале выгорания белковой компоненты наблюдается лишь единичный весьма интенсивный эндотермический пик с максимумом при 372 °C. А во-вторых — хлорелла, на кривой нагревания которой доминирует один очень узкий и интенсивный пик с максимумом при 370 °C.

Непосредственно элементный состав органического вещества микроорганизмов анализировался методом аналитической СЭМ с использованием ЭДС-спектрометра X-max 50. Согласно полученным данным (табл. 4), исследованные образцы широко варьируются по составу, особенно в части содержания азота. Очевидно, что это обусловлено колебанием пропорции между белковой (азотсодержащей) и жировой компонентами. Судя по отношению N/C, исследованные микроорганизмы по признаку «белковости» могут быть сведены в следующую последовательность: псевдомонады > кишечная палочка > туляремиальный микроб > холерный вибрион > хлорелла > золотистый стафилококк > дрожжи. Наиболее однородными по этому признаку являются холерный вибрион и кишечная палочка, а самыми неоднородными — дрожжи и туляремиальный микроб.

На соответствующей диаграмме (рис. 14, а) эта последовательность подтверждается и хорошо иллюстрируется статистическими полями состава микроорганизмов. Сопоставление данных по исследованным образцам с рядом важных природных органических веществ (рис. 14, б) приводит к следующим выводам. Во-первых, изученные микроорганизмы действительно имеют смешанный жиробелковый состав, о чем сви-

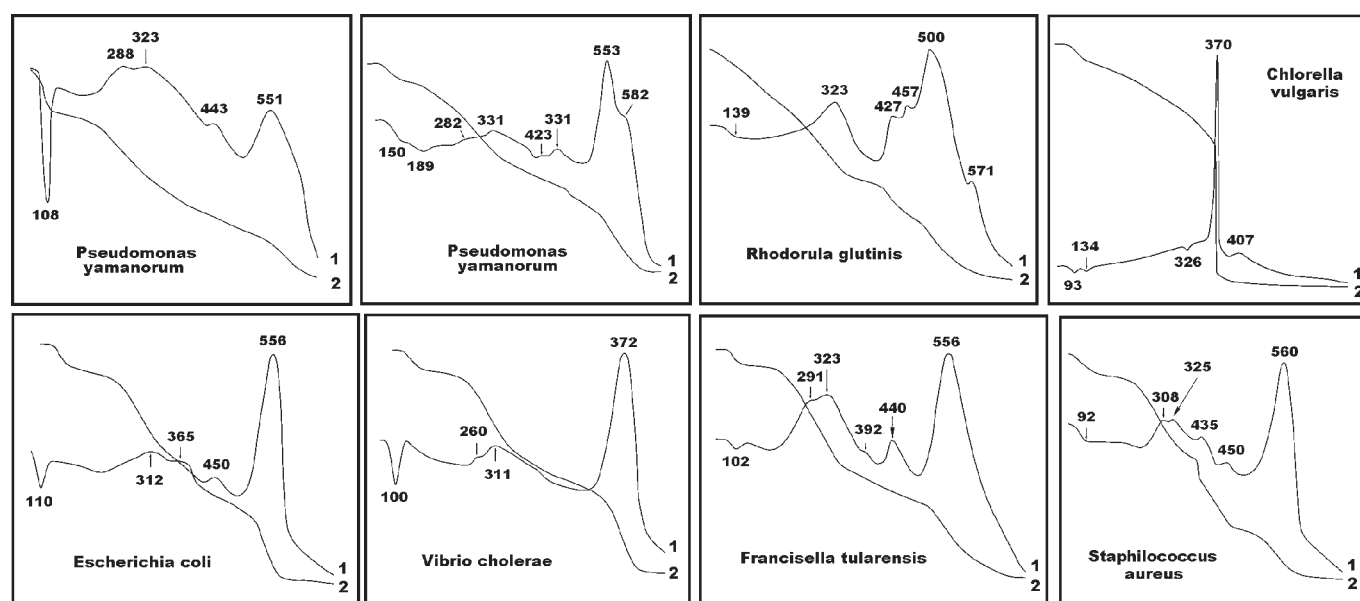


Рис. 15. Типичные кривые нагревания (1) и потери веса (2), полученные в ходе термического анализа микроорганизмов

Fig. 15. Typical curves of heating (1) and weight loss (2) obtained during thermal analysis of microorganisms





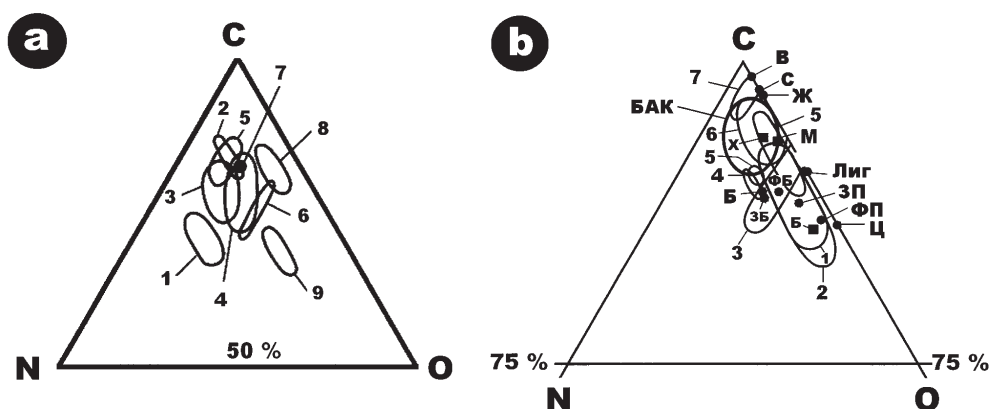
Таблица 4. Элементный состав исследованных микроорганизмов, мас. %

Table 4. Elemental composition of the studied microorganisms, wt. %

| Образец / Sample                                                                    | C                  | N                 | O                  | N/C              |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-------------------|--------------------|------------------|
| БАК-1 <i>Pseudomonas yamanorum</i> sp.                                              | 60.40              | 20.73             | 18.87              | 0.34             |
| «                                                                                   | 67.0               | 24.24             | 8.71               | 0.36             |
| БАК-2 <i>Pseudomonas yamanorum</i> sp.                                              | 82.50              | 11.11             | 6.39               | 0.13             |
| «                                                                                   | 75.89              | 11.86             | 12.25              | 0.16             |
| Среднее ± СКО (коэффициент вариации, %)<br>Average ± RMS (variation coefficient, %) | 71.45 ± 9.72 (14)  | 16.99 ± 6.52 (38) | 11.56 ± 5.44 (47)  | 0.25 ± 0.12 (48) |
| ДРЖ-1 <i>Rhodorula glutinis</i>                                                     | 83.35              | 2.21              | 14.44              | 0.03             |
| «                                                                                   | 73.05              | 5.58              | 21.37              | 0.08             |
| «                                                                                   | 67.98              | 5.92              | 26.10              | 0.09             |
| «                                                                                   | 74.45              | 5.99              | 19.56              | 0.08             |
| ДРЖ-2 <i>Rhodorula glutinis</i>                                                     | 81.91              | 4.30              | 13.19              | 0.05             |
| «                                                                                   | 73.42              | 6.26              | 20.32              | 0.08             |
| «                                                                                   | 85.37              | 4.16              | 10.47              | 0.05             |
| «                                                                                   | 55.19              | 12.25             | 28.56              | 0.22             |
| «                                                                                   | 65.50              | 11.20             | 23.30              | 0.17             |
| Среднее ± СКО / Average ± RMS                                                       | 73.36 ± 9.61 (13)  | 6.43 ± 3.27(51)   | 19.7 ± 6.03 (31)   | 0.09 ± 0.06 (67) |
| МВД-1 <i>Chlorella vulgaris</i>                                                     | 64.49              | 16.30             | 19.21              | 0.25             |
| «                                                                                   | 72.12              | 8.02              | 19.86              | 0.19             |
| МВД-2 <i>Chlorella vulgaris</i>                                                     | 41.43              | 6.94              | 51.63              | 0.17             |
| «                                                                                   | 92.47              | 4.15              | 3.38               | 0.04             |
| Среднее ± СКО / Average ± RMS                                                       | 67.63 ± 21.08 (31) | 8.85 ± 5.23 (59)  | 23.52 ± 20.23 (86) | 0.16 ± 0.09 (56) |
| ПЧИ-1 <i>Escherichia coli</i>                                                       | 78.01              | 13.76             | 8.23               | 0.18             |
| «                                                                                   | 66.08              | 18.78             | 15.14              | 0.28             |
| Среднее ± СКО (коэффициент вариации, %)<br>Average ± RMS (variation coefficient, %) | 72.05 ± 8.44(12)   | 16.27 ± 3.55 (22) | 11.68 ± 4.89 (42)  | 0.23 ± 0.07 (30) |
| ПЧИ-2 <i>Vibrio Cholerae</i> 0139                                                   | 84.22              | 10.82             | 4.96               | 0.13             |
| «                                                                                   | 78.54              | 14.17             | 7.29               | 0.18             |
| «                                                                                   | 70.47              | 18.14             | 11.39              | 0.26             |
| «                                                                                   | 81.73              | 10.26             | 8.01               | 0.13             |
| «                                                                                   | 84.44              | 9.28              | 6.28               | 0.11             |
| «                                                                                   | 80.08              | 13.14             | 6.78               | 0.16             |
| ПЧИ-3 <i>Vibrio Cholerae</i> 0139                                                   | 78.22              | 12.11             | 9.67               | 0.15             |
| «                                                                                   | 79.31              | 14.69             | 6.00               | 0.19             |
| ПЧИ-4 <i>Vibrio Cholerae</i> Eltor                                                  | 74.42              | 14.37             | 11.21              | 0.19             |
| «                                                                                   | 72.43              | 19.22             | 8.35               | 0.27             |
| ПЧИ-5 <i>Vibrio Cholerae</i> Eltor                                                  | 71.43              | 15.87             | 12.70              | 0.22             |
| Среднее ± СКО (коэффициент вариации, %)<br>Average ± RMS (variation coefficient, %) | 77.75 ± 4.94(6)    | 13.82 ± 3.14 (23) | 8.42 ± 2.51 (30)   | 0.18 ± 0.05 (28) |
| ПЧИ-6 <i>Francisella tularensis</i>                                                 | 62.15              | 19.09             | 18.76              | 0.31             |
| «                                                                                   | 77.74              | 10.27             | 11.99              | 0.13             |
| «                                                                                   | 53.78              | 24.59             | 21.63              | 0.46             |
| «                                                                                   | 70.27              | 13.31             | 16.42              | 0.19             |
| «                                                                                   | 86.74              | 6.24              | 7.02               | 0.07             |
| ПЧИ-7 <i>Francisella tularensis</i>                                                 | 69.50              | 15.42             | 15.08              | 0.22             |
| Среднее ± СКО (коэффициент вариации, %)<br>Average ± RMS (variation coefficient, %) | 70.03 ± 11.53 (16) | 14.85 ± 6.49 (44) | 15.15 ± 5.15 (342) | 0.23 ± 0.14 (61) |
| ПЧИ-8 <i>Staphylococcus aureus</i>                                                  | 76.96              | 11.82             | 11.22              | 0.15             |

детельствует положение поля их состава в промежулке между областями состава собственно белков и жиров. Во-вторых, исследованные бактерии заметно обогащены углеродом по сравнению с морскими бентосными и планктонными микроорганизмами. В-третьих, исследованные микроорганизмы своей значительной азотистостью принципиально отличаются от восков, смол, лигнинов, целлюлоз. В-четвертых, исследованные образцы по элементному составу контрастно отличаются от абиогенных органоидов, выявленных в продуктах современного вулканизма [31], но при этом сближаются с углеродистым веществом в некоторых метеоритах [44].

Молекулярный состав микроорганизмов анализировался ИК-спектроскопическим методом. В результате этого в спектрах ИК-поглощения исследованных образцов было зарегистрировано 38 полос (табл. 5), включая 27 полос в средней ИК-области (400—4000 см<sup>-1</sup>) и 11 полос в ближней (4000—14000 см<sup>-1</sup>). Проведенный анализ показал, что по спектроскопическим данным в составе микроорганизмов присутствуют до 8 функциональных групп (в скобках число ИК-полос в %): алифатических (31.7), аминов (24.4), ароматических (12.2), гидроксильных (12.2), карбонильных (9.8), фенольных (2.4), алленовых (2.4), простых эфиров (2.4).



**Рис. 16.** Элементный состав органического вещества в исследованных микроорганизмах и ряда эталонных углеродных веществ. Поля и точки на **a**: 1, 2 — псевдомонады; 3 — кишечная палочка; 4 — туляремиальный микроб; 5 — холерный вибрион; 6 — хлорелла; 7 — золотистый стафилококк; 8, 9 — дрожжи. Поля и точка на **b**: БАК — исследованные микроорганизмы; В — воски; С — смолы; Ж — жиры + углеводы; Б — белки; Лиг — лигнин; Ц — целлюлоза; ЗП — зоопланктон; ФП — фитопланктон; ЗБ — зообентос; ФБ — фитобентос; 1–7 — частицы и нитевидные формы абиогенных органоидов в продуктах современного вулканизма; М, Х, Б — углеродное вещество в метеоритах Мокоя, Харипура, Коккевельд

**Fig. 16.** Elemental composition of organic matter in the studied microorganisms and a number of reference carbon substances. Fields and points on **a**: 1, 2 — pseudomonads; 3 — *Escherichia coli*; 4 — tularemia microbe; 5 — *Vibrio cholerae*; 6 — chlorella; 7 — *Staphylococcus aureus*; 8, 9 — yeast. Fields and point on **b**: БАК — investigated microorganisms; В — waxes; С — resin; Ж — fats + carbohydrates; Б — proteins; Лиг — lignin; Ц — cellulose; ЗП — zooplankton; ФП — phytoplankton; ЗБ — zoobenthos; ФБ — phytobenthos; 1–7 — particles and filamentous forms of abiogenic organelles in the products of modern volcanism; М, Х, Б — carbon matter in the Mokoia, Haripura, Kokkeveld meteorites

**Таблица 5.** Основные полосы ИК-поглощения в микроорганизмах

**Table 5.** Main IR absorption bands in microorganisms

| Положение максимумов, см <sup>-1</sup><br>Position of maxima, cm <sup>-1</sup> | Интерпретация<br>Interpretation                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Привязка к функциональным группам<br>Linking to functional groups | Обозначения на графиках (рис. 1, 2)<br>Legend on the graphs (Fig. 1, 2) |
|--------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| 614                                                                            | Деформационные колебания химических связей C–H<br>Bending vibrations of C–H chemical bonds                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Ароматические<br>Aromatic                                         | АР                                                                      |
| 600–700                                                                        | Внеплоскостные колебания химических связей C–C<br>Out-of-plane vibrations of C–C chemical bonds                                                                                                                                                                                                                                                                                           | «                                                                 | «                                                                       |
| 890                                                                            | Деформационные колебания химических связей C–H<br>Bending vibrations of C–H chemical bonds                                                                                                                                                                                                                                                                                                | «                                                                 | «                                                                       |
| 700–1360                                                                       | Деформационные колебания химических связей в полимерных цепях<br>–CH <sub>2</sub> =CH <sub>2</sub> =CH <sub>2</sub> – и –CH <sub>2</sub> –CH <sub>3</sub> –CH <sub>3</sub> –CH <sub>2</sub> –<br>Bending vibrations of chemical bonds in polymer chains<br>–CH <sub>2</sub> =CH <sub>2</sub> =CH <sub>2</sub> – and –CH <sub>2</sub> –CH <sub>3</sub> –CH <sub>3</sub> –CH <sub>2</sub> – | Алифатические<br>Aliphatic                                        | АЛ                                                                      |
| 980–990                                                                        | Внеплоскостные колебания ОН-ионов в карбоновых кислотах<br>Out-of-plane vibrations of OH-ions in carboxylic acids                                                                                                                                                                                                                                                                         | Фенольные гидроксилы или спирты<br>Phenolic hydroxyls or alcohols | Ф                                                                       |
| 1000–1055                                                                      | Валентные колебания химических связей C–O и C–C в скелете молекул углеводов<br>Stretching vibrations of C–O and C–C chemical bonds in the skeleton of carbohydrate molecules                                                                                                                                                                                                              | «                                                                 | «                                                                       |
| 1123                                                                           | Валентные колебания связей C–O–C<br>Stretching vibrations of C–O–C bonds                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Алифатические<br>Aliphatic                                        | АЛ                                                                      |
| 1140–1160                                                                      | Валентные колебания C–O или деформационные колебания ОН-ионов<br>Stretching vibrations of C–O or bending vibrations of OH-ions                                                                                                                                                                                                                                                            | Простые эфиры или спирты<br>Ethers or alcohols                    | Э                                                                       |
| 1116–1164                                                                      | Валентные колебания химических связей C=O<br>Stretching vibrations of chemical bonds C=O                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Карбонильные<br>Carbonyl                                          | К                                                                       |



| Положение максимумов, см <sup>-1</sup><br>Position of maxima, cm <sup>-1</sup> | Интерпретация<br>Interpretation                                                                                                                                                                                                   | Привязка к функциональным группам<br>Linking to functional groups | Обозначения на графиках (рис. 1, 2)<br>Legend on the graphs (Fig. 1, 2) |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| 1240                                                                           | Деформационные колебания химических связей CH <sub>2</sub> в цепочках CH <sub>2</sub> (OH)–CO–CH <sub>2</sub> (OH)<br>Bending vibrations of CH <sub>2</sub> chemical bonds in CH <sub>2</sub> (OH)–CO–CH <sub>2</sub> (OH) chains | Алифатические<br>Aliphatic                                        | АЛ                                                                      |
| 1250–1279                                                                      | Валентные колебания химических связей C–O<br>Stretching vibrations of C–O chemical bonds                                                                                                                                          | Карбонильные<br>Carbonyl                                          | К                                                                       |
| 1327–1370                                                                      | Деформационные колебания OH-ионов в цепочках CH <sub>2</sub> (OH)–CO–CH <sub>2</sub> (OH)<br>Bending vibrations of OH ions in CH <sub>2</sub> (OH)–CO–CH <sub>2</sub> (OH) chains                                                 | Алифатические<br>Aliphatic                                        | АЛ                                                                      |
| 1300–1440                                                                      | Деформационные колебания химических связей CH <sub>2</sub> и CH <sub>3</sub><br>Bending vibrations of CH <sub>2</sub> and CH <sub>3</sub> chemical bonds                                                                          | «                                                                 | «                                                                       |
| 1550–1570                                                                      | Деформационные колебания химических связей NH<br>Bending vibrations of chemical bonds NH                                                                                                                                          | Группа аминов –амид II<br>Amine group – amide II                  | АМ                                                                      |
| 1590–1600                                                                      | Плоскостные колебания скелета C=C<br>In plane vibrations of the skeleton C=C                                                                                                                                                      | Ароматические<br>Aromatic                                         | АР                                                                      |
| 1620                                                                           | Деформационные колебания химических связей в молекулах H <sub>2</sub> O<br>Bending vibrations of chemical bonds in H <sub>2</sub> O molecules                                                                                     | Гидроксильные<br>Hydroxyl                                         | Г                                                                       |
| 1630–1640                                                                      | Деформационные колебания химических связей CO–OH<br>Bending vibrations of CO–OH chemical bonds                                                                                                                                    | Группа аминов – амид I<br>Amine group – amide I                   | АМ                                                                      |
| 1654                                                                           | Валентные колебания химических связей C=O<br>Stretching vibrations of chemical bonds C=O                                                                                                                                          | Карбонильные<br>Carbonyl                                          | К                                                                       |
| 1700–1800                                                                      | Валентные колебания C=O<br>Stretching vibrations C=O                                                                                                                                                                              | «                                                                 | «                                                                       |
| 2100–2300                                                                      | Валентные колебания химических связей C=C=C, NH=C=O или тройных связей C≡C, C≡N<br>Stretching vibrations of chemical bonds C=C=C, NH=C=O or triple bonds C≡C, C≡N                                                                 | Алленовые<br>Allenic                                              | АЛЛ                                                                     |
| 2130–2360                                                                      | Валентные колебания химических связей в группах CH и CH <sub>2</sub><br>Stretching vibrations of chemical bonds in CH and CH <sub>2</sub> groups                                                                                  | Алифатические<br>Aliphatic                                        | АЛ                                                                      |
| 2400–245                                                                       | Колебания связанной группы –NH при образовании водородной связи NH...O=C<br>Vibrations of the bound –NH group during the formation of the NH... O=C hydrogen bond                                                                 | Группа аминов<br>Amine group                                      | АМ                                                                      |
| 2800–2950                                                                      | Валентные колебания химических связей в CH <sub>2</sub> и CH <sub>3</sub><br>Stretching vibrations of chemical bonds in CH <sub>2</sub> and CH <sub>3</sub>                                                                       | Алифатические<br>Aliphatic                                        | АЛ                                                                      |
| 3000–3500                                                                      | Валентные колебания химических связей в NH и OH<br>Stretching vibrations of chemical bonds in NH and OH                                                                                                                           | Группы аминов – амиды I и II<br>Amine groups – amide I and II     | АМ                                                                      |
| 3200–3400                                                                      | Валентные колебания гидроксил-ионов, участвующих в межмолекулярных и внутримолекулярных водородных связях<br>Stretching vibrations of hydroxyl ions involved in intermolecular and intramolecular hydrogen bonds                  | Гидроксильные<br>Hydroxyl                                         | Г                                                                       |
| 3255                                                                           | Валентные колебания связанной группы –NH<br>Stretching vibrations of a bound group –NH                                                                                                                                            | Группа аминов<br>Amine group                                      | АМ                                                                      |
| 3584                                                                           | Валентные колебания свободных групп –NH или колебания внутримолекулярных OH-ионов<br>Stretching vibrations of free groups –NH or vibrations of intramolecular OH-ions                                                             | Группы аминов и гидроксил-ионы<br>Amine groups and hydroxyl-ions  | АМ + Г                                                                  |
| 4012–4053                                                                      | Составные колебания химических связей –CH<br>Compound vibrations of chemical bonds –CH                                                                                                                                            | Алифатические<br>Aliphatic                                        | АЛ                                                                      |
| 4160–4380                                                                      | Составные колебания химических связей –CH <sub>2</sub><br>Compound vibrations of chemical bonds –CH <sub>2</sub>                                                                                                                  | «                                                                 | «                                                                       |





Окончание таблицы 5 / End of table 5

| Положение максимумов, $\text{cm}^{-1}$<br>Position of maxima, $\text{cm}^{-1}$ | Интерпретация<br>Interpretation                                                                                                         | Привязка к функциональным группам<br>Linking to functional groups | Обозначения на графиках (рис. 1, 2)<br>Legend on the graphs (Fig. 1, 2) |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| 4530–4580                                                                      | Составные колебания химических связей C–O–C в эфирах<br>Compound vibrations of C–O–C chemical bonds in ethers                           | «                                                                 | «                                                                       |
| 4600–4660                                                                      | Составные колебания химических связей –CH, –C–C, –NH <sub>2</sub><br>Composite vibrations of chemical bonds –CH, –C–C, –NH <sub>2</sub> | Алифатические группы и амины<br>Aliphatic groups and amines       | АЛ + АМ                                                                 |
| 4670–4750                                                                      | Составные колебания гидроксил-ионов<br>Composite vibrations of hydroxyl ions                                                            | Гидроксильные группы<br>Hydroxyl groups                           | Г                                                                       |
| 5000–6250                                                                      | Область первых обертонов –CH, –C–C, –CH <sub>2</sub> , –NH<br>The region of the first overtones –CH, –C–C, –CH <sub>2</sub> , –NH       | Алифатические группы и амины<br>Aliphatic groups and amines       | АЛ + АМ                                                                 |
| 6000–6060                                                                      | Обертоны колебаний химических связей –CH<br>Overtones of vibrations of chemical bonds –CH                                               | Ароматические<br>Aromatic                                         | АР                                                                      |
| 6300–6700                                                                      | Область вторых обертонов –CH, –C–C, –CH <sub>2</sub> , –NH<br>Second overtones region –CH, –C–C, –CH <sub>2</sub> , –NH                 | Алифатические группы и амины<br>Aliphatic groups and amines       | АЛ + АМ                                                                 |
| 6571–6888                                                                      | Обертоны колебаний химических связей –NH <sub>2</sub><br>Overtones of vibrations of chemical bonds –NH <sub>2</sub>                     | Группа аминов<br>Amine group                                      | АМ                                                                      |
| 6100–6166 и 6890–7050                                                          | Обертоны колебаний гидроксильных ионов<br>Overtones of vibrations of hydroxyl ions                                                      | Гидроксильные<br>Hydroxyl                                         | Г                                                                       |

Наиболее сильное и дифференцированное поглощение проявилось в ближней ИК-области (рис. 17, 18). Выявленная картина оказалась для исследованных микроорганизмов однообразной. Во всех полученных спектрах область ИК-поглощения распадается на две части: 1) 3500–5500  $\text{cm}^{-1}$ , где регистрируются уширенные полосы алифатических и гидроксильных групп, и 2) 6000–7000  $\text{cm}^{-1}$ , где комбинируются более узкие и

хорошо дифференцированные полосы алифатических, ароматических групп и аминов.

Непосредственный анализ аминокислотного состава микроорганизмов осуществлялся методом газовой хроматографии. Для этого образцы подвергались гидролизу в 6М-соляной кислоте в течение 12 часов при температуре 105 °С. К полученному гидролизату добавлялся внутренний стандарт – L-норвалин. Очистка

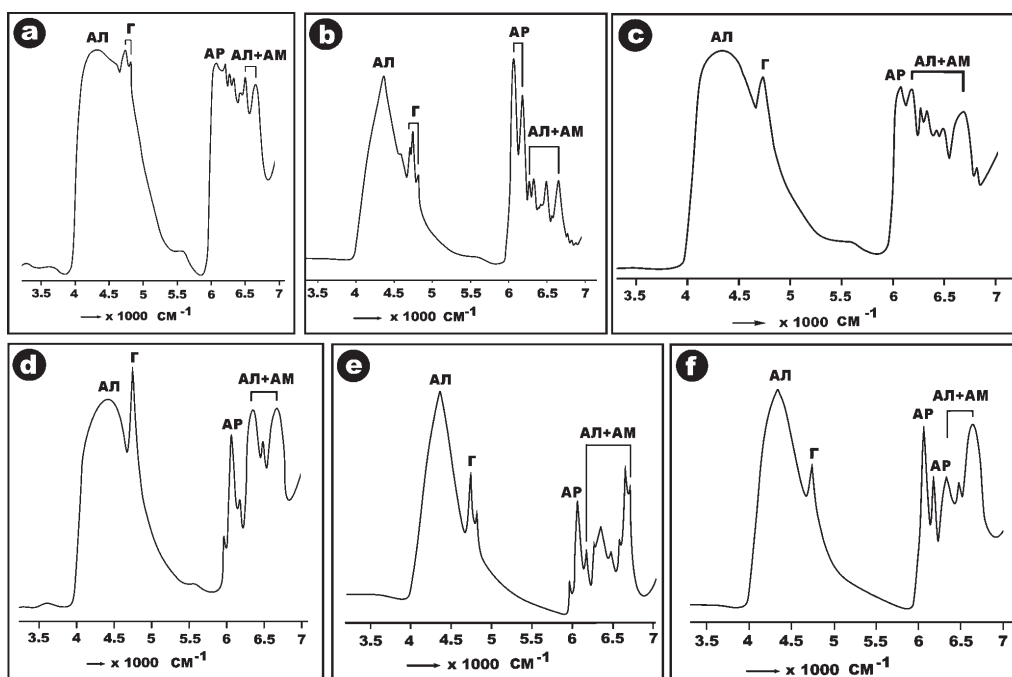
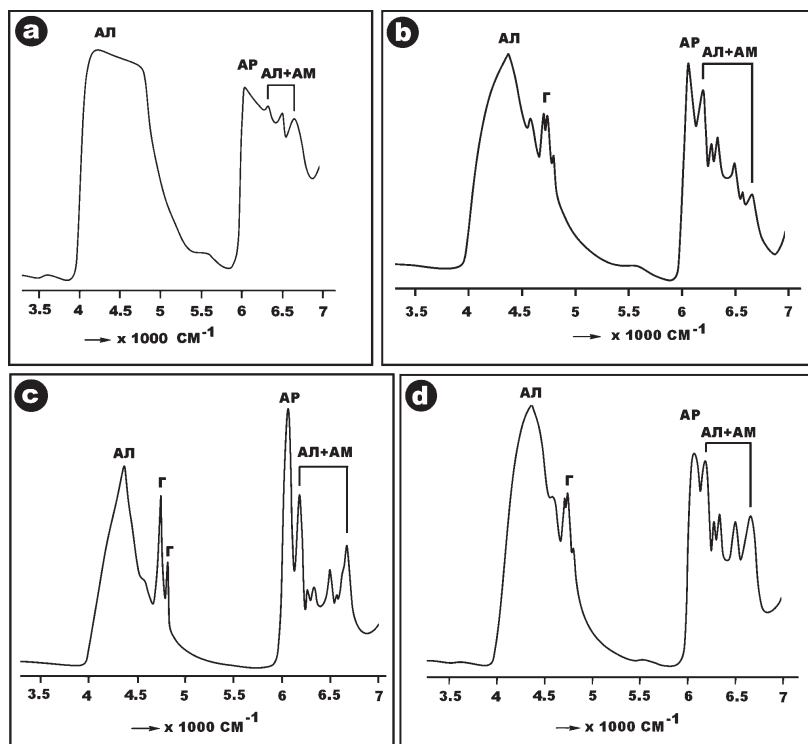


Рис. 17. Спектры поглощения в ближней ИК-области: а–с — псевдомонады; d, e — дрожжи; f — хлорелла

Fig. 17. Absorption spectra in the near infrared region: a–c — pseudomonads; d, e — yeast; f — chlorella

**Рис. 18.** Спектры поглощения в ближней ИК-области: а — кишечная палочка, б — холерный вибрион, с — туляремиальный микроб, д — золотистый стафилококк

**Fig. 18.** Absorption spectra in the near infrared region: а — *Escherichia coli*, б — *cholera vibrio*, с — *tularemia microbe*, д — *Staphylococcus aureus*



растворов проводилась в колонке, заполненной сорбентом-катионообменником Dowex 50W X8. Элюирование аминокислот осуществлялось 2.5М-гидроксидом аммония. Высушенные препараты перерастворялись в 0.1М-соляной кислоте, замораживались, высушивались и этерифицировались пентафторпропионовым ангидритом при температуре 110 °С. Полученные изо-пропиловые эфиры аминокислот растворяли в дихлорметане и отправляли на хроматографический анализ. Все используемые реагенты имели высокую степень чистоты (производство фирмы Aldrich-Fluka). Для разделения L- и D-энантиомеров использовалась капиллярная колонка Chirasil-L-Val длиной 25 м и внутренним диаметром 0.25 мм. В качестве газа-носителя применялся гелий. Температура испарителя составляла 250 °С, температура пламенно-ионизационного детектора — 275 °С. Анализ производился в течение 4 мин в изотермическом режиме при 90 °С, затем температура повышалась со скоростью 2 °С/мин до 210 °С. Полная длительность анализа составляла 70 мин. Обработка и запись хроматограмм осуществлялась с использованием программы GC Solution. Используемая методика не позволяет определять некоторые аминокислоты, а именно аргинин, гистидин, цистеин и триптофан, для анализа которых требуются индивидуальные условия дериватизации.

В результате проведенных исследований в микроорганизмах выявлено 14 аминокислот, распределившихся по семи группам (табл. 6): алифатической (5 аминокислот), ароматической (2), основной (1), кислой (2), гидроксильной (2), имино (1), серусодержащей (1). Половина аминокислот — аланин, валин, лейцин, тирозин, лизин, глутаминовая и аспарагиновая кислоты — представлена обоими энантиомерами, левым и правым, переходы между которыми являются одним из фундаментальных признаков органических веществ биогенного происхождения [20, 48]. В большинстве проанализированных бактерий степень рацемизации (D/L) колеблется в пределах 0.01–0.12 и только в золотистом стафилококке увеличивается до 0.37, составляя в среднем  $0.17 \pm 0.16$ . Полученные данные вполне соответствуют прижизненным параметрам организмов — для них характерны L-формы, но D-формы в незначительном количестве тоже образуются в стенках бактерий. Однако и в таких обстоятельствах обращает на себя внимание явно повышенное содержание правых

энантиомеров в золотистом стафилококке, что может иметь отношение к нетождественности свойств грамотрицательных и грамположительных бактерий. Важно также отметить, что в дрожжах и хлорелле признаков рацемизации аминокислот мы не обнаружили.

Валовое содержание аминокислот в исследованных бактериях варьируется в пределах от 409 до 942 мг/г, составляя в среднем  $682 \pm 221$  мг/г и возрастающая в последовательности: псевдомонады < туляремиальный микроб < кишечная палочка < холерный вибрион < золотистый стафилококк. Таким образом, обнаруживается, что грамположительная бактерия по валовому содержанию аминокислот заметно преобладает над грамотрицательными бактериями. Что же касается дрожжей и хлореллы, то в них содержание аминокислот уступает таковому в бактериях соответственно в 5–25 раз.

Определенный интерес представляет сравнение исследованных микроорганизмов по валовому содержанию аминокислот с органическими веществами разного происхождения. Так, в человеческих конкрементах — желчных, мочевых, фосфатных, оксалатных, зубных и слюнных камнях [1, 9, 16] — суммарное содержание аминокислот уступает таковому в исследованных нами микроорганизмах в 25–95 раз. В коллагене ископаемых костей и сохранившихся мягких тканях, коже и волосах плейстоцен-голоценовых млекопитающих среднее валовое содержание аминокислот колеблется в пределах 504–842 мг/г, что довольно близко к таковому в исследованных микроорганизмах. В современных морских осадках содержится в 50 раз меньше аминокислот [4], в торфах и углях содержание аминокислот меньше бактериального в 86 раз [3], в ископаемых смолах уступает в 3000 раз [40], в твердых битумах — в 2500 раз [37], а в реликтовом органическом веществе раннепалеозойских брахиопод содержание аминокислот меньше в 6500–7000 раз [36]. Как можно предполагать, выявленные различия обусловлены, во-первых, содержанием в сопоставляемых органических веще-

Таблица 6. Аминокислотный состав исследованных микроорганизмов

Table 6. Amino acid composition of the studied microorganisms

| Аминокислоты / Amino acids                          | БАК-1  |       | БАК-2  |       | ДРЖ    |       | МВД    |       | ПЧИ-1  |       | ПЧИ-2, 3, 4 |       | ПЧИ-6, 7 |       | ПЧИ-8  |      |
|-----------------------------------------------------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|-------------|-------|----------|-------|--------|------|
|                                                     | мг/г   | %     | мг/г   | %     | мг/г   | %     | мг/г   | %     | мг/г   | %     | мг/г        | %     | мг/г     | %     | мг/г   | %    |
| Глицин Gly / Glycine                                | 32.79  | 8     | 24.41  | 5.49  | 8.47   | 6.22  | 0.59   | 1.99  | 46.94  | 5.72  | 43.76       | 5.23  | 32.01    | 5.05  | 93.69  | 9.9  |
| L-Аланин Ala / L-Alanine                            | 44.47  | 10.85 | 36.82  | 8.28  | 15.98  | 11.74 | 1.32   | 4.46  | 72.21  | 8.79  | 70.19       | 8.39  | 42.64    | 6.72  | 61.18  | 6.5  |
| D-Аланин / D-Alanine                                | 1.1    | 0.27  | 1.08   | 0.24  | 0      | 0     | 0      | 0     | 3.43   | 0.42  | 3.17        | 0.38  | 2.47     | 0.39  | 22.9   | 2.4  |
| L-Валин Val / L-Valine                              | 13.71  | 3.35  | 25.41  | 5.71  | 7.5    | 5.51  | 0.48   | 1.62  | 48.82  | 5.95  | 49.55       | 5.92  | 36.59    | 5.77  | 42.6   | 4.5  |
| D-Валин / D-Valine                                  | 0      | 0     | 0      | 0     | 0      | 0     | 0      | 0     | 0      | 0     | 5.26        | 0.63  | 0        | 0     | 3.08   | 0.3  |
| L-Лейцин Leu / L-Leucine                            | 44.94  | 10.97 | 44.73  | 10.05 | 13.13  | 9.64  | 0.83   | 2.82  | 88.12  | 10.73 | 93.49       | 11.17 | 58.31    | 9.19  | 63.66  | 6.8  |
| D-Лейцин / D-Leucine                                | 0.59   | 0.14  | 0.53   | 0.12  | 0      | 0     | 0      | 0     | 1.17   | 0.14  | 1.31        | 0.16  | 1.08     | 0.17  | 1.13   | 0.1  |
| L-Изолейцин Ile / L-Isoleucine                      | 8.63   | 2.11  | 18.28  | 4.11  | 4.49   | 3.3   | 0      | 0     | 42.73  | 5.2   | 43.01       | 5.14  | 43.94    | 6.92  | 46.37  | 4.9  |
| <b>Алифатические АК / Aliphatic AA</b>              | 146.23 | 35.69 | 151.26 | 34.0  | 49.57  | 36.41 | 3.22   | 10.89 | 303.42 | 36.95 | 309.74      | 37.02 | 217.04   | 34.21 | 334.0  | 35.4 |
| L-Фенилаланин Phe / L-Phenylalanine                 | 24.8   | 6.05  | 24.44  | 5.49  | 6.59   | 4.84  | 0.46   | 1.56  | 44.23  | 5.39  | 48.94       | 5.85  | 32.43    | 5.11  | 36.55  | 3.9  |
| L-Тирозин Tyr / L-Thyrazine                         | 41.22  | 10.06 | 50.06  | 11.24 | 4.0    | 2.93  | 12.85  | 43.49 | 94.43  | 11.5  | 113.22      | 13.52 | 60.47    | 9.53  | 76.53  | 8.1  |
| D-Тирозин / D-Thirazine                             | 0      | 0     | 0      | 0     | 0      | 0     | 0      | 0     | 0      | 0     | 0           | 0     | 0        | 0     | 4.67   | 0.5  |
| <b>Ароматические АК / Aromatic AA</b>               | 66.02  | 16.11 | 74.5   | 16.74 | 10.59  | 7.77  | 13.31  | 45.05 | 138.66 | 16.89 | 162.16      | 19.38 | 92.9     | 14.64 | 117.75 | 12.5 |
| L-Лизин Lys / L-Lysine                              | 33.3   | 8.13  | 32.07  | 7.21  | 17.41  | 12.79 | 1.46   | 4.96  | 59.6   | 7.26  | 51.78       | 6.19  | 62.03    | 9.78  | 127.42 | 13.6 |
| D-Лизин / D-Lysine                                  | 0      | 0     | 0      | 0     | 0      | 0     | 0      | 0     | 0      | 0     | 0           | 0     | 0        | 0     | 2.36   | 0.3  |
| <b>Основные АК / Basic AA</b>                       | 33.3   | 8.13  | 32.07  | 7.21  | 17.41  | 12.79 | 1.46   | 4.96  | 59.6   | 7.26  | 51.78       | 6.19  | 62.03    | 9.78  | 129.78 | 13.9 |
| L-Глутаминовая кислота Glu<br>L-Glutamic acid       | 54.43  | 13.28 | 53.31  | 12.0  | 17.51  | 12.86 | 0.63   | 2.13  | 97.52  | 11.88 | 101.64      | 12.14 | 71.34    | 11.24 | 101.27 | 10.7 |
| D-Глутаминовая кислота / D-Glutamic Acid            | 2.47   | 0.6   | 2.26   | 0.51  | 0      | 0     | 0      | 0     | 5.9    | 0.72  | 6.14        | 0.73  | 4.01     | 0.63  | 37.72  | 4.0  |
| L-Аспарагиновая кислота Asp / L-Aspartic            | 31.77  | 7.75  | 41.31  | 9.29  | 13.22  | 9.71  | 0.43   | 1.47  | 81.32  | 9.9   | 74.53       | 8.9   | 69.16    | 10.9  | 71.48  | 7.6  |
| D-Аспарагиновая кислота / D-Aspartic                | 1.19   | 0.29  | 1.55   | 0.35  | 0      | 0     | 0      | 0     | 3.51   | 0.43  | 9.34        | 1.12  | 8.38     | 1.32  | 19.91  | 2.1  |
| <b>Кислые АК / Acidic AA</b>                        | 89.86  | 21.92 | 98.43  | 22.15 | 30.73  | 22.57 | 246.39 | 25.23 | 183.83 | 21.82 | 163.14      | 27.68 | 152.89   | 24.09 | 230.38 | 24.3 |
| L-Серин Ser / L-Serine Ser                          | 26.02  | 6.35  | 29.63  | 6.66  | 10.59  | 7.78  | 0      | 0     | 45.43  | 5.53  | 33.76       | 4.03  | 36.63    | 5.77  | 36.43  | 3.9  |
| L-Треонин Thr / L-Threonine Thr                     | 18.36  | 4.48  | 27.84  | 6.26  | 8.46   | 6.21  | 0      | 0     | 48.32  | 5.88  | 54.42       | 6.5   | 34.57    | 5.45  | 48.01  | 5.1  |
| <b>Гидроксильные АК / Hydroxyl AA</b>               | 44.38  | 10.83 | 57.47  | 12.92 | 19.05  | 13.99 | 0      | 0     | 93.75  | 11.41 | 88.18       | 10.53 | 71.2     | 11.22 | 84.44  | 9.0  |
| L-Пролин Pro / L-Proline Pro                        | 29.89  | 7.3   | 24.43  | 5.49  | 8.81   | 6.47  | 7.93   | 26.86 | 36.52  | 4.45  | 33.51       | 4.0   | 23.94    | 3.77  | 31.37  | 3.3  |
| <b>Имино АК / Imino AA</b>                          | 29.89  | 7.3   | 24.43  | 5.49  | 8.81   | 6.47  | 7.93   | 26.86 | 36.52  | 4.45  | 33.51       | 4.0   | 23.94    | 3.77  | 31.37  | 3.3  |
| L-Метионин Met / L-Methionine                       | 0      | 0     | 6.67   | 1.5   | 0      | 0     | 2.55   | 8.63  | 0.89   | 0.11  | 0           | 0     | 14.44    | 2.28  | 14.11  | 1.5  |
| <b>Серусодержащие АК<br/>Sulfur-containing AA</b>   | 0      | 0     | 6.67   | 1.5   | 0      | 0     | 2.55   | 8.63  | 0.89   | 0.11  | 0           | 0     | 14.44    | 2.28  | 14.11  | 1.5  |
| <b>Суммарное содержание АК<br/>Total AA content</b> | 409.68 | 100   | 444.91 | 100   | 136.16 | 100   | 29.53  | 100   | 821.05 | 100   | 837.02      | 100   | 634.44   | 100   | 942.44 | 100  |



ствах белков, а во-вторых, степени фоссилизации органического вещества.

В этой связи большой интерес представляет тот факт, что в неизмененном органическом веществе абиогенного происхождения, например в конденсированных органоидах из эксплозивных продуктов современного наземного вулканизма [31] и в углеродизированных вулканических шлаках в зоне Срединного Атлантического хребта, содержание аминокислот меньше, чем в веществе исследованных бактерий, соответственно в 11 и 145–150 раз. И это при том, что общее содержание органического вещества в абиогениках мало уступает бактериальному. Выявленную диспропорцию можно, вероятно, расценивать как один из признаков принципиального различия органических веществ биогенного и абиогенного происхождения. В последних содержание аминокислот всегда на один-два порядка ниже.

Расчеты показали, что между большинством аминокислот в исследованных микроорганизмах реализуются лишь положительные корреляции (табл. 7). При этом значения коэффициентов парных корреляций между левыми энантиомерами варьируются в диапазоне 0.5–1, а между левыми и правыми снижаются до 0.3–0.5. Между правыми формами сила парной корреляции уменьшается еще больше. Все это, очевидно, объясняется разным содержанием энантиомеров в исследованных бактериях — левых гораздо больше, чем правых.

По относительному содержанию групп аминокислот исследованные микроорганизмы подразделяются на четыре типа. К первому типу относятся грамм-отрицательные бактерии (псевдомонады, кишечная палочка, холерный вибрион, туляремиальный микроб), для которых характерна следующая последовательность сокращения групповых содержаний: алифатические > кислые > ароматические > гидроксильные > основные > имино > серусодержащие. В грамм-положительном золотом стафилококке характерен второй тип последовательности, в которой на третье место вышла группа основных аминокислот: алифатические > кислые > основные > ароматические > гидроксильные > имино > серусодержащие. Третий тип последовательности аминокислот демонстрируют дрожжи: алифатические > кислые > гидроксильные > основные > ароматические > имино > серусодержащие. Наконец, четвертым, принципиально отличным типом последовательности аминокислот характеризуется хлорелла: имино > ароматические > кислые > алифатические > серусодержащие > основные > гидроксильные. Полученные нами данные хорошо согласуются с ранее опубликованными результатами исследований около 30 грамм-отрицательных и грамм-положительных бактерий [41, 43, 45, 47, 49–51].

В связи с обнаружением аминокислот в метеоритах и земном абиогенном органическом веществе вулканического происхождения представляет интерес сопоставление этих проявлений с изученными микроорганизмами. Примером метеорита с органическим веществом может служить углистый хондрит Оргей [44]. В нем аминокислоты по относительному содержанию выстраиваются в следующую последовательность: алифатические > гидроксильные > ароматические > кислые > серусодержащие. В случае углеродно-

го вещества в продуктах континентального и океанического вулканизма аналогичная последовательность имеет вид: кислые > имино > ароматические > алифатические > гидроксильные. Из представленных примеров видно, что в абиогенных органоидах на лидирующие места выходят аминокислоты из гидроксильной и имино групп, которые в составе биогенных микроорганизмов играют второстепенную роль.

### Изотопия углерода и азота

Определение изотопного состава углерода и азота в микроорганизмах производилось методом масс-спектрометрии в режиме постоянного потока гелия (CF-IRMS) на масс-спектрометре Delta V Advantage, соединенном через газовый коммутатор Conflo IV с элементным анализатором Flash EA 1112. В последнем происходило сжигание образцов при 1020 °C для получения CO<sub>2</sub> и при 680 °C для получения N<sub>2</sub>. Определение контролировалось анализом международного стандарта USGS-40 (Glutamic acid) и внутреннего стандарта Acetanilide (C<sub>8</sub>H<sub>9</sub>NO). Точность оценки изотопного состава составляла ± 0.15 ‰ (1σ). В качестве эталонов использовались PDB для углерода и Air (атмосферный воздух) для азота.

Согласно полученным данным (табл. 8), исследованные микроорганизмы заметно варьируются по изотопии как углерода, так и азота. Наиболее изотопно-тяжелым углеродом и относительно изотопно-легким азотом характеризуются дрожжи и хлорелла. Бактерии обнаружили статистически более легкий изотопный состав по углероду в сочетании со значительно более изотопно-тяжелым азотом. По изотопии углерода бактерии выстраиваются в следующую последовательность: туляремиальный микроб > кишечная палочка > золотистый стафилококк > псевдомонады > холерный вибрион. Аналогичная последовательность изменения изотопного состава азота имеет вид: кишечная палочка > золотистый стафилококк > холерный вибрион > псевдомонады > туляремиальный микроб. Из приведенных последовательностей следует, что изотопные составы углерода и азота в исследованных бактериях коррелируются обратно, т. е. по мере изотопного облегчения углерода азот изотопно утяжеляется. Коэффициент соответствующей парной корреляции составил –0.36. Следует подчеркнуть, что полученные нами данные хорошо согласуются с уже известной статистикой по современным микроорганизмам [42].

Значительный интерес представляет сопоставление по изотопному составу современных микроорганизмов с органическими веществами абиогенного происхождения. Соответствующий сравнительный анализ (рис. 19) показал, что микроорганизмы принципиально отличаются от абиогенных органоидов статистически более тяжелым изотопным составом как углерода, так и азота. В части углерода микроорганизмы характеризуются составом, колеблющимся в пределах –22 ...–14 ‰, а в части азота — от –0.28 до 9.62 ‰. В разнообразных абиогенных органических веществах, выявленных в продуктах современного вулканизма и метеоритах, углерод и азот по изотопному составу системно более легкие, находятся соответственно в пределах –31 ...–22 и –2.5 ...4 ‰.

**Таблица 7.** Коэффициенты парной корреляции содержаний аминокислот в составе исследованных микроорганизмов

**Table 7.** Coefficients of pair correlation of amino acid content in the composition of the studied microorganisms

|       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Gly   | 1    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| L-Ala | 0.77 | 1    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| D-Ala | 0.91 | 0.44 | 1    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| L-Val | 0.74 | 0.93 | 0.46 | 1    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| D-Val | 0.56 | 0.56 | 0.48 | 0.58 | 1    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| L-Leu | 0.67 | 0.98 | 0.32 | 0.96 | 0.57 | 1    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| D-Leu | 0.76 | 0.94 | 0.47 | 0.96 | 0.58 | 0.96 | 1    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| L-Ile | 0.77 | 0.85 | 0.56 | 0.96 | 0.54 | 0.88 | 0.95 | 1    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| L-Phe | 0.72 | 0.98 | 0.38 | 0.96 | 0.59 | 0.99 | 0.97 | 0.9  | 1    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| L-Tyr | 0.68 | 0.94 | 0.37 | 0.95 | 0.67 | 0.97 | 0.95 | 0.88 | 0.97 | 1    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| D-Tyr | 0.83 | 0.29 | 0.98 | 0.31 | 0.41 | 0.16 | 0.31 | 0.41 | 0.22 | 0.21 | 1    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| L-Lys | 0.97 | 0.7  | 0.91 | 0.73 | 0.49 | 0.62 | 0.75 | 0.82 | 0.67 | 0.62 | 0.83 | 1    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| D-Lys | 0.82 | 0.29 | 0.98 | 0.31 | 0.41 | 0.16 | 0.31 | 0.41 | 0.22 | 0.21 | 1    | 0.84 | 1    |      |      |      |      |      |      |      |      |
| L-Glu | 0.84 | 0.98 | 0.56 | 0.96 | 0.6  | 0.96 | 0.97 | 0.93 | 0.98 | 0.94 | 0.41 | 0.81 | 0.41 | 1    |      |      |      |      |      |      |      |
| D-Glu | 0.91 | 0.46 | 1    | 0.47 | 0.5  | 0.34 | 0.48 | 0.56 | 0.4  | 0.39 | 0.98 | 0.92 | 0.98 | 0.57 | 1    |      |      |      |      |      |      |
| L-Asp | 0.75 | 0.93 | 0.47 | 0.98 | 0.49 | 0.95 | 0.98 | 0.97 | 0.96 | 0.93 | 0.31 | 0.76 | 0.31 | 0.97 | 0.48 | 1    |      |      |      |      |      |
| D-Asp | 0.9  | 0.58 | 0.91 | 0.67 | 0.69 | 0.53 | 0.69 | 0.77 | 0.59 | 0.59 | 0.85 | 0.94 | 0.85 | 0.72 | 0.91 | 0.67 | 1    |      |      |      |      |
| L-Ser | 0.72 | 0.92 | 0.39 | 0.91 | 0.29 | 0.91 | 0.91 | 0.87 | 0.92 | 0.84 | 0.25 | 0.71 | 0.25 | 0.93 | 0.4  | 0.95 | 0.54 | 1    |      |      |      |
| L-Thr | 0.79 | 0.96 | 0.51 | 0.99 | 0.65 | 0.96 | 0.96 | 0.94 | 0.97 | 0.96 | 0.37 | 0.76 | 0.37 | 0.98 | 0.53 | 0.97 | 0.7  | 0.91 | 1    |      |      |
| L-Pro | 0.74 | 0.97 | 0.4  | 0.85 | 0.44 | 0.93 | 0.9  | 0.76 | 0.94 | 0.89 | 0.25 | 0.76 | 0.32 | 0.93 | 0.41 | 0.87 | 0.5  | 0.91 | 0.88 | 1    |      |
| L-Met | 0.5  | 0.11 | 0.61 | 0.31 | 0    | 0.11 | 0.35 | 0.51 | 0.18 | 0.13 | 0.6  | 0.66 | 0.6  | 0.3  | 0.6  | 0.38 | 0.68 | 0.34 | 0.28 | 0.11 | 1    |
| Сумма | 0.88 | 0.95 | 0.63 | 0.96 | 0.61 | 0.93 | 0.97 | 0.95 | 0.95 | 0.92 | 0.49 | 0.86 | 0.49 | 0.99 | 0.65 | 0.99 | 0.78 | 0.91 | 0.98 | 0.9  | 0.39 |

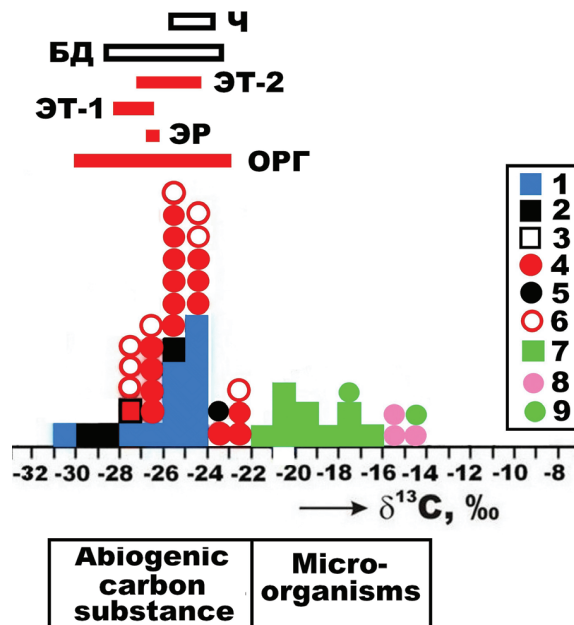
**Таблица 8.** Изотопный состав углерода и азота в органическом веществе исследованных микроорганизмов

**Table 8.** Isotopic composition of carbon and nitrogen in organic the substance of the investigated microorganisms

| № обр<br>Sample<br>No.                       | $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ | $\delta^{15}\text{N}_{\text{Air}}$ | Микро-<br>организмы<br>Microorganisms                 |
|----------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| БАК-1                                        | -21.8                              | 4.9                                | псевдомонады<br>pseudomonads                          |
| БАК-2                                        | -18.39                             | 8.9                                |                                                       |
| Среднее $\pm$<br>СКО<br>Average $\pm$<br>RMS | -20.09 $\pm$ 2.41                  | 6.9 $\pm$ 0.82                     |                                                       |
| ДРЖ-1                                        | -15.13                             | 0.65                               | дрожжи<br>yeast                                       |
| ДРЖ-2                                        | -14.94                             | 1.18                               |                                                       |
| «                                            | -15.81                             | 0.02                               |                                                       |
| Среднее $\pm$<br>СКО<br>Average $\pm$<br>RMS | -15.29 $\pm$ 0.46                  | 0.62 $\pm$ 0.58                    | хлорелла<br>chlorella                                 |
| МВД-1                                        | -14.48                             | 2.82                               |                                                       |
| МВД-2                                        | -17.91                             | 3.18                               |                                                       |
| Среднее $\pm$<br>СКО<br>Average $\pm$<br>RMS | -16.19 $\pm$ 2.43                  | 3 $\pm$ 0.25                       | кишечная<br>палочка<br>escherichia<br>coli            |
| ПЧИ-1                                        | -17.16                             | 11.01                              |                                                       |
| ПЧИ-2                                        | -20.09                             | 7.59                               |                                                       |
| ПЧИ-3                                        | -20.67                             | 7.22                               | холерный<br>вибрион<br>vibrio cholerae                |
| ПЧИ-4                                        | -19.46                             | 7.56                               |                                                       |
| ПЧИ-5                                        | -20.18                             | 7.89                               |                                                       |
| Среднее $\pm$<br>СКО<br>Average $\pm$<br>RMS | -20.1 $\pm$ 0.5                    | 7.56 $\pm$ 0.27                    | туляремиальный<br>микроб<br>tularemia<br>microbe      |
| ПЧИ-6                                        | -16.02                             | -0.28                              |                                                       |
| ПЧИ-7                                        | -17.22                             | 0.34                               |                                                       |
| Среднее $\pm$<br>СКО<br>Average $\pm$<br>RMS | -16.62 $\pm$ 0.85                  | 0.03 $\pm$ 0.44                    | золотистый<br>стафилококк<br>staphylococcus<br>aureus |
| ПЧИ-8                                        | -19.07                             | 9.62                               |                                                       |
| Среднее $\pm$<br>СКО<br>Average $\pm$<br>RMS | -19.0 $\pm$ 1.8                    | 6.48 $\pm$ 3.76                    |                                                       |

## Закключение

Исследованы 14 образцов грамотрицательных и грамположительных бактерий, одноклеточных дрожжей и зеленых микроводорослей с использованием комплекса методов оптической, атомно-силовой и аналитической сканирующей электронной микроскопии, термического анализа, газовой хроматографии, инфракрасной спектроскопии, масс-спектрометрии с ин-



**Рис. 19.** Изотопный состав углерода в исследованных микроорганизмах в сравнении с углеродными образованиями абиогенного происхождения: 1–6 — углеродные фазы и минералы в продуктах современного вулканизма на Камчатке и Курилах, соответственно дисперсно-рассеянное углеродное вещество в вулканиках, частицы шунгитоподобного вещества, частицы самородного алюминия с включениями углеродного вещества, алмазы, углеродные глобулы, карбиды [33]; 7–9 — исследованные микроорганизмы, соответственно бактерии, дрожжи и хлорелла. Рамками показаны диапазоны варьирования изотопного состава в вулканогенных органоидах с Камчатки — ОРГ, в углеродном веществе, рассеянном в вулканиках Эребуса — ЭР [34] и Этны — ЭТ-1 [32], в органоидах из тephры Этны — ЭТ-2 [32], в углеродном веществе из железного метеорита Большой Долгучан — БД [30] и хондрита Челябинск — Ч [35]

**Fig. 19.** The isotopic composition of carbon in the studied microorganisms in comparison with carbon formations of abiogenic origin: 1–6 — carbon phases and minerals in the products of modern volcanism in Kamchatka and the Kuriles, respectively, dispersed carbon matter in volcanic, particles of shungite-like matter, particles of native aluminum with carbon inclusions substances, diamonds, carbon globules, carbides [33]; 7–9 — investigated microorganisms, bacteria, yeast and chlorella, respectively. The frames show ranges of variation of the isotopic composition in volcanogenic organoids from Kamchatka — ORG, in carbon matter dispersed in the volcanic of Erebus — ER [34] and Etna — ET-1 [32], in organoids from Etna tephra — ET-2 [32], in carbon matter from the iron meteorite Bol'shoi Dolguchan — BD [30] and chondrite Chelyabinsk — Ch [35]

дуктивно-связанной плазмой и изотопной масс-спектрометрии.

Методом атомно-силовой микроскопии высокого разрешения определены форма и размеры клеток в колониях микроорганизмов. По форме клетки варьируются от палочковидных до чечевицеобразных и глобуло-коккообразных; по размеру колеблются от мезо-нанометровых до микрометровых. Между крайними





размерами клеток установлена сильная положительная корреляция, что более всего характерно именно для биологических объектов.

В химическом составе исследованных микроорганизмов обнаружена примесь неорганических химических элементов — Mg, Ca, Ba, Sr, Si, Na, K, Cu, Zn, P, S, Cl и субмикронные по размеру выделения минеральных фаз — карбонатов, фосфатсульфатов, гидрогенсульфатфосфатов, гидрогенфосфатов, галита, каолинита, металлических сплавов латунного состава, бадделеита.

В микроорганизмах установлены 45 микроэлементов, в том числе 7 эссенциальных, 17 физиогенно-активных и 19 абиотических (токсичных). Наибольшим разнообразием микроэлементов характеризуется грамположительный золотистый стафилококк — в его образце присутствуют все 14 лантаноидов. Суммарная концентрация микроэлементов в исследованных микроорганизмах колеблется в диапазоне 0.003—0.26 мас. %. Значение эссенциального коэффициента — Э/АБ (отношение групповых концентраций эссенциальных и абиотических элементов) составляет в среднем  $196 \pm 153$ , достигая максимума в дрожжах и минимума в грамположительном золотистом стафилококке.

Большинство исследованных микроорганизмов характеризуются близкими термическими свойствами, демонстрируя последовательное выгорание углеводно-жировой и белковой компонент органического вещества. Его смешанный жиробелковый состав подтверждается и данными элементного анализа. Выявлено, что наибольшей «белковостью» отличается грамположительный золотистый стафилококк. В целом проанализированные нами микроорганизмы по многим свойствам контрастно отличаются от абиогенных органоидов, выявленных в продуктах современного вулканизма.

В молекулярном составе микроорганизмов установлено до 8 функциональных групп — алифатических, аминов, ароматических, гидроксильных, карбонильных, фенольных, алленовых, простых эфиров. Эти группы распределяются по 14 выявленным аминокислотам, объединяющимся в 7 групп — алифатическую, ароматическую, основную, кислую, гидроксильную, имино и серусодержащую. До половины аминокислот представлены левым (L) и правым (D) энантиомерами. Степень рацемизации (D/L) колеблется в пределах 0.01—0.37, достигая максимума в грамположительном золотистом стафилококке. Суммарное содержание аминокислот в исследованных микроорганизмах колеблется от 409 до 942 ( $682 \pm 221$ ) мг/г, достигая максимума в грамположительном стафилококке. Это содержание в 11—150 раз превышает таковое в абиогенных органоидах.

По изотопному составу как углерода, так и азота микроорганизмы принципиально отличаются от абиогенных органических веществ в метеоритах и продуктах современного вулканизма. Наиболее изотопно-тяжелым составом углерода в сочетании с относительно изотопно-лёгким азотом характеризуются штаммы дрожжей *Rhodotorula glutinis* VKM Y-2998D и микроводорослей *Chlorella vulgaris* IPPAS C-2024. В бактериях установлен статистически более лёгкий углерод в сочетании со значительно более тяжелым азотом. При этом между изотопным составом углеро-

да и азота в бактериях выявляется значимая отрицательная связь.

Обобщая данные исследований, мы приходим к выводу о том, что по многим параметрам — степени «белковости» органического вещества, валовому микроэлементному составу, степени обогащения элементами-антибионтами, содержанию аминокислот и степени их рацемизации — грамтрицательные и грамположительные бактерии значительно различаются, что подтверждает представление о нетождественности свойств клеточных стенок [19].

Благодарим сотрудников Института биологии Коми НЦ УрО РАН — А. В. Гогонина, Е. М. Анчугу и сотрудников Ростовского-на-Дону противочумного института А. В. Тришина, М. В. Цимбалистова, О. С. Чемисова за подготовку и передачу на исследования образцов микроорганизмов. Выражаем также благодарность старшему научному сотруднику Института геологии и геохимии УрО РАН Н. В. Чердниченко и инженерам-исследователям Института геологии Коми НЦ УрО РАН В. А. Радаеву и Е. М. Тропникову за прекрасно выполненную аналитическую работу. Мы признательны также профессору Санкт-Петербургского госуниверситета Е. Н. Котельниковой за ценные научные консультации.

Анализ содержания микроэлементов проведен в рамках темы № АААА-А18-118053090045-8 государственного задания ИГГ УрО РАН. Дооснащение и комплексное развитие ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН осуществляется при финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение № 075-15-2021-680.

## Литература

1. Амосова О. Е., Машина Е. В., Шанина С. Н. Аминокислоты как биомаркеры состава холелитов // Вестник геонаук. 2020. № 10. С. 22—30.
2. Андрейчук В., Климчук А., Бостон П., Галускин Е. Уникальные железомарганцевые колонии микроорганизмов в пещере Золушка (Украина — Молдова) // Спелеология и карстология. 2009. № 3. С. 5—23.
3. Анищенко Л. А., Шанина С. Н. Аминокислоты в природных объектах Тимано-Печорского бассейна // Происхождение биосферы и коэволюция минерального и биологического миров. Сыктывкар, 2007. С. 95—116.
4. Анищенко Л. А., Шанина С. Н. Аминокислоты как возможные индикаторы условий накопления и консервации органического вещества // Органическая минералогия. Сыктывкар: Геопринт, 2009. С. 71—74.
5. Антошкина А. А. Бактериальное породообразование — реальность современных методов исследований // Ученые записки Казанского университета. 2011. № 153 (4). С. 114—126.
6. Антошкина А. А., Добрецова И. Г., Силаев В. И., Киселёва Д. В., Смолева И. В., Чердниченко Н. В. Особенности состава и строения карбонатных построек в северной зоне Среднего Атлантического хребта // Геология рифов. Сыктывкар: Геопринт, 2020. С. 19—22.
7. Антошкина А. А., Пономаренко Е. С., Силаев В. И. Биохемогенная природа ордовикских шамозитов на Северном Урале // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2017. № 9. С. 12—22.
8. Астафьева М. М., Герасименко Л. М., Гептнер А. Р., Жегалло Е. А., Жмур С. И., Карпов Г. А., Орлеанский В. К.,



Пономаренко А. Г., Розанов А. Ю., Сумина Е. Л., Ушатинская Г. Т., Хувер Р., Школьник Э. Л. Ископаемые бактерии и другие микроорганизмы в земных породах и астроматериалах. М.: ПИН РАН, 2011. 172 с.

9. Бельская Л. В., Голованова О. А. Особенности аминокислотного состава зубных и слюнных камней // Минералогия и жизнь: происхождение биосферы и коэволюция минерального и биологического миров. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2007. С. 81—83.

10. Боровкова Е. В., Филиппов В. Н. Микровключения в пигментном холелите // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2009. № 8. С. 9—11.

11. Войткевич Г. В., Кокин А. В., Мирошников А. Е., Прохоров В. Г. Справочник по геохимии. М.: Недра, 1990. 480 с.

12. Гинзбург И. И. Роль микроорганизмов в выветривании пород и образовании минералов // Кора выветривания. 1952. № 1. С. 6—35.

13. Глинская Л. Г., Занин Ю. Н., Рудина Н. А. Бактериальный генезис фосфатов кальция в организме человека и в природе // Литология и полезные ископаемые. 2007. № 1. С. 63—65.

14. Гусев М. В., Минеева Л. А. Микробиология. М.: Академия, 2003. 464 с.

15. Занин Ю. И. Микробиальные формы в фосфоритах — первые 100 лет изучения // Литосфера. 2005. № 2. С. 159—165.

16. Каткова В. И., Симаков А. Ф. Роль аминокислот в генезисе биоминеральных образований // Сыктывкарский минералогический сборник. 1998. № 27. С. 58—66.

17. Кокин А. В., Силаев В. И., Павлович Н. В., Киселёва Д. В., Слюсарь А. В. О соответствии распределения микроэлементов в составе современных бактерий закону периодичности космогеохимической распространенности химических элементов // Вестник геонаук. 2020. № 7. С. 3—8.

18. Кокин А. В., Силаев В. И., Павлович Н. В., Киселёва Д. В., Слюсарь А. В., Слюсарь А. А. О возможной связи мочекаменной болезни с деятельностью бактерий в организме человека // Наука юга России. 2020. № 16 (1). С. 77—87.

19. Коротяев А. И., Бабичев С. А. Медицинская микробиология, иммунология и вирусология. СПб.: СпецЛит, 2010. 760 с.

20. Котельникова Е. Н. Особенности проявления изомерии, хиральности, четности и упаковки молекул в кристаллической структуре природных органических веществ // Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии. Сыктывкар: Геопринт, 2014. С. 207—208.

21. Круглов Ю. В. Микробное сообщество почвы: физиологическое разнообразие и методы исследования // Сельскохозяйственная биология. 2016. № 51(1). С. 46—59.

22. Кузнецов С. И. Геологическая деятельность микроорганизмов // Вестник АН СССР. 1952. № 2. С. 78—92.

23. Леин А. Ю., Москалев Л. И., Богданов Ю. А., Сагалевич А. М. Гидротермальные системы океана и жизнь // Природа. 2000. № 5. С. 47—55.

24. Мудрецова-Висс К. А., Дедюхина В. П., Масленникова Е. В. Основы микробиологии. М.: ИНФРА-М, 2014. 354 с.

25. Нетрусов А. И., Котова И. Б. Микробиология. М., 2009. 352 с.

26. Павлович Н. В., Кокин А. В., Силаев В. И., Аронова Н. В., Цимбалистова М. В., Киселёва Д. В., Слюсарь А. В. Сравнительный анализ состава микроэлементов у

бактерий различных видов // Актуальные вопросы изучения особо опасных и природноочаговых болезней. Ростов-на-Дону. 2019. С. 309—313.

27. Польшов Б. Б. Кора выветривания. Часть 1. Процессы выветривания. Основные фазы и формы коры выветривания и их распределение. Л.: АН СССР, 1934. 243 с.

28. Розанов А. Ю. Ископаемые бактерии, седиментогенез и ранние стадии эволюции биосферы // Палеонтологический журнал. 2003. № 6. С. 41—49.

29. Сергеев В. Н. Окремненные микрофоссилии докембрия: природа, классификация и биостратиграфическое значение. М.: ГЕОС, 2006. 279 с.

30. Силаев В. И., Кокин А. В., Филиппов В. Н., Киселёва Д. В., Нефедьева Н. С. Железный метеорит Большой Долгучан: результаты минералого-геохимических исследований // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2016. № 7. С. 10—18.

31. Силаев В. И., Аникин Л. П., Шанина С. Н., Карпов Г. А., Васильев Е. А., Шуйский А. С., Смолева И. В., Киселёва Д. В., Вергасова Л. П. Абиогенные конденсированные органические полимеры в продуктах современного вулканизма в связи с проблемой возникновения жизни на Земле. Сыктывкар: Геопринт, 2018. 128 с.

32. Силаев В. И., Карпов Г. А., Аникин Л. П., Scribano V., Ремизов Д. Н., Филиппов В. Н., Киселёва Д. В., Макеев Б. А., Шанина С. Н., Тарасов К. В., Симаков С. К. Тефра катастрофического извержения вулкана Этна на Сицилии в 1669 г.: ее петро-минерало-геохимические свойства и геодинамический аспект // Вулканология и сейсмология. 2021. № 3. С. 41—62.

33. Силаев В. И., Карпов Г. А., Аникин Л. П., Васильев Е. А., Вергасова Л. П., Смолева И. В. Минерально-фазовый парагенезис в эксплозивных продуктах современных извержений вулканов Камчатки и Курил. Часть 1. Алмазы, углеродистые фазы, конденсированные органоиды // Вулканология и сейсмология. 2019. № 5. С. 54—67.

34. Силаев В. И., Карпов Г. А., Филиппов В. Н., Макеев Б. А., Шанина С. Н., Хазов А. Ф., Тарасов К. В. Минералого-геохимические свойства прикратерной тефры вулкана Эреус (Антарктида) из материалов извержения 2000 г. // Вулканология и сейсмология. 2020. № 4. С. 40—56.

35. Силаев В. И., Филиппов В. Н., Голубева И. И., Лютоев В. П., Потапов С. С., Симакова Ю. С., Петровский В. А., Хазов А. Ф. Метеорит Челябинск. Результаты минералого-геохимических исследований // Метеорит Челябинск — год на Земле. Челябинск. 2014. С. 443—473.

36. Шанина С. Н., Безносова Т. М. Аминокислоты в раннепалеозойских брахиоподах Тимано-Североуральского региона // Известия Коми НЦ УрО РАН. 2012. № 2. С. 73—83.

37. Шанина С. Н., Бушнев Д. А. Изотопный состав углерода аминокислот твердых битумов // ДАН. 2014. № 456 (5). С. 586—590.

38. Юшкин Н. П. Биоминеральные взаимодействия: 42-е Чтения им. В. И. Вернадского. М.: Наука, 2002. 60 с.

39. Юшкин Н. П. Минеральный мир и биосфера: Програм. доклад на IV Междунар. семинаре «Минералогия и жизнь» // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2007. № 6. С. 2—5.

40. Юшкин Н. П., Бушнев Д. А., Шанина С. Н. Ископаемые смолы Северной Евразии // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2006. № 11. С. 2—5.

41. Bhattachary S. K., Banerjee A. B. D-Amino Acids in the Cell Pool of Bacteria // Folia Microbial. 1974. No. 19. pp. 43—50.





42. Degens E. T. Geochemistry of sediments. Prentice. N. Y. 1965. P. 342.

43. Detkova E. N., Boltyanskaya Yu. V. Relationships between the Osmoadaptation Strategy, Amino Acid Composition of Bulk Protein, and Properties of Certain Enzymes of Haloalkaliphilic Bacteria // Microbiology. 2006. No. 75 (3). P. 250–265.

44. Hayes J. M. Organic constituents of meteorites — a review // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1967. No. 31. P. 1354–1440.

45. Hecky R. E., Mopper K., Kilham P., Degens E. T. The Amino Acids and Sugar Composition of Diatom Cell-Walls // *Marine Biology*. 1973. No. 19. P. 323–331.

46. Huber C., Wachterhauser G.  $\alpha$ -Hydroxy and  $\alpha$ -Amino Acids under Possible Hadean, Volcanic Origin-of-Life Conditions // *Science*. 2006. No. 6. P. 630–632.

47. Igarashi H., Fujikawa H., Usami H., Kawabata Sh., Morita T. Purification and Characterization of Staphylococcus aureus FRI 1169 and 587nToxic Shock Syndrome Exotoxins // *Infection and Immunity*. 1984. No. 44 (1). P. 175–181.

48. Kotelnikova E. N., Isakov A. I., Kryuchkova L. Y., Zolotarev A. A., Bocharov S. N., Lorenz H. Acids with Chiral molecules as essential organic compounds of biogenic — abiogenic systems // *Processes and Phenomena on the Boundary Between Biogenic and Abiogenic Nature*. Springer. Cham, Switzerland. 2020. P. 695–719.

49. Lee S. D., Fischetti V. A. Purification and Characterization of LPXT-Gase from Staphylococcus aureus: the Amino Acid Composition Mirrors That Found S. aureus in the Peptidoglycan // *J. Bacteriological*. 2006. No. 188 (2). P. 389–398.

50. Schieber A., Bruckner H., Ling J. R. GC-MS analysis of diaminopimelic acid Stereoisomers and amino acid enantiomers in rumen bacteria // *Biomedical chromatography*. 1999. No. 19. P. 40–50.

51. Stokes J. L., Gunness M. The Amino Acid composition of microorganisms // *J. Bacteriology*. 1946. No. 52. P. 195–207.

52. Tazaki K. Biomineralization of layer silicates and hydrated Fe/Mn oxides in microbial mats: an electron microscopical study // *Clays Clay Minerals*. 1997. No. 45 (2). P. 203–212.

## References

1. Amosova O. E., Mashina E. V., Shanina S. N. *Aminokisloty kak biomarkery sostava kholelitov* (Amino acids as biomarkers of cholelitis composition). *Vestnik of Geosciences*, 2020, No. 10, pp. 22–30.

2. Andreychuk V., Klimchuk A., Boston P., Galuskin E. *Unikalnyye zhelezo-margantsevyye kolonii mikroorganizmov v peshchere Zolushka (Ukraina-Moldova)* (Unique ferromanganese colonies of microorganisms in the Cinderella cave (Ukraine-Moldova)). *Speleology and Karstology*, 2009, No. 3, pp. 5–23.

3. Anischenko L. A., Shanina S. N. 2007. *Aminokisloty v prirodnnykh ob'yektakh Timano-Pechorskogo basseyna* (Amino acids in natural objects of the Timan-Pechora basin). The origin of the biosphere and the co-evolution of the mineral and biological worlds: processing of conference. Syktyvkar, 2007, pp. 95–116.

4. Anischenko L. A., Shanina S. N. *Aminokisloty kak vozmozhnyye indikatory usloviy nakopleniya i konservatsii organicheskogo veshchestva* (Amino acids as possible indicators of the conditions of accumulation and conservation of organic matter). *Organic mineralogy: processing of conference*. Syktyvkar, Geoprint, 2009, pp. 71–74.

5. Antoshkina A. A. *Bakterialnoye porodoobrazovaniye — realnost sovremennykh metodov issledovaniy* (Bacterial rock for-

mation — the reality of modern research methods). *Academic notes of Kazan University*, 2011, No. 153 (4), pp. 114–126.

6. Antoshkina A. A., Dobretsova I. G., Silaev V. I., Kiseleva D. V., Smoleva I. V., Cherednichenko N. V. *Osobennosti sostava i stroyeniya karbonatnykh postroyek v severnoy zone Sredinnogo Atlanticheskogo khrebt* (Features of the composition and structure of carbonate structures in the northern zone of the Mid-Atlantic Ridge). *Reef geology: processing of conference*. Syktyvkar, Geoprint, 2020, pp. 19–22.

7. Antoshkina A. A., Ponomarenko E. S., Silaev V. I. *Biokhemogennaya priroda ordovikskikh shamozitov na Severnom Urale* (Biochemogenic nature of Ordovician chamosite in the Northern Urals). *Vestnik of the Institute of Geology, Komi SC UB RAS*, 2017, No. 9, pp. 12–22.

8. Astafieva M. M., Gerasimenko L. M., Geptner A. R., Zhegallo E. A., Zhmur S. I., Karpov G. A., Orleansky V. K., Ponomarenko A. G., Rozanov A. Yu., Sumina E. L., Ushatinskaya G. T., Hoover R., Shkolnik E. L. *Iskopayemyye bakterii i drugiye mikroorganizmy v zemnykh porodakh i astromaterialakh* (Fossil Bacteria and Other Microorganisms in Terrestrial Rocks and Astromaterials). Moscow, 2011, PIN RAS, 172 p.

9. Belskaya L. V., Golovanova O. A. *Osobennosti aminokislotozostava zubnykh i slyunnykh kamney* (Features of the amino acid composition of dental and salivary calculi). *Mineralogy and life: the origin of the biosphere and the co-evolution of the mineral and biological worlds*. Institute of geology Komi SC UB RAS, Syktyvkar, 2007, pp. 81–83.

10. Borovkova E. V., Filippov V. N. *Mikrovklyucheniya v pigmentnom kholelite* (Microinclusions in pigment cholelitis). *Vestnik of Institute of geology Komi SC UB RAS*, 2009, No. 8, pp. 9–11.

11. Voitkevich G. V., Kokin A. V., Miroshnikov A. E., Prokhorov V. G. *Spravochnik po geokhimii*. (Handbook of Geochemistry). Moscow: Nedra, 1990, 480 p.

12. Ginzburg I. I. *Rol' mikroorganizmov v vyvetrivanii porod i obrazovanii mineralov. Kora vyvetrivaniya* (The role of microorganisms in the weathering of rocks and the formation of minerals. Weathering crust). 1952, No. 1, pp. 6–35.

13. Glinskaya L. G., Zanin Yu. N., Rudina N. A. *Bakterialnyy genезis fosfatov kaltsiya v organizme cheloveka i v prirode* (Bacterial genesis of calcium phosphates in the human body and in nature). *Lithology and minerals*, 2007, No. 1, pp. 63–65.

14. Gusev M. V., Mineeva L. A. *Mikrobiologiya* (Microbiology). Moscow. Academy. 2003. 464 p.

15. Zanin Yu. I. *Mikrobnalnyye formy v fosforitakh — pervyye 100 let izucheniya* (Microbial forms in phosphorites — the first 100 years of study). *Lithosphere*, 2005, No. 2, pp. 159–165.

16. Katkova V. I., Simakov A. F. *Rol aminokislot v genезise biomineralnykh obrazovaniy* (The role of amino acids in the genesis of biomineral formations). *Syktyvkar mineralogical collection*, 1998, No. 27, pp. 58–66.

17. Kokin A. V., Silaev V. I., Pavlovich N. V., Kiseleva D. V., Slyusar A. V. *O sootvetstvii raspredeleniya mikroelementov v sostave sovremennykh bakteriy zakonu periodichnosti kosmogekhimicheskoy rasprostranennosti khimicheskikh elementov* (Correspondence of the distribution of trace elements in the composition of modern bacteria to the law of periodicity of the cosmochemical abundance of chemical elements). *Vestnik of Geosciences*, 2020, No. 7, pp. 3–8.

18. Kokin A. V., Silaev V. I., Pavlovich N. V., Kiseleva D. V., Slyusar A. V., Slyusar A. A. *O vozmozhnoy svyazi mochekamennoy bolezni s deyatelnostyu bakteriy v organizme cheloveka* (On the possible connection of urolithiasis with the activi-





ty of bacteria in the human body). Science of the South of Russia, 2020, No. 16 (1), pp. 77–87.

19. Korotyaev A. I., Babichev S. A. 2010. *Meditinskaya mikrobiologiya, imunologiya i virusologiya* (Medical Microbiology, Immunology and Virology). St. Petersburg: Special Literature, 2010, 760 p.

20. Kotelnikova E. N. *Osobennosti proyavleniya izomerii, khiralnosti, chetnosti i upakovki molekul v kristallicheskoy strukture prirodnikh organicheskikh veshchestv* (Features of the manifestation of isomerism, chirality, parity and packing of molecules in the crystal structure of natural organic substances). Modern problems of theoretical, experimental and applied mineralogy: processing of conference. Syktyvkar, Geoprint, 2014, pp. 207–208.

21. Kruglov Yu. V. *Mikrobnoye soobshchestvo pochvy: fiziologicheskoye raznoobraziye i metody issledovaniya* (Microbial community of soil: physiological diversity and research methods). Agricultural biology, 2016, No. 51 (1), pp. 46–59.

22. Kuznetsov S. I. *Geologicheskaya deyatel'nost' mikroorganizmov* (Geological activity of microorganisms). Bulletin of the USSR Academy of Sciences, 1952, No. 2, pp. 78–92.

23. Lein A. Yu., Moskalev L. I., Bogdanov Yu. A., Sagalevich A. M. *Gidrotermal'nyye sistemy okeana i zhizn'* (Ocean hydrothermal systems and life). Nature, 2000, No. 5, pp. 47–55.

24. Mudretsova-Wyss K. A., Dedyukhina V. P., Maslennikova E. V. *Osnovy mikrobiologii* (Fundamentals of Microbiology). Moscow: INFRA-M, 2014, 354 p.

25. Netrusov A. I., Kotova I. B. *Mikrobiologiya* (Microbiology). Moscow, 2009, 352 p.

26. Pavlovich N. V., Kokin A. V., Silaev V. I., Aronova N. V., Tsimbalistova M. V., Kiseleva D. V., Slyusar A. V. *Sravnitel'nyy analiz sostava mikroelementov u bakteriy razlichnykh vidov* (Comparative analysis of the composition of trace elements in bacteria of various types). Topical issues of studying especially dangerous and natural focal diseases. Rostov-on-Don, 2019, pp. 309–313.

27. Polynov B. B. 1934. *Kora vyvetrivaniya. Chast 1. Protssy vyvetrivaniya. Osnovnyye fazy i formy kory vyvetrivaniya i ikh raspredeleniye*. (Weathering crust. Part 1. Weathering processes. The main phases and forms of the weathering crust and their distribution). Leningrad: Academy of Sciences of the USSR, 1934, 243 p.

28. Rozanov A. Yu. *Iskopayemyye bakterii, sedimentogenez i ranniye stadii evolyutsii biosfery* (Fossil bacteria, sedimentogenesis and early stages of biosphere evolution). Paleontological journal, 2003, No. 6, pp. 41–49.

29. Sergeev V. N. *Okremnennyye mikrofosilii dokembriya: priroda, klassifikatsiya i biostratigraficheskoye znachenie* (Silicified Precambrian microfossils: nature, classification and biostratigraphic significance). Moscow: GEOS, 2006, 279 p.

30. Silaev V. I., Kokin A. V., Filippov V. N., Kiseleva D. V., Nefedieva N. S. *Zheleznyy meteorit Bolshoy Dolguchan: rezultaty mineralogo-geokhimicheskikh issledovaniy* (Iron meteorite Big Dolguchan: results of mineralogical and geochemical studies). Vestnik of Institute of geology Komi SC UB RAS, 2016, No. 7, pp. 10–18.

31. Silaev V. I., Anykin L. P., Shanina S. N., Karpov G. A., Vasiliev E. A., Shuisky A. S., Smoleva I. V., Kiseleva D. V., Vergasova L. P. *Abiogenyye kondensirovannyye organicheskiye polimery v produktakh sovremennogo vulkanizma v svyazi s problemoy vozniknoveniya zhizni na Zemle* (Abiogenic condensed organic polymers in the products of modern volcanism in connection with the problem of the origin of life on Earth). Syktyvkar: Geoprint, 2018, 128 p.

32. Silaev V. I., Karpov G. A., Anikin L. P., Scribano V., Remizov D. N., Filippov V. N., Kiseleva D. V., Makeev B. A., Shanina S. N., Tarasov K. V., Simakov S. K. *Tefra katastroficheskogo izverzheniya vulkana Etna na Sitsilii v 1669 g.: yeye petro-mineralo-geokhimicheskiye svoystva i geodinamicheskiy aspekt* (Tephra of the catastrophic eruption of Mount Etna in Sicily in 1669: its petro-mineralogical-geochemical properties and geodynamic aspect). Volcanology and seismology, 2021, No. 3, pp. 41–62.

33. Silaev V. I., Karpov G. A., Anikin L. P., Vasiliev E. A., Vergasova L. P., Smoleva I. V. *Mineralno-fazovyy paragenезis v eksplozivnykh produktakh sovremennykh izverzheniy vulkanov Kamchatki i Kuril. Chast 1. Almazы, ugleorodistyye fazy, kondensirovannyye organoidy* (Mineral-phase paragenesis in the explosive products of recent volcanic eruptions in Kamchatka and the Kuriles. Part 1. Diamonds, carbonaceous phases, condensed organoids). Volcanology and seismology, 2019, No. 5, pp. 54–67.

34. Silaev V. I., Karpov G. A., Filippov V. N., Makeev B. A., Shanina S. N., Khazov A. F., Tarasov K. V. *Mineralo-geokhimicheskiye svoystva prikraternoy tefry vulkana Ereus (Antarktida) iz materialov izverzheniya 2000 g.* (Mineralogical and geochemical properties of the crater tephra of the Ereus volcano (Antarctica) from the materials of the eruption in 2000). Volcanology and seismology, 2000, No. 4, pp. 40–56.

35. Silaev V. I., Filippov V. N., Golubeva I. I., Lyutoev V. P., Potapov S. S., Simakova Yu. S., Petrovsky V. A., Khazov A. F. *Meteorit Chelyabinsk. Rezultaty mineralogo-geokhimicheskikh issledovaniy* (Chelyabinsk Meteorite. Results of mineralogical and geochemical studies). Meteorite Chelyabinsk — a year on Earth. Chelyabinsk, 2014, pp. 443–473.

36. Shanina S. N., Beznosova T. M. *Aminokisloty v rannepaleozoyskikh brakhioiopodakh Timano-Severouralskogo regiona* (Amino acids in the Early Paleozoic brachioiopods of the Timan-North Ural region). Izvestia of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2012, No. 2, pp. 73–83.

37. Shanina S. N., Bushnev D. A. 2014. *Izotopnyy sostav ugleroda aminokislot tverdykh bitumov* (Carbon isotopic composition of amino acids of solid bitumen). Doklady Earth Sciences, 2014, No. 456 (5), pp. 586–590.

38. Yushkin N. P. *Biomineralnyye vzaimodeystviya* (Biomineral interactions). The 42nd Vernadsky Readings. Moscow: Science, 2002, 60 p.

39. Yushkin N. P. *Mineralnyy mir i biosfera* (Mineral World and Biosphere). Keynote speech at the IV International Seminar «Mineralogy and Life». Vestnik of Institute of geology Komi SC UB RAS, 2007, No. 6, pp. 2–5.

40. Yushkin N. P., Bushnev D. A., Shanina S. N. *Iskopayemy smoly Severnoy Yevrazii* (Resin Fossils of Northern Eurasia). Vestnik of Institute of geology Komi SC UB RAS, 2006, No. 11, pp. 2–5.

41. Bhattachary S. K., Banerjee A. B. D-Amino Acids in the Cell Pool of Bacteria. Folia Microbial. 1974, No. 19, pp. 43–50.

42. Degens E. T. Geochemistry of sediments. Prentice, N. Y., 1965, 342 p.

43. Detkova E. N., Boltanskaya Yu. V. Relationships between the Osmoadaptation Strategy, Amino Acid Composition of Bulk Protein, and Properties of Certain Enzymes of Haloalkaliphilic Bacteria. Microbiology, 2006, No. 75 (3), pp. 250–265.

44. Hayes J. M. Organic constituents of meteorites — a review. Geochimica et Cosmochimica Acta. 1967, No. 31, pp. 1354–1440.



45. Hecky R. E., Mopper K., Kilham P., Degens E. T. The Amino Acids and Sugar Composition of Diatom Cell-Walls. *Marine Biology*, 1973, No. 19, pp. 323–331.

46. Huber C., Wachterauser G.  $\alpha$ -Hydroxy and  $\alpha$ -Amino Acids under Possible Hadean, Volcanic Origin-of-Life Conditions, 2006, No. 6, pp. 630–632.

47. Igarashi H., Fujikawa H., Usami H., Kawabata Sh., Morita T. Purification and Characterization of *Staphylococcus aureus* FRI 1169 and 587n Toxin Exotoxins. *Infection and Immunity*, 1984, No. 44 (1), pp. 175–181.

48. Kotelnikova E. N., Isakov A. I., Kryuchkova L. Y., Zolotarev A. A., Bocharov S. N. Lorenz H. Acids with Chiral molecules as essential organic compounds of biogenic – abiogenic systems. *Processes and Phenomena on the Boundary Between Biogenic and Abiogenic Nature*. Springer. Cham, Switzerland, 2020, pp. 695–719.

49. Lee S. D., Fischetti V. A. Purification and Characterization of LPXT-Gase from *Staphylococcus aureus*: the Amino Acid Composition Mirrors That Found in *S. aureus* in the Peptidoglycan. *J. Bacteriological*. 2006, No. 188 (2), pp. 389–398.

50. Schieber A., Bruckner H., Ling J. R. GC-MS analysis of diaminopimelic acid Stereoisomers and amino acid enantiomers in rumen bacteria. *Biomedical chromatography*, 1999, No. 19, pp. 40–50.

51. Stokes J. L., Gunness M. The Amino Acid composition of microorganisms. *J. Bacteriology*. 1946, No. 52, pp. 195–207.

52. Tazaki K. Biomineralization of layer silicates and hydrated Fe/Mn oxides in microbial mats: an electron microscopical study. *Clays Clay Minerals*, 1997, No. 45 (2), pp. 203–212.

Поступила в редакцию / Received 13.09.2021



## От минералов к новым материалам. Приоритеты в производстве материалов в XXI веке

А. М. Асхабов

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар

askhabov@geo.komisc.ru

*Посвящается памяти академика Л. А. Вайсберга*

Рассмотрены характерные особенности поиска, производства и проектирования новых материалов в современных условиях. Обсуждается произошедшая смена парадигмы в производстве материалов, связанная с переходом от производства материалов на основе опыта к целенаправленному созданию материалов на основе знаний и новых технологий. В текущей повестке инновационного материаловедения – «умные» материалы и природоподобные технологии. Реальностью стали нанотехнологии, способные контролировать и управлять веществом и процессами в нанометровом масштабе. На основе анализа текущих тенденций указаны приоритеты нового этапа в производстве (творении) новых материалов. Серьезные прорывы ожидаются в следующих направлениях: 1) использование новых нанотехнологических идей, предполагающих прямое воздействие и операции над отдельными атомами; 2) создание «умных» материалов, материалов-приборов, материалов-машин; 3) изобретение, прогнозирование и дизайн новых материалов, отсутствующих в природе; 4) производство материалов в экстремальных условиях и материалов для эксплуатации в экстремальных условиях; 5) производство биологических материалов и материалов, воспроизводящих живое вещество; 6) развитие так называемых природоподобных технологий.

**Ключевые слова:** материалы на минеральной основе, инновационные материалы, нанотехнологии, творение материалов, материалы будущего.

## From minerals to new materials. Priorities in the production of materials in the 21<sup>st</sup> century

A. M. Askhabov

Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar

*Dedicated to the memory of L. A. Vaisberg*

The characteristic features of the search, production and engineering of new materials in modern conditions are considered. We discuss the change of paradigm in materials production, associated with the transition from experience-based production of materials to the task-oriented production of materials based on knowledge and new technologies. The current agenda of innovative materials science includes “smart” materials and nature-like technologies. Nanotechnology has become a reality, capable of controlling and operating matter and processes on the nanometer scale. The priorities of the new stage of production (creation) materials are indicated.

A great leap forward is expected in the following directions: 1) application of new nanotechnological concepts suggesting direct influence and action on separate atoms; 2) creating “smart” materials, materials – devices, materials – machines; 3) discovering, forecasting and design of new material absent in the nature; 4) producing materials under extreme conditions and for extreme conditions; 5) producing bioorganic materials and materials reproducing living matter; 6) developing so-called nature-like technologies.

**Keywords:** mineral-based materials, innovative materials, nanotechnology, material creation, materials of the future.

### От полезных ископаемых и минералов к новым материалам

Академик Л. А. Вайсберг внес крупный вклад в развитие в нашей стране области науки и практики, связанной с исследованием процессов переработки и обогащения разнообразных видов твердого минерального сырья, которую в мире обозначают термином *mineral processing* [7]. Наука о переработке полезных ископаемых, очевидно, должна тесно взаимодействовать с другими фундаментальными науками — физи-

кой, химией, материаловедением. Последнее заслуживает особого внимания не только потому, что переработка минерального сырья зачастую преследует цель получения новых материалов, но и из-за того, что научно-технический уровень материаловедения как науки отражается на всей совокупности используемых в переработке сырья способов и технологических процедур. Кроме того, получение ценных материалов на минеральной основе — это одно из эффективных направлений рационального использования природного сы-

**Для цитирования:** Асхабов А. М. От минералов к новым материалам. Приоритеты в производстве материалов в XXI веке // Вестник геонаук. 2021. 9(321). С. 34–38. DOI: 10.19110/geov.2021.9.2.

**For citation:** Askhabov A. M. From minerals to new materials. Priorities in the production of materials in the 21<sup>st</sup> century. Vestnik of Geosciences, 2021, 9(321), pp. 34–38, doi: 10.19110/geov.2021.9.2.





рья. Эти обстоятельства побудили нас к подготовке настоящей заметки, в которой тезисно характеризуется современное материаловедение и перспективы его развития в части производства новых материалов, в том числе на минеральной основе. Обсуждаемая тема находится в русле сформировавшейся в последние годы актуальной проблемы «от минералов к материалам» [1, 14], транслирующей путь от полезных ископаемых к новым материалам. Поэтому мы полагаем, что приведенные здесь соображения о современных трендах в производстве материалов будут интересны как специалистам, которые рассматривают минералы как перспективные материалы, так и тем, кого минеральное сырье интересует больше как источник или основа получения новых материалов.

### Материалы и производство материалов в жизни человека и истории человечества

Материалы и производство материалов сыграли огромную роль в формировании человеческой культуры и цивилизации. Потребность в материалах возникла, как только человек стал действовать осознанно. С помощью материалов он был способен увеличивать свои ограниченные возможности. И первые материалы, которыми он воспользовался, были минералами, горными породами или материалами на минеральной основе. В последующем целые исторические эпохи получа-

ли названия по преобладающему материалу — каменный век, бронзовый век и т. д. И такая связь человеческой цивилизации с материалами с веками только усиливалась. Материалы непосредственно влияли на жизнь человека. Перефразируя известное выражение, можно сказать: каковы были материалы — такова была и жизнь. Это побуждало его к поискам и производству все более ценных и разнообразных материалов.

В истории человечества материалы и производство материалов претерпели впечатляющую эволюцию, проходя через ряд последовательных ступеней и революций, в направлении от использования природных материалов до их целенаправленного создания (см. рисунок-коллаж, сделанный Н. Н. Пискуновой для этого сообщения).

Первая материаловедческая революция произошла, когда человек стал использовать одни материалы для производства других. В этих целях, естественно, использовались природные материалы. Технологии в большинстве своем воспроизводили природные. Новые материалы оставались минеральными или были получены на минеральной основе. Возможности природы долго были предметом подражания и зависти. Лишь в последние годы созданные человеком технологии получения новых материалов стали сопоставимы или даже стали превосходить природные. Это было вызвано тем, что резко возросли потребности науки, техники и новых производств в материалах со



Ступени удовлетворения нужд человека в материалах: от использования природных материалов до творения материалов по потребностям

Stages of satisfying human needs in materials: from use of natural materials to creation of materials according to the needs



специфическими свойствами. Произошла смена парадигмы в производстве материалов, что привело к новой революции в материаловедении. В результате характерное для прошлого производство материалов на основе опыта стало превращаться в целенаправленное создание материалов на основе знаний, в том числе и тех, которых не было в природе.

При этом минералы и другие полезные ископаемые остаются естественным ресурсом для получения новых материалов. Продолжают развиваться методы целевой переработки природного сырья и технологического модифицирования свойств минералов. До сих пор нередки примеры, когда тот или иной минерал из-за обнаружения новых свойств находит неожиданные применения и выступает как перспективный материал [14]. Даже хорошо известные нам минералы таят еще много неизвестных свойств, открытие которых резко повысит их материаловедческую ценность. В целом путь от полезных ископаемых к материалам человечеством еще до конца не обработан.

### **О новом этапе материаловедения и производства материалов**

Происходящие в материаловедении, получении и использовании материалов изменения грандиозны. Достигнутые здесь успехи настолько велики, что мы переживаем очередную материаловедческую революцию, имеющую и важные культурные последствия, сравнимые с переходом от каменного века к бронзовому. Само материаловедение как наука изменилось, оно стало междисциплинарной областью, объединяющей химию, физику, а также биологию, связанную с живой природой (биомиметика). В разных странах появилось огромное количество материаловедческих центров, лабораторий. Издаются международные специализированные научные журналы (Advanced materials, APL materials, Journal of materials Science, Materials Today, Metamaterials, Progress in Materials Science и др.). Имеется обширная литература и на русском языке, в том числе монографические обобщения энциклопедического характера [6], учебные пособия [9], уже почти два десятилетия выходят книги серии «Мир материалов и технологий» [5, 8], в которых имеется огромное количество ссылок, необходимых для анализа современного состояния, обобщения и определения приоритетов науки о материалах. Мы ограничимся лишь ссылками приоритетного характера.

Возросли требования к материалам. Особенности современного этапа в получении новых материалов, в том числе и на минеральной основе, связаны с тем, что материалы перестают быть пассивными объектами. Мы постепенно переходим к поискам или созданию материалов для конкретных целей. На передний план выходят функциональные материалы [4], которые что-то «делают». Материалы приближаются к приборам, они все больше действуют как машины. В обиход вошли термины «умные материалы» и «природоподобные технологии». Материаловеды проектируют и обсуждают материалы, которые могут существовать, но ещё не открыты. Это вносит свои коррективы в разработку методов синтеза материалов (комбинаторные методы, матричная сборка и т. д.). «Умные» технологии должны решить проблему «догнать и обогнать природу».

Принципиальное значение в производстве материалов приобрёл фактор масштаба. Мы научились производить наноразмерные материальные объекты — нанокластеры и наноструктуры, реальностью становятся нанотехнологии, способные контролировать и управлять веществом и процессами в нанометровом масштабе [8, 12, 15]. В этом масштабе размеров стираются границы между материаловедческими и смежными науками. В процессах на наноуровне неразличимы те характеристики и свойства, которые на макроуровне изучаются физикой, химией, биологией и т. д., с чем связана уникальность наномира. Материаловедческое значение нанотехнологии заключается в том, что приемы и методы, которые там реализуются, формируют принципиально новую парадигму создания материалов. Возможности оперирования отдельными атомами и молекулами открывают неизвестные ещё пути конструирования материалов по методологии «снизу вверх». Перспективы нанотехнологий в производстве материалов, по общему признанию, представляются захватывающими. Однако реализация таких потенциально весьма эффективных подходов пока остается в области наших мечтаний. Это скорее разновидность инженерного творчества [8]. Мы и сегодня больше надеемся на прозорливость и удачу исследователя. Многие перспективные материалы, как и в старину, открываются случайно. Так, углеродные нанотрубки, которые сейчас рассматриваются как уникальный материал, не были предсказаны даже после открытия фуллеренов [11].

### **От века кристаллов к веку инновационных материалов**

XX век вошёл в историю материаловедения как век кристаллов. Практически к середине века была решена грандиозная проблема обеспечения новых отраслей промышленности технически ценными кристаллами [2]. Созданы промышленные технологии получения кристаллов кварца, флюорита, сапфира, кремния, германия и т. д. Искусственно выращено также большинство драгоценных камней. Интересно, что соответствующие промышленные технологии кристаллосинтеза не всегда копировали природные процессы, что свидетельствует о том, что возможно обойти природу.

Однако примеров, когда природа помогает решать задачи получения новых материалов, гораздо больше. Поэтому многие продолжают видеть в природе непревзойденного инженера и учителя. Более того, это усиливающийся тренд в производстве новых материалов. Важно еще раз отметить, что природные материалы часто служат превосходными по эффективности матрицами для производства широкого класса новых материалов, в том числе так называемых фотонных кристаллов, биоподобных структур, а также вдохновленных природой архитектурных элементов в создании материалов.

В этом плане конец XX — начало XXI века характеризуется целым рядом выдающихся достижений. Так, удивительными свойствами обладают так называемые метаматериалы [16]. Они отличаются от природных материалов тем, что имеют отрицательный показатель преломления, и используются для покры-





тий, которые делают объекты невидимыми в лучах длинноволнового диапазона. На слуху опалы и опалоподобные матрицы, в которых путем заполнения другим веществом пространства между образующими их сферическими частицами создаются фотонные кристаллы и другие мезопористые материалы.

За последние годы синтезировано широкое семейство упорядоченных макро-, мезо- и нанопористых неорганических материалов на минеральной основе. В издательстве Springer подготовлена крупная монография по пористым материалам [13]. В зависимости от метода изготовления эти материалы имеют каналы или поры одинаковых размеров, которые расположены упорядоченно и формируют сотовую структуру. Они напоминают алюмосиликатные цеолиты, которые благодаря их пористому строению широко используются как катализаторы и молекулярные сита. Собственно, открытие нового класса мезопористых материалов произошло неожиданно, когда пытались создать новые типы цеолитов.

Нелишне напомнить здесь и об аэрогелях [10] — уникальных материалах с высокой пористостью и большой площадью поверхности. Их плотность практически близка к плотности воздуха. Первые образцы аэрогеля двуокиси кремния были получены 90 лет назад С. Кристлером, и в наши дни рассматриваются как перспективный инновационный материал. Аэрогели находят применение как высоко эффективные катализаторы, сорбенты, тепло- и звукоизоляторы и т. д. Для их получения чаще всего используются оксиды ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{TiO}_2$  и др.) и другие неорганические соединения. Аэрогели сейчас признаны как наиболее интересные и перспективные высокопористые материалы.

В настоящее время индустрия новых материалов переживает стремительное развитие. Лидировавшие до настоящего времени технологии получения искусственных минералов, кристаллов и кристаллических пленок уступают место производству нанокompозитов — композиционных материалов, состоящих из двух или большего числа фаз, в которых хотя бы одна из фаз состоит из частиц нанометровых размеров [4, 11]. Уникальные свойства демонстрируют нанокompозиты на основе фуллеренов, нанокompозитные материалы с нанотрубками, а также полимерные нанокompозиты на основе слоистых силикатов, глинистых минералов. Ассортимент наполнителей нанокompозитных материалов расширяется с каждым годом. Подбор таких модификаторов и наноразмерных добавок представляется перспективным направлением улучшения свойств композитных материалов.

Особое место обещают занять среди перспективных материалов будущего и сами недавно открытые формы углерода: фуллерены, нанотрубки, графены [11]. Например, углеродные нанотрубки, возможно, являются самыми прочными из всех созданных человеком материалов. А открытие графена в 2004 г. вообще стало сенсацией в научном мире. Это принципиально новый материал, представляющий собой единичный слой атомов углерода, самый плоский из всех возможных материалов.

Уникальные открытия ждут нас в связи с изучением и использованием отдельных минеральных моно- и полислоев атомов, двумерных кристаллов. На

этой основе открываются пути построения новых типов гетероструктур, мультислойных материалов, обладающих необычными свойствами.

Очень интересное направление в создании новых материалов с необычайно полезными свойствами связано с использованием молекул, построенных из так называемых суператомов — кластеров из атомов [3]. Они ведут себя как одиночные атомы, но построенные из них молекулы и сложные структуры совершенно уникальны как строительные элементы для новых материалов (суперматериалов из суператомов). Речь идет об атомах, которых не существует в природе. Молекулы из суператомов авторы предлагают рассматривать как «путь достижения большего, чем дает природа» [3]. И это вполне реально.

Таким образом, характерные черты современного, инновационного этапа развития технологического материаловедения связаны с переходом производства материалов на основе опыта к производству и проектированию материалов на основе знаний и новых технологий. Нет сомнения, что в технологии получения новых материалов открываются новые горизонты. Намечились неизведанные пути для дальнейшего прогресса в изобретении и дизайне материалов. Дорожная карта современного материаловедения позволяет надеяться на успешное удовлетворение все возрастающих требований к материалам со стороны электронных и информационных технологий, энергетики и медицины, оборонной промышленности, космических технологий и т. д. Нас ожидают поразительные изменения в фундаментальных основах производства материалов с необычными и полезными свойствами, в том числе получаемых на основе минералов и минерального сырья. В целом современная повестка в области производства новых материалов ориентирована на серьезные изменения во многих сферах жизни человечества и в человеческой цивилизации.

### Приоритеты производства материалов в XXI веке

Безусловно, среди приоритетов нового этапа технологического материаловедения на ближайшую перспективу будут следующие направления, в рамках которых сегодня сосредоточены наиболее интересные проблемы, переводящие науку о материалах и технологии их производства на качественно иной инновационный уровень.

1. Использование фактора масштаба, новых нанотехнологических и наноинженерных идей, в том числе предполагающих прямое воздействие и операции над отдельными атомами, управление атомными процессами на поверхности.

2. Создание «умных» материалов и материалов для конкретных целей, включая материалы-приборы и материалы-машины, а также инфинитезимальные машины по Р. Фейнману [12].

3. Изобретение, прогнозирование и дизайн новых материалов, отсутствующих в природе. Создание наноструктурных материалов с наперед заданными свойствами. Производство функциональных материалов для экстремальных условий эксплуатации.

4. Производство биоорганических материалов и материалов, воспроизводящих живое вещество (струк-





турную организацию живых организмов). Развитие так называемых природоподобных технологий, планомерный отход в создании материалов от упрощенных схем имитации природы в сторону использования готовых элементов, созданных природой, в том числе живыми организмами, в синтезе и дизайне материалов, включая биокопирование соответствующих структур.

Прогресс в этих направлениях, очевидно, требует и более глубокого понимания процессов взаимодействия атомов и молекул в наном мире на этапе образования ими самого конденсированного вещества (кристаллического или некристаллического, живого или неживого), функционирования и эволюции малых, формирующихся в этом мире объектов, приобретения или программирования ими тех или иных свойств. Это комплекс вопросов, сводящихся к фундаментальным проблемам — как произошло вещество (и не только минеральное) и как управлять этим процессом.

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ № 19-05-00460/19.

## Литература

1. Асхабов А. М. От минералов к новым материалам — дорожная карта минералогического материаловедения // Минералогия Урала: Сб. науч. статей VI Всерос. совещания. Миасс, Екатеринбург, 2011. С. 7—9.
2. Вильке К.-Т. Выращивание кристаллов. Л.: Недра, 1977. 600 с.
3. Джон Павлус. Супермолекулы из суператомов // В мире науки. 2017. № 1/2. С. 13.
4. Елисеев А. А., Лукашин А. В. Функциональные наноматериалы / Под ред. Ю. Д. Третьякова. М.: Физматлит, 2010. 456 с.
5. Наноструктурные материалы / Под. ред. Р. Хинингса, А. Хилл. М.: Техносфера (Мир материалов и нанотехнологий), 2009. 488 с.
6. Неорганическое материаловедение: Энциклопед. изд. в 2-х т. Том 1. Основы науки о материалах. Киев: Наукова думка, 2008. 1146 с.
7. Основы геометаллургии / Л. А. Вайсберг, О. В. Кононов, И. Д. Устинов. СПб.: Русская коллекция, 2020. 376 с.
8. Пул Ч., Оуэнс М. Нанотехнологии. М.: Техносфера (Мир материалов и технологий), 2006. 336 с.
9. Сироткин О. С. Основы современного материаловедения. М.: Инфро-М., 2015. 362 с.
10. Смирнов Б. М. Аэрогели // Успехи физических наук, 1987. Т. 152, вып. 1. С. 133—157.
11. Терронис У., Терронис М. Новые формы углерода: Материалы XXI в. // Успехи нанотехнологий: электроника, материалы, структуры / Под ред. Дж. Дэвиса, М. Томпсона. М.: Техносфера, 2011, С. 21—44.
12. Фостер Л. Нанотехнологии. Наука, инновации и возможности. М.: Техносфера, 2008. 352 с.
13. Advanced Functional Porous Materials. From Macro to Nano Scale Lengths. Editors: Utahamon A., Thomas S., Li T., Maria H. Springer, 2022 (In press).
14. Depmeier W. From minerals to materials. In: Materials as Advanced Materials II (Ed. Sergey V. Krivovichev). Springer. 2012. P. 1—11.
15. Kulkarni S., Sulabha K. Nanotechnology: Principles and Practices. Springer, 2015. 379 p.
16. Simovski C., Tretyakov S. An Introduction to Metamaterials and Nanophotonics. Cambridge University Press, 2020. 348 p.

## References

1. Askhabov A. M. *Ot mineralov k novym materialam — dorozhnaya karta mineralogicheskogo materialovedeniya* (From minerals to new materials — a road map of mineralogical materials science). Mineralogy of the Urals, 2011. Proceedings of conference. Miass, Yekaterinburg, pp. 7—9.
2. Wilke K.-T. *Vyrashchivaniye kristallov* (Growing crystals). Leningrad: Nedra, 1977, 600 p.
3. John Pavlus. *Supermolekuly iz superatomov* (Supermolecules from superatoms). In the world of science, 2017, No. 1/2, p. 13.
4. Eliseev A. A., Lukashin A. V. *Funktsionalnyye nanomaterialy* (Functional nanomaterials). Ed. Yu. D. Tretyakova. Moscow: Fizmatlit, 2010.
5. *Nanostrukturnyye materialy* (Nanostructured materials) (Eds. R. Hinings, A. Hill). Moscow: Technosphere (Series "World of materials and nanotechnologies"), 2009, 488 p.
6. *Neorganicheskiye materialovedeniye* (Inorganic materials science). Encyclopedic edition in two volumes. Volume 1. Foundations of Materials Science. Kiev: Naukova Dumka, 2008, 1146 p.
7. *Osnovy geometallurgii* (Fundamentals of Geometallurgy). L. A. Vaisberg, O. V. Kononov, I. D. Ustinov. St. Petersburg: Russian collection, 2020, 376 p.
8. Poole Ch., Owens M. *Nanotekhnologii* (Nanotechnologies). Moscow: Technosphere (series "World of materials and technologies"), 2006, 336 p.
9. Sirotkin O. S. *Osnovy sovremennogo materialovedeniya* (Fundamentals of modern materials science). Moscow: Infro-M, 2015, 362 p.
10. Smirnov B. M. *Aerogeli* (Aerogels). *Uspekhi fizicheskikh nauk* (Achievements of physical sciences), 1987, V. 152, No. 1, pp. 133—157.
11. Terronis U., Terronis M. *Novyye formy ugleroda: Materialy XXI v.* (New forms of carbon: Materials of the 21<sup>st</sup> century). In: *Uspekhi nanoinzhenerii: elektronika, materialy, struktury* (Advances in nanoengineering: electronics, materials, structures). Eds. J. Davis, M. Thompson. Moscow: Tekhnosfera, 2011, pp. 21—44.
12. Foster L. *Nauka, innovatsii i vozmozhnosti* (Nanotechnology. Science, innovations and opportunities). Moscow: Tekhnosfera, 2008, 352 p.
13. Advanced Functional Porous Materials. From Macro to Nano Scale Lengths. Editors: Utahamon A., Thomas S., Li T., Maria H. Springer, 2022 (In press).
14. Depmeier W. From minerals to materials. In: Materials as Advanced Materials II (Ed. Sergey V. Krivovichev). Springer. 2012, pp. 1—11.
15. Kulkarni S., Sulabha K. Nanotechnology: Principles and Practices. Springer, 2015, 379 p.
16. Simovski C., Tretyakov S. An Introduction to Metamaterials and Nanophotonics. Cambridge University Press, 2020, 348 p.

Поступила в редакцию / Received 04.08.2021



## Арктический вектор геологических исследований Arctic vector of geological research

УДК 550.34

DOI: 10.19110/geov.2021.9.3

### Результаты работы Архангельской сейсмической сети за 2016—2020 гг. и ее вклад в сейсмический мониторинг Арктики

**А. П. Турова, Е. Р. Морозова**

Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики  
имени акад. Н. П. Лаверова УрО РАН, Архангельск  
*turova\_ap@fciarctic.ru, Morozova\_ER@fciarctic.ru*

Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова УрО РАН проводит мониторинг западного сектора Российской Арктики на базе Архангельской сейсмической сети (АСС). Представлены сведения о количестве землетрясений, зарегистрированных станциями АСС за 2016—2020 гг., диаграммы распределения числа событий по магнитуде, а также карта пространственного распределения эпицентров землетрясений. Более детально рассмотрен результат работы открывшейся в 2020 г. в составе АСС сейсмической станции Колба в п. г. т. Диксон Таймырского Долгано-Ненецкого района Красноярского края. Полученные результаты демонстрируют вклад Архангельской сейсмической сети в формирование современных представлений о сейсмичности Арктики.

**Ключевые слова:** Архангельская сейсмическая сеть, сейсмический мониторинг, Арктика, землетрясения.

### Operating results of the Arkhangelsk seismic network over the past five years and its contribution to the Arctic seismic monitoring

**A. P. Turova, E. R. Morozova**

N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Arkhangelsk

The Federal Research Center for the Integrated Study of the Arctic named after N. P. Laverov, conducts monitoring of the Western Sector of the Russian Arctic on the basis of the Arkhangelsk Seismic Network (ASN). We presented data on the number of earthquakes registered by ASN stations for 2016—2020, diagrams of the distribution of the number of events by magnitude, and also a map of the spatial distribution of earthquake epicenters. We examined operating results of the Kolba seismic station opened in 2020 as a part of ASN in the Dixon Village of the Taimyr Dolgan-Nenets district of the Krasnoyarsk region of Russia. The obtained results demonstrated the contribution of the Arkhangelsk seismic network to the formation of modern ideas about the Arctic seismicity.

**Keywords:** Arkhangelsk seismic network, seismic monitoring, Arctic, earthquakes.

#### Введение

Расширение представлений о сейсмичности Арктики, уточнение глубинного строения, проведение сейсмического районирования и оценка сейсмической опасности необходимы для безопасного потребления природных ресурсов и общего понимания эволюции развития Арктического бассейна.

В настоящее время на территории Баренцева и Карского морей открыты газовые, газоконденсатные, нефтяные и нефтегазоконденсатные месторождения. В связи с увеличением добычи углеводородов развиваются и грузоперевозки по Северному морскому пути (СМП). Считается, что район СМП в западной части

Российской Арктики асейсмичен. Однако благодаря открытию арктических станций ФГБУН «Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова Уральского отделения РАН» (ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН) районы Белого моря, арх. Новая Земля и Северная Земля можно рассматривать с точки зрения слабой сейсмичности. Акватория Белого моря является частью СМП, а Архангельск — одним из его портов, поэтому данные о сейсмичности региона важны для обеспечения безопасной навигации в акватории Севморпути. В настоящее время мониторинг западного сектора Российской Арктики осуществляется двумя организациями: Кольским филиалом

**Для цитирования:** Турова А. П., Морозова Е. Р. Результаты работы Архангельской сейсмической сети за 2016—2020 гг. и ее вклад в сейсмический мониторинг Арктики // Вестник геонаук. 2021. 9(321). С. 39—44. DOI: 10.19110/geov.2021.9.3.

**For citation:** Turova A. P., Morozova E. R. Operating results of the Arkhangelsk seismic network over the past five years and its contribution to the Arctic seismic monitoring. Vestnik of Geosciences, 2021, 9(321), pp. 39—44, doi: 10.19110/geov.2021.9.3.

ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН» (КоФ ФИЦ ЕГС РАН) [3] и ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН.

В данной работе мы сконцентрируемся на результатах работы Архангельской сейсмической сети (АСС), являющейся частью ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН, благодаря функционированию которой были получены уникальные сведения о сейсмичности арктического шельфа [2]. Проанализируем результаты сейсмического мониторинга западного сектора Российской Арктики, включая район Северного морского пути за 2016–2020 гг.

## Методы и подходы

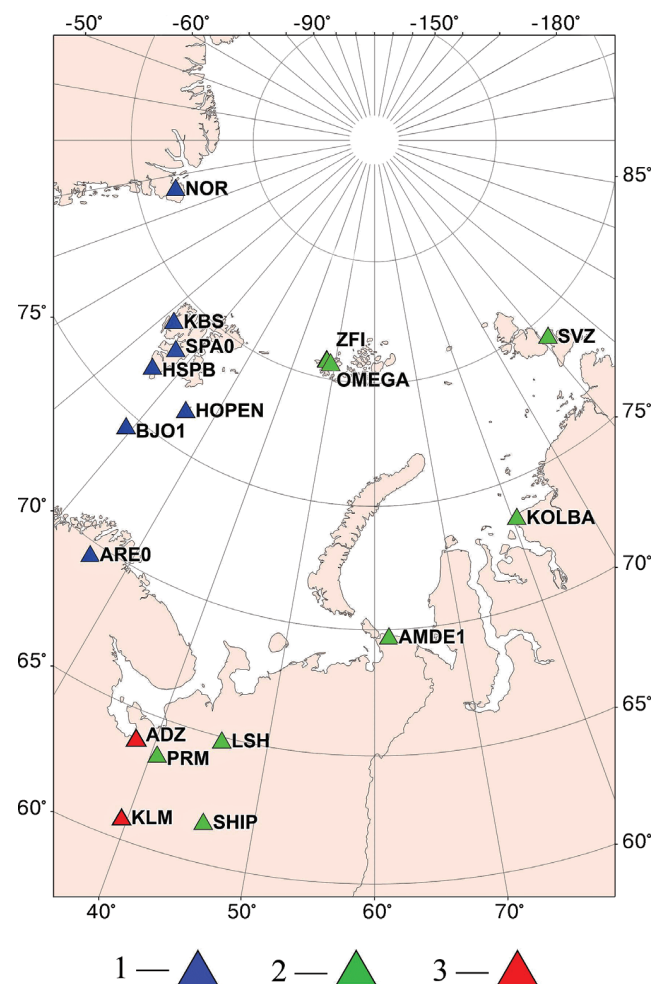
В настоящее время АСС представляет собой группу из 10 пунктов сейсмических наблюдений, два из которых находятся на совместном обслуживании с ФИЦ ЕГС РАН (рис. 1). Как видно на рис. 1, станции

ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН установлены преимущественно в восточной части западного сектора Российской Арктики [6]. Привлекая волновые формы со станций зарубежных сейсмических служб (рис. 1), мы тем самым получаем недостающую информацию для локализации сейсмических событий. Это необходимая процедура, так как арктические землетрясения, как правило, низкомагнитудные и выполнить качественную локацию только станциями АСС не представляется возможным. Арктические землетрясения преимущественно фиксируются следующими станциями АСС: «Амдерма», код AMDE1, «Земля Франца-Иосифа», код ZFI2, «Омега», код OMEGA, «Северная Земля», код SVZ, «Колба», код KOLBA (открыта в октябре 2020 г.).

Все данные со станций АСС поступают на сервер лаборатории сейсмологии ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН, где они конвертируются и поступают в базу данных WSG. Обработка волновых форм производится в программном комплексе WSG [1]. Как правило, для более четкого выделения вступлений объемных волн арктических региональных землетрясений мы используем фильтры 2–8 Гц, 3–6 Гц, 6–10 Гц, а для локальных — 6–8 Гц. В процессе обработки сейсмической информации при необходимости нами привлекаются волновые формы со станций зарубежных сейсмологических служб для повышения точности определения координат эпицентров землетрясений. Обработанные события в дальнейшем включаются нами в сейсмологический каталог. Ежемесячные результаты работы АСС в виде карт размещаются на сайте ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН в соответствующем разделе [5]. Краткая информация по техническому оснащению станций АСС, график работ каждого пункта сейсмических наблюдений приведены в таблице, представленной на сайте ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН [7]. Информация о зарегистрированных арктических землетрясениях ежегодно направляется в Международный сейсмологический центр [8].

На рисунке 2 показаны волновые формы и фрагмент обработки арктического землетрясения магнитудой 3.8, произошедшего 27 января 2018 на архипелаге Новая Земля. Данный пример демонстрирует важность включения в обработку волновых форм других сейсмических станций, не входящих в состав АСС, что в итоге повышает точность локализации события. Землетрясение обработано и включено в сейсмологический каталог ISC [8].

События, которые регистрируются только одной станцией, обрабатываются нами в специализированном программном комплексе EL — разработке коллег из КоФ ФИЦ ЕГС РАН [3]. На рис. 3 показаны волновые формы и фрагмент обработки землетрясения, произошедшего 22 октября 2020 г. [7]. Из всех сейсмических станций, функционирующих на территории Российской Арктики, данное событие было зарегистрировано только станцией KOLBA. Положение эпицентра определено в акватории Карского моря на расстоянии 190 км. Событие является слабым и имеет локальную магнитуду  $M_L = 1.7$ .



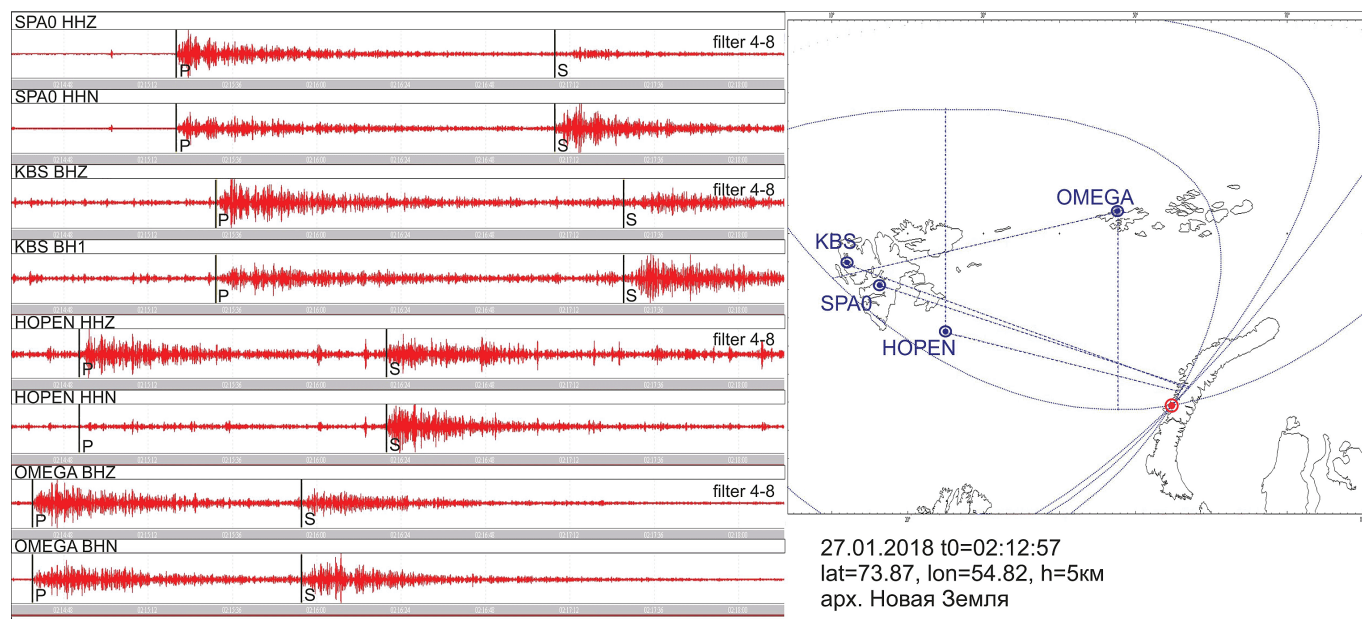
**Рис. 1.** Расположение сейсмических станций, волновые формы которых используются нами для обработки землетрясений:

1 — зарубежные сейсмические станции, 2 — станции ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН, 3 — станции на совместном обслуживании ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН и ФИЦ ЕГС РАН

**Fig. 1.** Location of seismic stations, the waveforms of which we use to process earthquakes:

1 — foreign seismic stations, 2 — stations of FICIKIA UrB RAS, 3 — stations in cooperation with FRC GS RAS





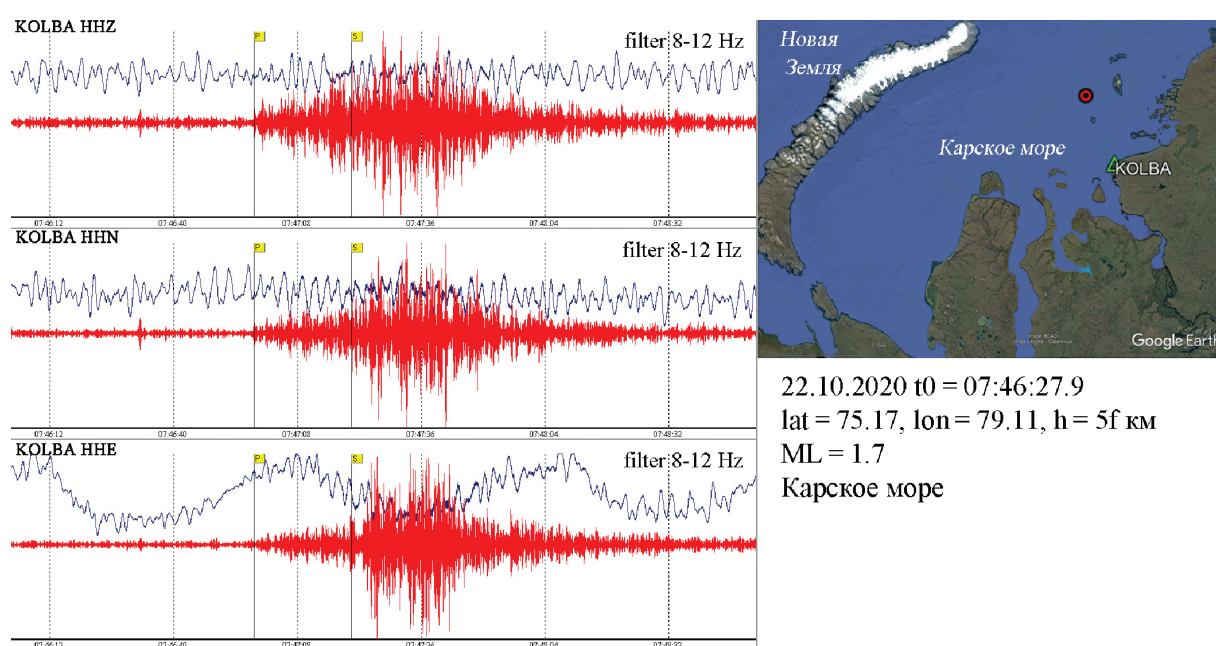
**Рис. 2.** Волновые формы и фрагмент обработки землетрясения, произошедшего на архипелаге Новая Земля  
**Fig. 2.** Waveforms of the earthquake occurred in the Novaya Zemlya Archipelago

### Результаты и обсуждение

За период с 2016 по 2020 гг. в исследуемом районе было зарегистрировано 2020 землетрясений, из которых 1987 региональных и 33 локальных. Землетрясения приурочены к различным геологическим структурам Евро-Арктического региона (рис. 4). В таблице приведена информация о распределении количества региональных и локальных землетрясений по годам, зарегистрированных арктическими станциями АСС, а на рисунке 5 — диаграмма распределения событий по различным геолого-тектоническим структурам и количества событий по магнитуде.

Из таблицы видно, что станции AMDE1, ZFI2, OMEGA и SVZ регистрируют множество региональных событий, внося тем самым немалый вклад в сейсмический мониторинг Арктики. Тем не менее для более глубокого и детального изучения необходимо расширять сейсмическую сеть.

На рисунке 4 представлен вклад АСС в сейсмический мониторинг Арктики за 2016—2020 гг. (рис. 4, b) в сравнении с аналогичными результатами, полученными за тот же период при функционировании только зарубежных станций (рис. 4, a). Информация для анализа была взята из каталога NORSAR [9]. На рисун-



**Рис. 3.** Волновые формы и фрагмент обработки землетрясения, произошедшего в Карском море  
**Fig. 3.** Waveforms and fragment of the processing of the earthquake occurred in the Kara Sea

Количество землетрясений, зарегистрированных в 2016–2020 гг. арктическими станциями  
Архангельской сейсмической сети

Number of earthquakes registered in 2016–2020 arctic stations of the Arkhangelsk seismic network

| Арктические станции ACC<br>ASN Arctic stations | 2016 |     | 2017 |     | 2018 |     | 2019 |     | 2020 |     |
|------------------------------------------------|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|
|                                                | REG  | LOC | REG  | LOC | REG  | LOC | REG  | LOC | REG  | LOC |
| AMDE1                                          | 17   | 0   | 26   | 1   | 14   | 0   | 0    | 0   | 24   | 0   |
| ZFI2<br>OMEGA                                  | 323  | 6   | 319  | 5   | 373  | 3   | 393  | 7   | 259  | 0   |
| SVZ                                            | 5    | 0   | 63   | 1   | 111  | 1   | 33   | 0   | 24   | 1   |

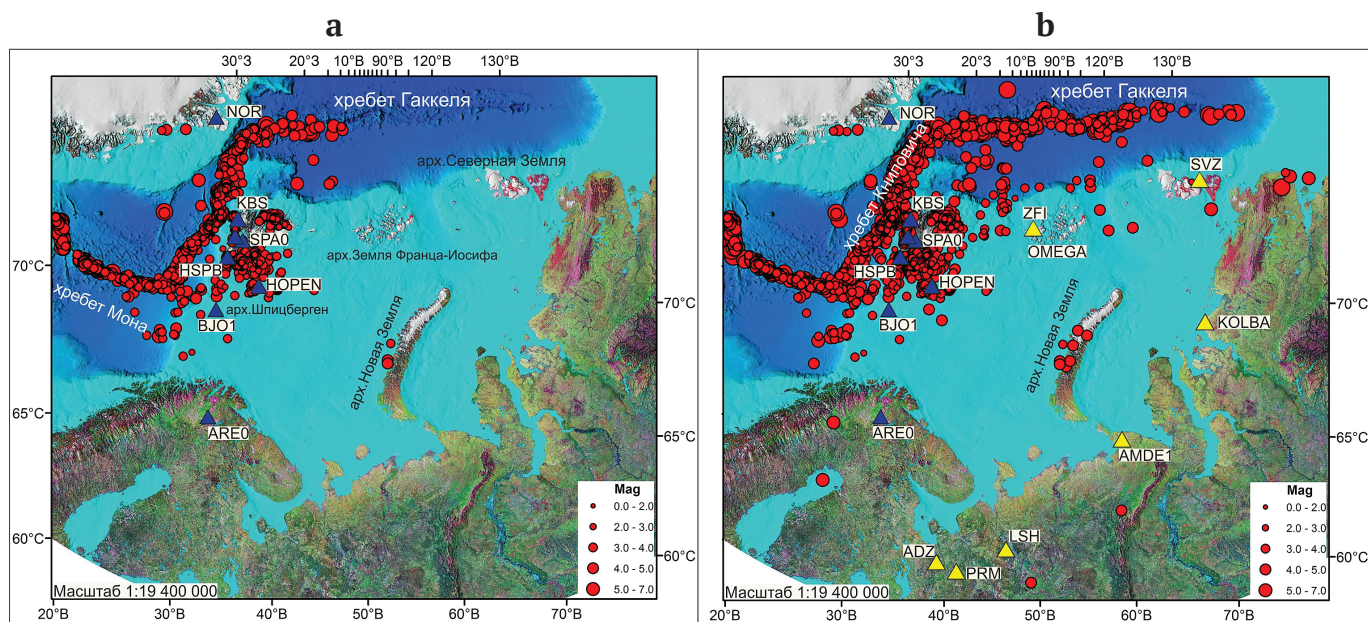


Рис. 4. Карты пространственного распределения эпицентров землетрясений за 2016–2020 гг.:

*a* — зарегистрированных зарубежными станциями, *b* — зарегистрированных станциями Архангельской сейсмической сети совместно с зарубежными станциями

Fig. 4. Maps of the spatial distribution of earthquake epicenters for 2016–2020:

*a* — registered by foreign stations, *b* — registered by stations of the Arkhangelsk seismic network in cooperation with foreign stations

ке видно, что благодаря функционированию АСС появляется дополнительная информация о сейсмичности хребта Гаккеля, Баренцево-Карского шельфа, района арх. Новая Земля.

Анализ диаграммы показывает, что максимальное количество землетрясений происходит в районе арктических хребтов Книповича и Гаккеля, примерно в половину меньше — в районе архипелага Шпицберген. Незначительное число землетрясений регистрируется вблизи хребта Мона, на шельфе Баренцева и Гренландского морей, желобе Франц-Виктория. Единичные землетрясения приурочены к поднятию Белый и Виктория, архипелагу Новая Земля и желобу Святой Анны. За анализируемый период сильнейшее землетрясение зарегистрировано в Гренландском море 11.08.2018 г., его магнитуда составила  $m_b = 7.5$ .

Диаграмма распределения событий по магнитуде (рис. 5, b) показывает, что из 2020 зарегистрированных событий за 2016–2020 гг. 152 имеют магнитуду 2.0, 1405 — магнитуду 3.0, 294 — магнитуду 4.0, 105 — магнитуду 5.0 и 25 событий произошли с магнитудой 6.0 и более.

### Сейсмическая станция KOLBA

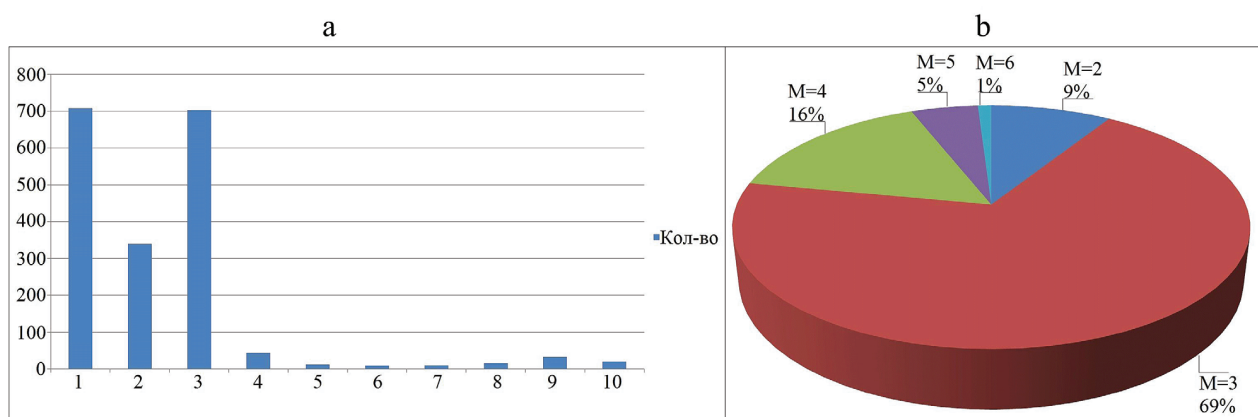
Рассмотрим отдельно первые результаты работы сейсмической станции KOLBA, открытой 11 октября 2020 г. в п. г. т. Диксон Таймырского Долгано-Ненецкого района Красноярского края России.

Пункт сейсмических наблюдений имеет высокочувствительную сейсмическую аппаратуру: сейсмометр TC-120s и регистратор Centaur фирмы Nanometrics. На сервер лаборатории сейсмологии ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН данные поступают по SeedLink-протоколу через сеть Интернет. Несмотря на то, что сейсмическая станция (с/с) KOLBA начала свою работу совсем недавно, уже есть первые результаты.

К примеру, за период 11.10.2020–31.03.2021 с/с KOLBA было зарегистрировано 93 региональных и 3 локальных сейсмических события. Региональные события, произошедшие на расстояниях свыше 1000 км, наилучшим образом выделяются с использованием фильтров 1.5–3 Гц и 2–4 Гц, а на более близких расстояниях — 4–6 Гц и 4–8 Гц.

Помимо землетрясений с/с KOLBA регистрирует и техногенные события, связанные с промышленной деятельностью вблизи г. Норильска. Пример волновых форм и фрагмент обработки техногенного события представлен на рис. 6.



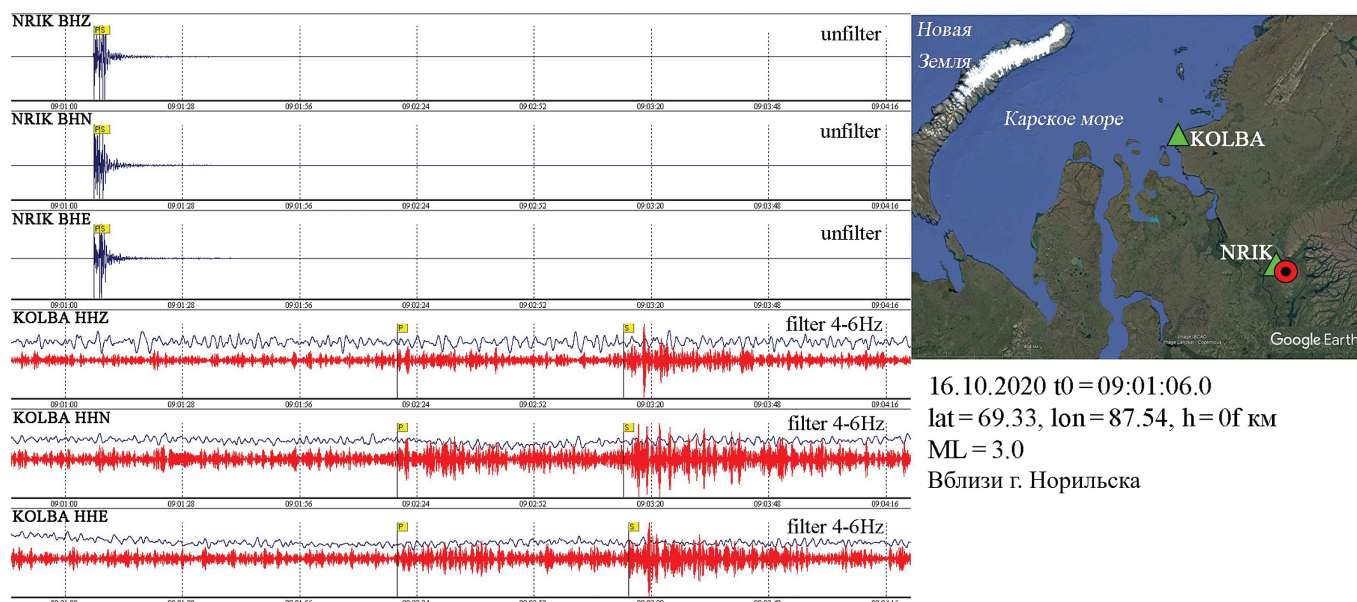


**Рис. 5.** Диаграммы распределения числа событий:

**a** — по геолого-тектоническим структурам: 1 — хребет Книповича, 2 — архипелаг Шпицберген, 3 — хребет Гаккеля, 4 — хребет Мона, 5 — желоб Святой Анны, 6 — поднятие Белый и Виктория, 7 — архипелаг Новая Земля, 8 — желоб Франц-Виктория, 9 — Баренцево море, 10 — Гренландское море; **b** — по магнитуде (в процентном соотношении)

**Fig. 5.** Diagram of the spatial distribution of the number of events:

**a** — relative to geological and tectonic structures :1 — Knipovich Ridge, 2 — Svalbard Archipelago, 3 — Gakkel Ridge, 4 — Mohn Ridge, 5 — St. Anne Trough, 6 — Bely and Victoria Rise, 7 — Novaya Zemlya Archipelago, 8 — Franz-Victoria Trough, 9 — Barents Sea, 10 — Greenland Sea, **b** — by magnitude (in percentage)



**Рис. 6.** Пример волновых форм и фрагмент обработки техногенного события

**Fig. 6.** Example of waveforms and fragment of processing a technogenic event

Событие произошло 16.10.2020 (t0 = 09:01:06, lat — 69.33, lon — 87.54, mb = 3.0). Для определения локации и выяснения природы подобного рода событий были запрошены данные Норильской с/с NRIK. Событие лоцируется в районе добывающего предприятия «Норильский никель», а значит, с большой вероятностью имеет техногенную природу. Несмотря на то, что в обработке участвовали всего лишь две станции, проведена наиболее возможная локация за счет уверенного определения азимутального направления по записям с/с NRIK.

## Выводы

Представленные результаты демонстрируют важность работы Архангельской сейсмической сети в фор-

мировании современных представлений о сейсмичности Арктики. Большая часть землетрясений имеют магнитуду 3.0 и происходят в районах срединно-океанических хребтов и Свальбардского поднятия. Выявлена современная сейсмичность на границе континентального шельфа, в районах арктических желобов и архипелага Новая Земля, фиксируются события в Белом море и в районах прохождения Северного морского пути. События с магнитудой 4.0—5.0, как правило, приурочены к арктическим хребтам.

Землетрясение, произошедшее в Карском море (одно из морей, через которое пролегает СМП), считающееся асейсмичным районом, подчеркивает необходимость расширения сетей сейсмических наблюдений в российском секторе Арктики.



Каждая новая сейсмическая станция не только позволяет улучшить локацию арктических землетрясений, но и дает возможность включить их в сейсмический каталог, так как всё еще существенная часть арктических землетрясений регистрируется максимум двумя станциями. Известно, что для включения события в сейсмический каталог необходимо, чтобы оно было зарегистрировано минимум тремя станциями. Поэтому, несмотря на полученные результаты, необходимо дальнейшее проведение сейсмических исследований в Арктике.

Работа выполнена при частичной поддержке темы НИР лаборатории сейсмологии, № государственной регистрации АААА-А18-118012490072-7 и гранта «Молодые ученые Поморья» № 10-2021а.

## Литература

1. Акимов А. П., Пойгина С. Г., Красилов С. А. Функциональные возможности программы WSG Обнинск: ЦОМЭ ГС РАН, 2006. 12 с.
2. Антоновская Г. Н., Рогожин Е. А., Капустян Н. К., Конечная Я. В., Федоренко И. В. Задачи и перспективы развития сейсмических наблюдений в Арктике // Развитие систем сейсмологического и геофизического мониторинга природных и техногенных процессов на территории Северной Евразии: Материалы междунар. конф., посвящ. 50-летию открытия Центр. геофиз. обсерватории в г. Обнинске / Отв. ред. А. А. Маловичко. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. 9 с.
3. Асминг В. Э. Программный комплекс для автоматизированной обработки сейсмических записей «EL» // Приборы и методика геофизического эксперимента. Мурманск: Изд. ОСЮ «МИП-999», 1997. С. 125—132.
4. Единая геофизическая служба РАН. Режим доступа: <http://www.gsras.ru/new/ssd.htm>.
5. Уникальная научная установка «Архангельская сейсмическая сеть». URL: <http://fciaarctic.ru/index.php?page=geoss> (дата обращения 26.05.2021).
6. Юдахин Ф. Н., Морозов А. Н., Конечная Я. В. Возможности архангельской сейсмической сети для мониторинга арктического региона // Геофизические исследования. 2012. Т. 13. № 3. С. 74—84.
7. Equipment information. URL: <http://fciaarctic.ru/index.php?page=map>. (дата обращения 26.05.2021).
8. ISC Bulletin: event catalogue search. URL: <http://www.isc.ac.uk/> (дата обращения 19.05.2021).
9. Seismic Bulletins. URL: <https://www.norsar.no/extranet/bulletins/> (дата обращения: 14.05.2021).

## References

1. Akimov A. P., Pojgina S. G., Krasilov S. A. *Funkcionalnye vozmozhnosti programmy WSG* (Functionality of WSG program). Obninsk, COME GS RAN, 2006, 12 pp.
2. Antonovskaya G. N., Rogozhin E. A., Kapustyan N. K., Konechnaya Y. V., Fedorenko I. V. *Zadachi i perspektivy razvitiya seismicheskikh nablyudenij v Arktike* (Development of systems for seismological and geophysical monitoring of natural and man-made processes in Northern Eurasia). Proceedings of conference. Ed. A. A. Malovichko, Obninsk: FRC EGS RAS, 2017, 9 pp.
3. Asming V. E. *Programmnyj kompleks dlya avtomatizirovannoj obrabotki seismicheskikh zapisej «EL»* (Software complex for automated processing of seismic records «EL»). *Pribory i metoda geofizicheskogo eksperimenta* (Equipment and methods for geophysical experiment). Murmansk, MIP-999, 1997, pp.125—132.
4. *Edinaya geofizicheskaya sluzhba RAN* (United geophysical survey of RAS) URL: <http://www.gsras.ru/new/ssd.htm>
5. *Unikalnaya nauchnaya ustanovka «Arhangel'skaya seismicheskaya set»* (Unique scientific Archangelsk seismic network). Electronic resource. Access mode <http://fciaarctic.ru/index.php?page=geoss> (on 26.05.2021).
6. Yudahin F. N., Morozov A. N., Konechnaya Y. V. *Vozmozhnosti arhangel'skoj seismicheskoy seti dlya monitoringa arkticheskogo regiona* (Possibilities of the Arkhangelsk seismic network for monitoring the Arctic region). *Geofizicheskie issledovaniya* (Geophysical researches). V.13, No. 3, 2012, pp.74—84.
7. Equipment information. URL: <http://fciaarctic.ru/index.php?page=map>. (accessed 26.05.2021).
8. ISC Bulletin: event catalogue search. URL: <http://www.isc.ac.uk/> (accessed 19.05.2021).
9. Seismic Bulletins. URL: <https://www.norsar.no/extranet/bulletins/> (accessed 14.05.2021).

Поступила в редакцию / Received 23.07.2021



## Неизвестное письмо Л. А. Попугаевой из архива профессора Д. П. Григорьева

Ю. Л. Войтеховский

Российское минералогическое общество  
Геологический институт ФИЦ КНЦ РАН, Апатиты  
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург  
*Voytekhevskiy\_YuL@pers.spmi.ru*

В статье публикуются ранее неизвестные документы о Л. А. Попугаевой из личного архива профессора Д. П. Григорьева, хранящиеся в комиссии по истории Российского минералогического общества: ее письмо из Нюрбы от 5 августа 1956 года, письмо из ВСЕГЕИ с просьбой о руководстве аспиранткой Л. А. Попугаевой, письмо из ЦНИЛКС с просьбой о консультации за подписью самой Л. А. Попугаевой, а также повестки о заседаниях Минералогического общества и защитах диссертаций по алмазной проблеме. Все документы оригинальны, атрибутированы и хронологически соотнесены с ранее опубликованными документами. Они весьма ценны для истории минералогии как фактические свидетельства далеких событий. В первую очередь документы отмечают основные этапы жизни и научной деятельности выдающегося геолога, первооткрывателя коренных алмазов в Якутии Л. А. Попугаевой. Во-вторых, они показывают ее активную деятельность на последнем профессиональном поприще — при изучении камнесамоцветного сырья северо-запада России, главным образом Кольского полуострова. Статья приурочена к дате безвременной гибели Л. А. Попугаевой.

**Ключевые слова:** Л. А. Попугаева, Д. П. Григорьев, Нюрба, ВСЕГЕИ, ЦНИЛКС, ВНИИювелирпром, камнесамоцветное сырье.

## Unknown letter of L. A. Popugaeva from the archive of Professor D. P. Grigoriev

Yu. L. Voytekhevsky

Russian Mineralogical Society  
Geological Institute of FRC KSC RAS, Apatity  
Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg

The article publishes previously unknown documents about L. A. Popugaeva from the personal archive of Professor D. P. Grigoriev, stored in the Commission on the History of the Russian Mineralogical Society: her letter from Nyurba dated August 5, 1956, a letter from VSEGEI with a request for guidance of a graduate student L. A. Popugaeva, a letter from CNILKS with a request for consultation signed by L. A. Popugaeva herself, as well as agendas for meetings of the Mineralogical Society and dissertations on the diamond problem. All documents are original, attributed and chronologically correlated with previously published documents. They are very valuable for the history of mineralogy as actual evidence of distant events. First of all, the documents mark the main stages of the life and scientific activity of an outstanding geologist, the discoverer of indigenous diamonds in Yakutia, L. A. Popugaeva. Secondly, they show her activity in the last professional field — the study of gemstone raw materials of the North-West Russia, mainly the Kola Peninsula. The article is dedicated to the date of the untimely death of L. A. Popugaeva.

**Keywords:** L. A. Popugaeva, D. P. Grigoriev, Nyurba, VSEGEI (All-Union Geological Institute), VNIYuvelirprom (Institute of Jewelry Industry), CNILKS (Central Laboratory of Research of semiprecious stones), semi-precious raw materials.

### Введение

19 сентября 1977 г. на углу Лахтинской улицы и Большого проспекта Петроградской стороны (рис. 1), возвращаясь с работы из ВНИИЮвелирпрома, трагически закончила свой жизненный маршрут Л. А. Попугаева, первооткрывательница коренных алмазов в Якутии.

«В двухэтажном доме № 25а расположился единственный в стране Всесоюзный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт ювелирной промышленности. Он был создан в 1966 г. в производственно-техническом объединении «Русские са-

моцветы» на базе более трех десятков мелких разрозненных полукустарных организаций, занимавшихся обработкой цветных камней» [4, с. 331]\*. Сегодня тут частная территория за железными воротами, во двор не пускают, на месте бывшей проходной — кафе (рис. 2).

\* Это была Центральная научно-исследовательская лаборатория камнесамоцветного сырья (ЦНИЛКС). Именно Л. А. Попугаева договорилась в Москве с А. Н. Косыгиным — Председателем Совета Министров СССР — о преобразовании ЦНИЛКС в ВНИИЮвелирпром.

**Для цитирования:** Войтеховский Ю. Л. Неизвестное письмо Л. А. Попугаевой из архива профессора Д. П. Григорьева // Вестник геонаук. 2021. 9(321). С. 45–51. DOI: 10.19110/geov.2021.9.4.

**For citation:** Voytekhevsky Yu. L. Unknown letter of L. A. Popugaeva from the archive of professor D. P. Grigoriev. Vestnik of Geosciences, 2021, 9(321), pp. 45–51, doi: 10.19110/geov.2021.9.4.



Рис. 1. Здесь закончила свой маршрут геолог Л. А. Попугаева

Fig. 1. Geologist L. A. Popugaeva finished her route here

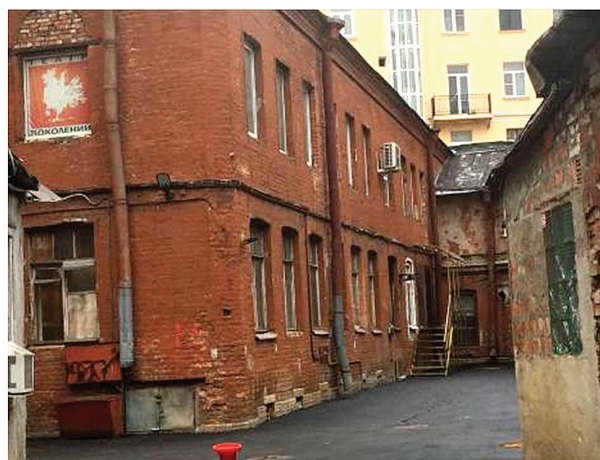


Рис. 2. Здесь был ВНИИювелирпром

Fig. 2. «Yuvelirprom» Institute was here

Единственная в Санкт-Петербурге мемориальная доска в честь Л. А. Попугаевой установлена на стене школы № 267 по адресу ул. Подольская, 2 (рис. 3, а). Кроме того, в Горном университете сохранился уникальный витраж, изготовленный с ее участием в пору, когда она уже была отставлена от алмазной тематики и изучала месторождения цветного камня (рис. 3, б)\*. Поток студентов шумно течет мимо. Про витраж знают немногие, в основном пожилые сотрудники университета.

Жизненный путь Л. А. Попугаевой описан во многих книгах и статьях [7, 12, 13, 15]. Но каждый новый документ представляется ценным, особенно в преддверии приближающегося столетия со дня рождения известного геолога. Цель этой статьи — ввести в оборот истории минералогии как научной дисциплины ранее неизвестные документы об отечественной алмазной эпопее середины XX века.

### Архив профессора Д. П. Григорьева

В комиссии по истории РМО хранится архив профессора Д. П. Григорьева, состоящий из двух частей —

\* За изобретение витражей этого типа Л. А. Попугаева получила авторское свидетельство.

переписка и фотографии. Первоначально письма были разложены по папкам в хронологическом порядке. На сегодня они структурированы по авторам, а в отдельных случаях — по исторически значимым темам, в том числе по теме открытия коренных алмазов в Якутии. К сожалению, Д. П. Григорьев обычно не сохранял почтовые конверты. В то же время авторы писем, подчас очень интересных, обсуждавшие вопросы онтогении минералов, часто ограничивались неразборчивой подписью и ставили дату. В итоге немалое количество писем атрибутировать не удалось. Поиск авторов самых информативных писем ведется путем сравнения почерков. Архив фотографий на сегодня разобран частично.

### Результаты и обсуждение

По теме открытия коренных алмазов в Якутии наиболее интересно письмо Л. А. Попугаевой из пос. Нюрба от 5 августа 1956 г. (рис. 4, стиль и пунктуация здесь и далее сохранены).

«Здравствуйте, уважаемый Дмитрий Павлович! Так уж мне не везет во всех моих начинаниях, что и сказать трудно. Лопнула моя страстная мечта попасть к Вам в аспирантуру. Лопнула моя поездка в Ленинград... Зимой правда я вырывалась домой месяца на 2, но было так не-







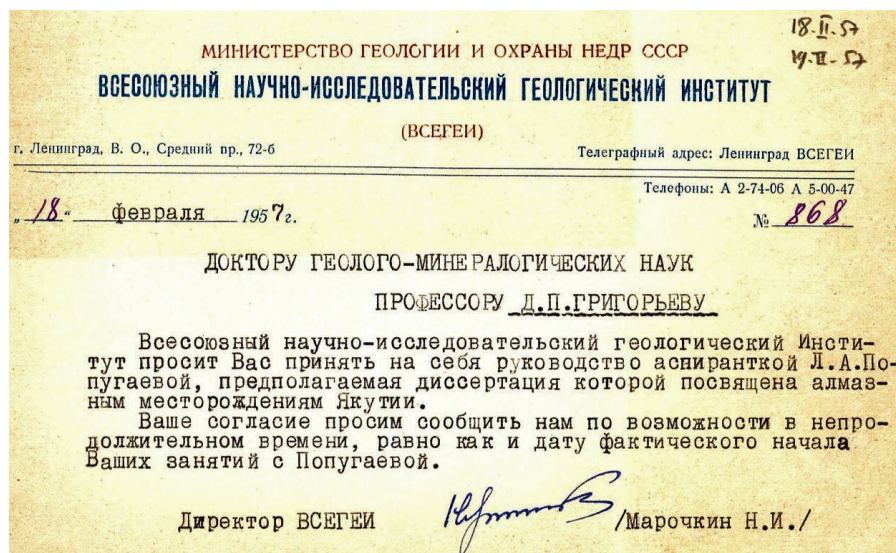


Рис. 5. Письмо из ВСЕГЕИ от 18 февраля 1957 г.

Fig. 5. Letter from VSEGEI dated February 18, 1957.

как и везде, доступна в любое время. Кстати — для геологов изменено время экзаменов, которые перенесены на апрель.

Позвольте посоветовать Вам не ожидать работы над диссертацией, а постепенно обрабатывать имеющийся у Вас материал и публиковать (подчеркнуто автором — Ю. В.) его без всякой задержки. Любые наблюдения по минералогии и геологии Ваших месторождений представляют огромный научный интерес. Большая благодарность за обещание поделиться со мной образцами минералов и пород. Пожалуйста, сделайте это при первой же возможности. Буду ждать Ваших подарков с исключительным нетерпением, т. к. они очень нужны для преподавания. По моей просьбе М. А. Гневушев прислал мне эффектные фотографии алмаза в кимберлите. Но у Вас есть, конечно, ещё лучшие.

Я только вчера вернулся из поездки (четвёртой в этом году). На этот раз был в Закавказье, проделал большой маршрут на автомашине — более 1200 км, осматривая сначала месторождения агата и его спутников, а затем медно-молибденовые месторождения. Собрал изумительную коллекцию (около 500 кг). Желаю Вам полного здоровья, отличного настроения и успехов в работе! Ваш Д. П. Григорьев (подпись).

Замечу, что манере «постепенно обрабатывать имеющийся <...> материал и публиковать его без всякой задержки» Л. А. Попугаева следовала, годом ранее опубликовав статью с Н. Н. Сарсадских [5]. Эта статья важна в алмазной истории, ибо показывает, что женщины-геологи смогли на время наладить рабочие отношения\*.

Следующий документ — письмо из ВСЕГЕИ (рис. 5). «18 февраля 1957 г. Доктору геолого-минералогических наук профессору Д. П. Григорьеву. Всесоюзный научно-исследовательский геологический институт просит Вас принять на себя руководство аспиранткой Л. А. Попугаевой, предполагаемая диссертация которой по-

священа алмазным месторождениям Якутии. Ваше согласие просим сообщить нам по возможности в непродолжительном времени, равно как и дату фактического начала Ваших занятий с Попугаевой. Директор ВСЕГЕИ (подпись) Марочкин Н. И.»

Таким образом, страстная мечта Л. А. Попугаевой попасть в аспирантуру к Д. П. Григорьеву «не лопнула». Казалось бы, все устроилось к лучшему. Сохранилась фотография, на которой беседуют они и трое неизвестных (рис. 6). Место и дата точно не установлены, предположительно — кафедра минералогии ЛГУ [14]. В 1958—1960 гг. Л. А. Попугаева была аспиранткой Д. П. Григорьева, но потом их отношения разладились\*\*. Некоторые воспоминания об этом есть в статье [16]. Кандидатская диссертация была защищена по камне-



Рис. 6. Д. П. Григорьев, Л. А. Попугаева и трое неизвестных

Fig. 6. D. P. Grigoriev, L. A. Popugayeva and three unknown people

\*\* Л. А. Попугаева поступила в аспирантуру к чл.-корр. АН СССР, профессору П. М. Татаринovu на кафедру геологии месторождений полезных ископаемых. Но ее интересы склонялись к минералогии, и она перешла к профессору Д. П. Григорьеву. Он был замечательным ученым и руководителем, но тяжелым в общении. А тут — фронтовичка с жестким характером... Творческого тандема не получилось.

\* Статья написана после подготовки осенью 1955 г. совместного отчета по теме ВСЕГЕИ. К сожалению, конфликт исчерпан не был, и не по вине Л. А. Попугаевой. См. также [10].



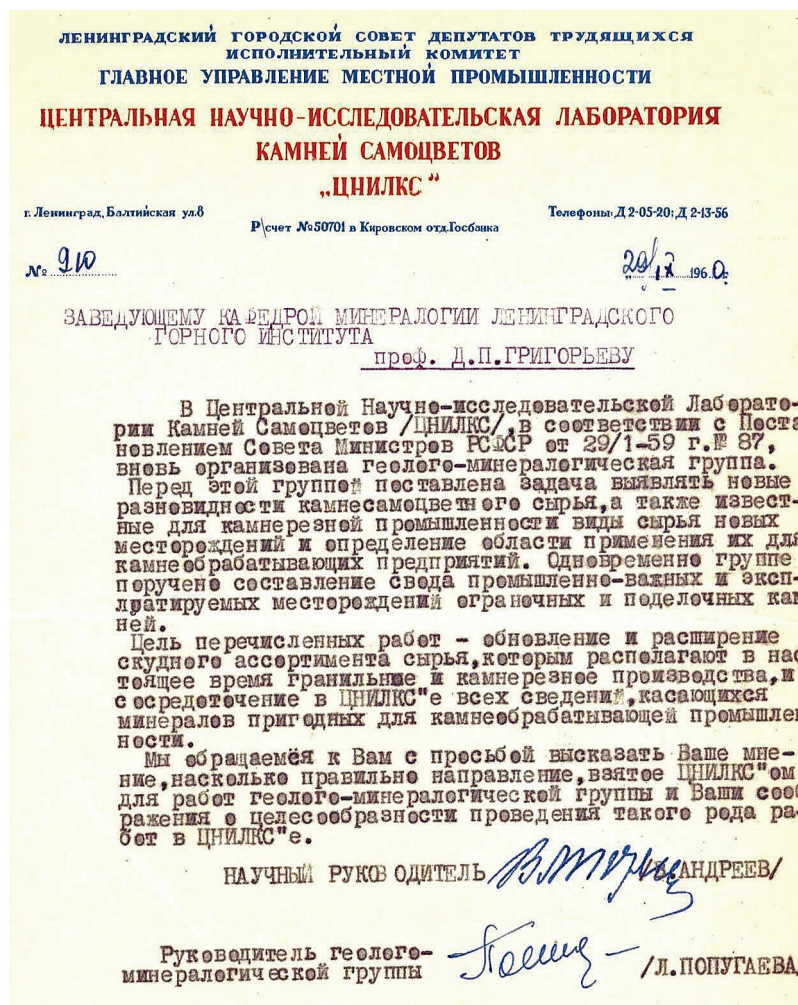


Рис. 7. Письмо из ЦНИЛКС от 29 сентября 1960 г.

Fig. 7. Letter from CNILKS dated September 29, 1960.

самоцветной тематике в Ленинградском горном институте в 1970 г. [3]\*.

Еще один документ — письмо из ЦНИЛКС от 29 сентября 1960 г. (рис. 7), отмечающее последний этап жизни Л. А. Попугаевой.

«Заведующему кафедрой минералогии Ленинградского горного института Д. П. Григорьеву. В Центральной Научно-исследовательской Лаборатории Камней Самоцветов /ЦНИЛКС/, в соответствии с Постановлением Совета Министров РСФСР от 29/1—59 г. № 87, вновь организована геолого-минералогическая группа. Перед этой группой поставлена задача выявлять новые разновидности камнесамоцветного сырья, а также известные для камнерезной промышленности виды сырья новых месторождений и определение области применения их для камнеобрабатывающих предприятий. Одновременно группе поручено составление свода промышленно-важных и эксплуатируемых месторождений ограночных и поделочных камней. Цель перечисленных работ — обновление и расширение скудного ассортимента сырья, которым располагают в настоящее время гранильные и камнерезные производства, и сосредото-

чение в ЦНИЛКСе всех сведений, касающихся минералов пригодных для камнеобрабатывающей промышленности.

Мы обращаемся к Вам с просьбой высказать Ваше мнение, насколько правильно направление, взятое ЦНИЛКСом для работ геолого-минералогической группы и Ваши соображения о целесообразности проведения такого рода работ в ЦНИЛКСе.

Научный руководитель (подпись) В. Андреев.

Руководитель геолого-минералогической группы (подпись) Л. Попугаева.

Активность Л. А. Попугаевой в изучении камнесамоцветного сырья северо-запада России хорошо известна. Только на Кольском полуострове ее группой изучены и введены в оборот аметисты, амазониты, астрофиллиты, кианиты, эвдиалиты, тингуаиты, хибиниты, уртиты и фойяиты. Это лишь те минералы и горные породы, которые упомянуты в найденных нами документах [1, 17].

Авторитет Д. П. Григорьева в области камнесамоцветного сырья подтверждает письмо из ВНИИювелирпрома от 28 марта 1968 г.: «Ректору Ленинградского горного института им. Плеханова Г. В. профессору тов. Келль Л. Н. Копия: зав. кафедрой минералогии профессору тов. Григорьеву Д. П. По просьбе ВНИИювелирпрома профессор Ленинградского горного института Григорьев Д. П. включен в состав Научно-Технического Совета

\* В том же году с большим опозданием Л. А. Попугаева получила диплом и знак «Первооткрыватель месторождения». Помогло вмешательство министра геологии А. В. Сидоренко.



института. Приказом начальника Главювелирпрома Министерства приборостроения СА и СУ кандидатура профессора Григорьева Д. П. члена НТС ВНИИювелирпрома утверждена. Просим Вас дать возможность профессору Григорьеву Д. П. посещать НТС ВНИИювелирпрома. О сроках созыва НТС институт своевременно поставит Вас в известность. Директор ВНИИювелирпрома, к. т. н. (подпись) Н. Белоглазов».

Л. А. Попугаева к алмазной теме больше не возвращалась. А тема остается одной из самой ярких во всех аспектах: кристаллография, минералогия, петрология, геология месторождений, геохимия. Об активности обсуждений в те годы говорят хранящиеся в архиве повестки.

«27.02.1957 в ауд. 100 ЛГИ состоится годовое заседание Минералогического общества. Повестка: <...> 4. Крутойарский М. А. О новых находках алмазоносных кимберлитов в Якутии (басс. р. Оленек)».

«ВСЕГЕИ. 20.01.1959. Направляем Вам для ознакомления автореферат диссертации сотрудницы Сарсадских Наталии Николаевны, представляемой на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. Защита диссертации намечается на 27.02.1959. Ученый секретарь ВСЕГЕИ: Беляев».

«17.03.1960 в ауд. 358 ЛГИ состоится заседание Минералогического общества. Повестка: Ровша В. С. и д. чл. Сарсадских Н. Н. О генезисе минералов-спутников алмазов в кимберлитах».

«01.12.1960 в ауд. 358 ЛГИ состоится заседание Минералогического общества. Повестка: <...> 2. Д. чл. Крутойарский М. А., д. чл. Милашев В. А. и д. чл. Рабкин М. И. Классификация кимберлитовых пород Якутии и некоторые вопросы их генезиса».

«ЛГУ. 10.11.1961. Направляем Вам для ознакомления автореферат диссертации т. Милашева В. А., представленной на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. Защита диссертации намечена на середину декабря. Ваши замечания по автореферату просим сообщить. Ученый секретарь геологического ф-та университета А. Ф. Рагозин».

«27.02.1964 в ауд. 358 ЛГИ состоится заседание Минералогического общества. Повестка: <...> 2. Д. чл. Сарсадских Н. Н., Арцыбашева Т. Ф., Благулькина В. А., Ровша В. С. Вещественный состав кимберлитов и их алмазоносность. 3. Д. чл. Милашев В. А. Факторы алмазоносности кимберлитовых пород»...

## Заключение

Таким образом, изучение личного архива профессора Д. П. Григорьева позволило ввести в оборот истории минералогии как научной дисциплины ряд документов, освещающих жизнь и профессиональную деятельность Л. А. Попугаевой, первооткрывательницы коренных алмазов в Якутии. Эта эпопея столь важна в истории отечественной геологии, что все документы представляют интерес. Письмо Л. А. Попугаевой из пос. Нюрба от 5 августа 1956 г. согласовано с ранее опубликованным ответом Д. П. Григорьева от 25 августа 1956 г. Его архив, насчитывающий несколько сотен фото выдающихся отечественных и зарубежных минералогов, ставит перед исследователями новую задачу. Готовил ли он материалы для объемной монографии? Свидетельств за или против пока нет.

Заслуженные государственные награды Л. А. Попугаева получила даже не во вторую, а в третью очередь. Но история все расставила на свои места. Спросите любого о том, кто открыл коренные алмазы в Якутии, и он (если в теме) уверенно ответит: Л. А. Попугаева. При этом ясно, что великое множество геологов было вовлечено в алмазную эпопею до и после открытия «Зарницы». Есть мнение, будто отлучение Л. А. Попугаевой от алмазной проблемы означало дисквалификацию. Никоем образом! Документы подтверждают, что она и в новой проблеме показала себя крепким профессионалом, организатором и радетелем за дело. Хочется верить, что работа с самоцветами продлила быение уставшего сердца, преждевременно остановившегося на углу Лахтинской улицы и Большого проспекта Петроградской стороны 19 сентября 1977 года.

Автор благодарит к. т. н. М. А. Чукаеву за помощь в упорядочении архива профессора Д. П. Григорьева и рецензентов за рекомендации, сделавшие изложение более полным.

## Литература

1. Войтеховский Ю. Л. О пригодности амазонита, кинита, тингуайта, хибинита, уррита и фоййита Кольского п-ова для камнерезных и ювелирных изделий // Тиетта. 2012. № 2. С. 46—50.
2. Войтеховский Ю. Л. Примечания к статье В. Е. Семенова // Тиетта. 2014. № 3. С. 67—68.
3. Попугаева Л. А. Исследование некоторых видов камнесамоцветного сырья и перспективы его использования в отечественной ювелирной промышленности. Л.: ЛГИ, 1970. 63 с.
4. Привалов В. Улицы Петроградской стороны. Дома и люди. М.: Центрполиграф, 2013. 749 с.
5. Сарсадских Н. Н., Попугаева Л. А. Новые данные о проявлении ультраосновного магматизма на Сибирской платформе // Разведка и охрана недр. 1955. № 5. С. 11—20.
6. Семенов В. Е. Из переписки Л. А. Попугаевой // Тиетта. 2014. № 3. С. 62—67.
7. Силаев В. И. Зарница над Сибирской диамантиной // Уральский геол. журнал. 2007. № 6. С. 139—184.
8. Силаев В. И., Симакова Ю. С., Киселёва Д. В., Лютое В. П., Лысюк А. Ю., Филиппов В. Н. Кимберлитовый (?) Li-Al турмалин из минералогической коллекции Л. А. Попугаевой // Вестник Ин-та геологии Коми НЦ УрО РАН. 2010. № 1. С. 8—13.
9. Силаев В. И., Трейвус Е. Б. Историческая коллекция мантийных минералов Л. А. Попугаевой как актуальный объект научного исследования // Сохранение минерально-географического разнообразия. София, 2010. С. 149—157.
10. Силаев В. И., Трейвус Е. Б., Петровский В. А., Гаранин В. К., Хазов А. Ф. Открытие века: алмазоносная кимберлитовая трубка «Зарница»: Отчет Н. Н. Сарсадских и Л. А. Попугаевой о результатах работ, проведенных тематической партией № 26 Центральной экспедиции и партией № 182 Амакинской экспедиции в среднем течении р. Даалдын в 1954 г. Сыктывкар — Москва — Санкт-Петербург, 2014. 198 с.
11. Силаев В. И., Шанина С. Н., Петровский В. А., Плоскова С. И. Минералогическая коллекция Л. А. Попугаевой как культурно-исторический феномен и актуальный объект исследований // Вестник Ин-та геологии Коми НЦ УрО РАН. 2009. № 1. С. 13—21.



12. Трейвус Е. Б. Сверкнувшая как зарница. Повесть о геологе Л. Попугаевой. СПб.: СПб гос. ун-т, 2009. 165 с.
13. Трейвус Е. Б. Из жизни Ларисы Попугаевой // Тиетта. 2011. № 3. С. 76–80.
14. Трейвус Е. Б. Письмо к редактору // Тиетта. 2012. № 3. С. 97.
15. Трейвус Е. Б. И. Ефремов и открытие якутских коренных алмазов: к 60-летию находки первой кимберлитовой трубки // Тиетта. 2014. № 1. С. 78–83.
16. Трейвус Е. Б. Письмо к редактору // Тиетта. 2015. № 4. С. 98–99.
17. Фришман Н. И. Лопарская кровь // Тиетта. 2013. № 4. С. 5–19.

## References

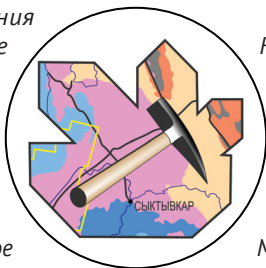
1. Voytekhevsky Yu. L. *O prigodnosti amazonita, kianita, tinguaita, hibinita, urtita i foliitov Kolskogo p-ova dlia kamnerezhnykh i iuvelirnykh izdelii* (About the suitability of amazonite, kyanite, tinguaita, khibinite, urtite and foyaite of the Kola Peninsula for stone-cutting and jewelry). Tietta, 2012, 2, pp. 46–50.
2. Voytekhevsky Yu. L. *Primechaniia k statye V. E. Semenova* (Notes to the article by V. E. Semenov). Tietta, 2014, 3, pp. 67–68.
3. Popugaeva L. A. *Issledovanie nekotorykh vidov kamnesamotsvetnogo syr'ya i perspektivy yego ispol'zovaniya v otechestvennoy yuvelirnoy promyshlennosti*. (Investigation of some types of semiprecious raw materials and prospects for its use in the domestic jewelry industry). Leningrad: Leningrad Mining Institute, 1970, 63 pp.
4. Privalov V. *Ulitsy Petrogradskoy storony. Doma i liudi* (Streets of the Petrogradskaya side. Houses and people). Moscow: Centerpoligraph, 2013, 749 pp.
5. Sarsadskikh N. N., Popugaeva L. A. *Novyye dannyye o proyavlenii ul'traosnovnogo magmatizma na Sibirskoy platforme* (New data on the occurrence of ultrabasic magmatism on the Siberian platform). *Razvedka i okhrana neдр*, 1955, 5, pp. 11–20.
6. Semenov V. E. *Iz perepiski L. A. Popugayevoy* (From the correspondence of L. A. Popugaeva). Tietta, 2014, 3, pp. 62–67.
7. Silaev V. I. *Zarnitsa nad Sibirskoy diamantinoy* (Lightning over the Siberian diamantine). *The Ural Geological Journal*, 2007, 6, pp. 139–184.
8. Silaev V. I., Simakova Yu. S., Kiseleva D. V., Lutoev V. P., Lysuk A. Yu., Filippov V. N. *Kimberlitovyy (?) Li-Al turmalin iz mineralogicheskoy kollektsii L. A. Popugayevoy* (Kimberlite (?) Li-Al tourmaline from the mineralogical collection of L. A. Popugaeva). *Vestnik of Institute of Geology Komi SC UB RAS*, 2010, 1, pp. 8–13.
9. Silaev V. I., Treyvus E. B. *Istoricheskaya kollektsiya mantiynykh mineralov L. A. Popugayevoy kak aktualnyy obyekt nauchnogo issledovaniya* (The historical collection of mantle minerals by L. A. Popugaeva as an actual object of scientific research. Preservation of mineral diversity). Sofia, 2010, pp. 149–157.
10. Silaev V. I., Treyvus E. B., Petrovsky V. A., Garanin V. K., Khazov A. F. *Otkrytie veka: almazonosnaya kimberlitovaya trubka Zarnitsa. Otchet N. N. Sarsadskikh i L. A. Popugayevoy o rezultatakh rabot, provedennykh tematicheskoy partiyey N 26 Tsentralnoy ekspeditsii i partiyey N 182 Amakinskoy ekspeditsii v srednem techenii r. Daaldyn v 1954 g.* (Discovery of the century: diamond-bearing kimberlite pipe Zarnitsa. Report by N. N. Sarsadskikh and L. A. Popugaeva on the results of the work carried out by the thematic party No. 26 of the Central Expedition and party No. 182 of the Amakin expedition in the middle reaches of the Daaldyn River in 1954). Syktyvkar–Moscow–Saint Petersburg, 2014, 198 pp.
11. Silaev V. I., Shanina S. N., Petrovsky V. A., Ploskova S. I. *Mineralogicheskaya kollektsiya L. A. Popugayevoy kak kulturno-istoricheskiy fenomen i aktualnyy obyekt issledovaniy* (The mineralogical collection of L. A. Popugaeva as a cultural and historical phenomenon and an actual object of research). *Vestnik of the Institute of Geology of Komi SC UB RAS*, 2009, 1, pp. 13–21.
12. Treyvus E. B. *Sverknuvshaya kak zarnitsa. Povest o geologe L. Popugayevoy* (She flashed like a lightning. The story of geologist L. Popugaeva). Saint Petersburg: Saint Petersburg State University, 2009, 165 pp.
13. Treyvus E. B. *Iz zhizni Larisy Popugayevoy* (From the life of Larisa Popugaeva). Tietta, 2011, 3, pp. 76–80.
14. Treyvus E. B. *Pismo k redaktoru* (Letter to the editor). Tietta, 2012, 3, pp. 97.
15. Treyvus E. B. I. *Yefremov i otkrytiye yakutskikh korenykh almazov: k 60-letiyu nakhodki pervoy kimberlitovoy trubki* (Efremov and the discovery of the Yakut indigenous diamonds: on the 60<sup>th</sup> anniversary of the discovery of the first kimberlite pipe). Tietta, 2014, 1, pp. 78–83.
16. Treyvus E. B. *Pismo k redaktoru* (Letter to the editor). Tietta, 2015, 4, pp. 98–99.
17. Frishman N. I. *Loparskaya krov* (Lappish blood). Tietta, 2013, 4, pp. 5–19.

Поступила в редакцию / Received 13.09.2021



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

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук», Институт геологии имени академика Н. П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук, совет молодых ученых Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Российское минералогическое общество



Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Federal State Budgetary Institution of Science Federal Research Center «Komi Science Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences», Institute of Geology named after Academician N. P. Yushkin of the Komi Science Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Council of Young Scientists of the Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS, Russian Mineralogical Society

**23–25 ноября 2021 г.**

в г. Сыктывкаре проведут

юбилейную 30-ю Всероссийскую научную конференцию

### «Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского сегмента».

Традиционно тематика конференции включает в себя все основные направления наук о Земле.

К участию приглашаются аспиранты, молодые учёные, сотрудники коммерческих организаций геологического и других профилей, студенты вузов России и других стран мира. Возраст участника на момент проведения мероприятия не должен превышать 35 лет. В рамках конференции ведущими специалистами в области фундаментальных наук будут проведены лекции.

#### Программный комитет:

Академик РАН А. М. Асхабов,  
Директор ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН И. Н. Бурцев,  
Ученый секретарь ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН  
И. В. Козырева.

#### Организационный комитет:

Председатель к. г.-м. н. А. Н. Вихоть,  
Заместитель председателя Н. С. Инкина,  
Секретарь Ю. Е. Езимова.

#### Контрольные сроки:

Представление материалов докладов –  
до 22 октября 2021 г.

Рассылка программы – 15 ноября 2021 г.

Заезд и регистрация участников – 22 ноября 2021 г.

Открытие конференции – 23 ноября 2021 г.

#### Контакты:

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН  
ул. Первомайская, 54, Сыктывкар,  
Республика Коми, 167982  
(8212) 24-53-53 – приемная директора  
(8212) 44-71-51 – Козырева Ирина Владимировна  
E-mail: [juventus-geo@yandex.ru](mailto:juventus-geo@yandex.ru)  
[vikhot.anna@mail.ru](mailto:vikhot.anna@mail.ru)

Подробная информация на сайте: <https://geo.komisc.ru>

will hold the jubilee,

30<sup>th</sup> All-Russian scientific conference

### «Structure, substance, history of the lithosphere of the Timan-North Ural segment»

in November 23–25, 2021, in Syktyvkar.

Traditionally, the topic of the conference includes all the main areas of Earth sciences.

Postgraduates, young researchers, employees of commercial organizations of geological and other profiles, students of universities in Russia and other countries of the world are invited to participate. The age of the participant at the time of the event must not exceed 35. Leading experts in fundamental sciences will give lectures within the framework of the conference.

#### Program Committee:

Academician of RAS A. M. Askhabov,  
Director of Institute of geology FRC Komi SC UB RAS  
I. N. Burtsev,

Science Secretary of Institute of geology  
FRC Komi SC UB RAS I. V. Kozyreva.

#### Organizing committee:

Chairman, Cand. Sc. (Geology and Mineralogy) A. N. Vikhot,  
Deputy Chairman N. S. Inkina,  
Secretary Yu. E. Ezimova.

#### Deadlines:

Submission of reports – October 22, 2021

Newsletter of the program – November 15, 2021

Arrival and registration of participants –  
November 22, 2021

Conference opening – November 23, 2021

#### Contacts:

Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS  
54 Pervomayskaya st., Syktyvkar, Komi Republic, 167982  
+7 (8212) 24-53-53 – Director's reception  
+7 (8212) 44-71-51 – Kozyreva Irina Vladimirovna  
E-mail: [juventus-geo@yandex.ru](mailto:juventus-geo@yandex.ru)  
[vikhot.anna@mail.ru](mailto:vikhot.anna@mail.ru)

Detailed information on the website: <https://geo.komisc.ru>

Редакторы издательства:

О. В. Габова, К. В. Ордин

Компьютерная верстка:

А. Ю. Перетягин

Свид. о рег. средства массовой информации ПИ № ФС77-75435 от 19.04.2019, выданное Роскомнадзором. Отпечатано: 29.10.2021. Формат бумаги 60 × 84 1/8. Печать RISO. Усл. п. л. 6,5. Тираж 140. Заказ 1164. Учредитель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук» (ФИЦ Коми НЦ УрО РАН). Редакция, издательство, типография: издательско-информационный отдел Института геологии имени академика Н. П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук» (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН).

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

На обложке использованы фото А. Соболевой, Ю. Глухова, В. Салдина, К. Романова.