



Vestnik of Geosciences **Вестник геонаук**

Октябрь
October
2020,
№ 10 (310)

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
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
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 (2019) — 0,381



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 (2019) — 0.381

geo.komisc.ru/vestnik

Содержание

Content

Научные статьи	Scientific articles
Типоморфизм глубинных акцессорных минералов Вымской горстовой структуры (Средний Тиман). Оливин, пиропы <i>Ю. В. Глухов, Б. А. Макеев, М. Ю. Сокерин</i> 3	Typomorphism of hypogene accessory minerals of the Vymsky Horst structure (Middle Timan). Olivine, pyropes <i>Yu. V. Glukhov, B. A. Makeev, M. Yu. Sokerin</i> 3
Минеральные отложения пещеры Холодный грот (Бзыбское ущелье, Абхазия) и изотопный состав углерода $\delta^{13}\text{C}$ и кислорода $\delta^{18}\text{O}$ карстогенных карбонатов <i>О. Я. Червяцова, С. С. Потапов, Л. В. Леонова, Дж. Бейкер, Р. С. Дбар</i> 12	Mineral sediments of the Kholodnyy grotto cave (Bzyb Gorge, Abkhazia) and $\delta^{13}\text{C}$ carbon and $\delta^{18}\text{O}$ oxygen isotope composition of karstogenic carbonates <i>O. Ya. Chervyatsova, S. S. Potapov, L. V. Leonova, J. Baker, R. S. Dbar</i> 12
Аминокислоты как биомаркеры фазового состава холелитов <i>О. Е. Амосова, Е. В. Машина, С. Н. Шанина</i> 22	Amino acids as biomarkers of phase composition of gallstones <i>O. Ye. Amosova, E. V. Mashina, S. N. Shanina</i> 22
Новый подход в расчете наибольших расходов взвешенных наносов грязевых селей с учетом влияния основных природных факторов (на примере рек Малого Кавказа) <i>Дж. Г. Мамедов, З. Р. Расулов</i> 31	A new approach to the calculation of the greatest debit of suspended mud flood load considering influence of main natural factors (by the sample of rivers of Minor Caucasuses) <i>J. H. Mamedov, Z. R. Rasulov</i> 31
Моделирование петрографических структур <i>Ю. Л. Войтеховский, А. А. Захарова</i> 38	Modeling petrographic structures <i>Yu. L. Voytekhovsky, A. A. Zakharova</i> 38
Хроника, события, факты	Chronicle, events, facts
Научное наследие Ю. А. Ткачева <i>Памяти ученого (1935—2020)</i> 43	Yu. A. Tkachev's Science Heritage <i>In memory of scientist (1935—2020)</i> 43

Правила
оформления
статей



Vestnik
article
Formatting

geo.komisc.ru/vestnik/authors



ТИПОМОРФИЗМ ГЛУБИННЫХ АКЦЕССОРНЫХ МИНЕРАЛОВ ВЫМСКОЙ ГОРСТОВОЙ СТРУКТУРЫ (СРЕДНИЙ ТИМАН). ОЛИВИН, ПИРОПЫ

Ю. В. Глухов, Б. А. Макеев, М. Ю. Сокерин

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар

glukhov@geo.komisc.ru

Приводятся результаты минералогического изучения пиропов и оливина Вымской горст-антиклинорной структуры (Кыввожское золотороссыпное поле, Средний Тиман), обнаруженных при шлиховом опробовании. При проведении исследований использовалась оптическая микроскопия, электронный микрозонд и сканирующий электронный микроскоп. Продемонстрирована высокая сохранность эндогенной поверхности у части пироповых индивидов и оливина, указывающая на близость их магматического источника. Установлена принадлежность изученных пироповых гранатов к лерцолитовому парагенезису. В составе некоторых гранатов обнаруживались микровключения хромшпинелей и ортопироксена (энстатита). В одном пироповом индивиде из верховий р. Белая Кедва были выявлены многочисленные микровключения высокобарного и высокотемпературного титаноциркониевого минерала шриланкита (первая находка на Тимане). Установлено, что изученные пиропы идентичны по составу пироповым гранатам из Умбинского кимберлитового поля (Средний Тиман). Это, очевидно, указывает на то, что магматические породы трубок взрыва Умбинского поля являются аналогами источников пиропов Кыввожского золотоносного района. Не исключено также, что эти трубки сами являются источниками данных пиропов.

Ключевые слова: алмазонасность, минералы алмазной ассоциации, пироп, оливин, Вольско-Вымская гряда, Средний Тиман.

TYPOMORPHISM OF HYPOGENE ACCESSORY MINERALS OF THE VYMSKY HORST STRUCTURE (MIDDLE TIMAN). OLIVINE, PYROPE

Yu. V. Glukhov, B. A. Makeev, M. Yu. Sokerin

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

The results of mineralogical study of pyropes and olivine from the Vymskaya horst-anticline structure (Kyyvozh goldbearing placer field, Middle Timan), that found during the heavy mineral concentrate sampling, are presented. Optical microscopy, electron microprobe, and scanning electron microscope were used in the research. High preservation of the endogenous surface of some pyrope individuals and olivine is demonstrated, indicating the closeness of their magmatic sources. The studied pyrope garnets belong to the lherzolite paragenesis of mantle minerals. Microinclusions of chrome spinels and orthopyroxene (enstatite) were found in some garnet grains. Abundant microinclusions of the high-pressure and high-temperature titanium-zirconium mineral srilankite (the first find on Timan) were found in one pyrope individual from the headstream of Belaya Kedva river. Investigated pyropes are characterized by compositions, which are identical to the ones for pyrope garnets from Umba kimberlite field (Middle Timan). It seems that magmatic rocks from the Umba pipes field are analogues of parent rock sources of pyropes from Kyyvozh goldbearing area and (or) themselves are sources for these pyropes.

Keywords: diamondferosity, kimberlite indicator minerals, pyrope, olivine, Vol'sko-Vymsky ridge, Middle Timan.

Введение

Вымская структура представляет собой горст-антиклинорий, геоморфологически выраженный в рельефе Среднего Тимана возвышенностями Вольско-Вымской гряды, тянущейся в северо-западном (тиманском) направлении и прорезаемой на западе и востоке притоками рек Выми и Белой Кедвы [10]. В ядре Вымского горст-антиклинория находятся метаморфические комплексы пород докембрия (рис. 1). С востока и запада Вымский горст ограничен крупными тектоническими нарушениями, а также расчленён субширотными разломами. В целом данная структура имеет блоковый (блоково-надвиговый) характер. Круто залегающее западное и более пологое восточное крылья Вымской структуры перекрыты фанерозойским платформенным чехлом осадочных отложений.

На северном замыкании докембрийского ядра Вымской структуры размещается среднедевонская (эйфель-живетская) полиминеральная алмаз-золото-редкометалльная россыпь Ичетью. Источник её золота и алмазов всё ещё достоверно не установлен. Расположенные в ядре Вымской горст-антиклиналии и охватывающие притоки рек Выми и Кедвы золотоносные россыпи и россыпепроявления Кыввожского россыпного поля помимо самородного золота содержат разнообразные минералы платиноидов. Однако источники всей этой благороднометалльной минерализации также до сих пор не установлены. Общеизвестно, что определённую роль контроля оруденения могут играть проявления магматизма. Подобного рода выходы магматических пород были обнаружены в центральной части Вымской структуры, в их числе секущие дайковые

Для цитирования: Глухов Ю. В., Макеев Б. А., Сокерин М. Ю. Типоморфизм глубинных акцессорных минералов Вымской горстовой структуры (Средний Тиман). Оливин, пиропы // Вестник геонаук. 2020. № 10(310). С. 3—11. DOI: 10.19110/geov.2020.10.1.

For citation: Glukhov Yu. V., Makeev B. A., Sokerin M. Yu. Typomorphism of hypogene accessory minerals of the Vymsky Horst structure (Middle Timan). Olivine, pyropes. Vestnik of Geosciences, 2020, 10(310), pp. 3—11. DOI: 10.19110/geov.2020.10.1.

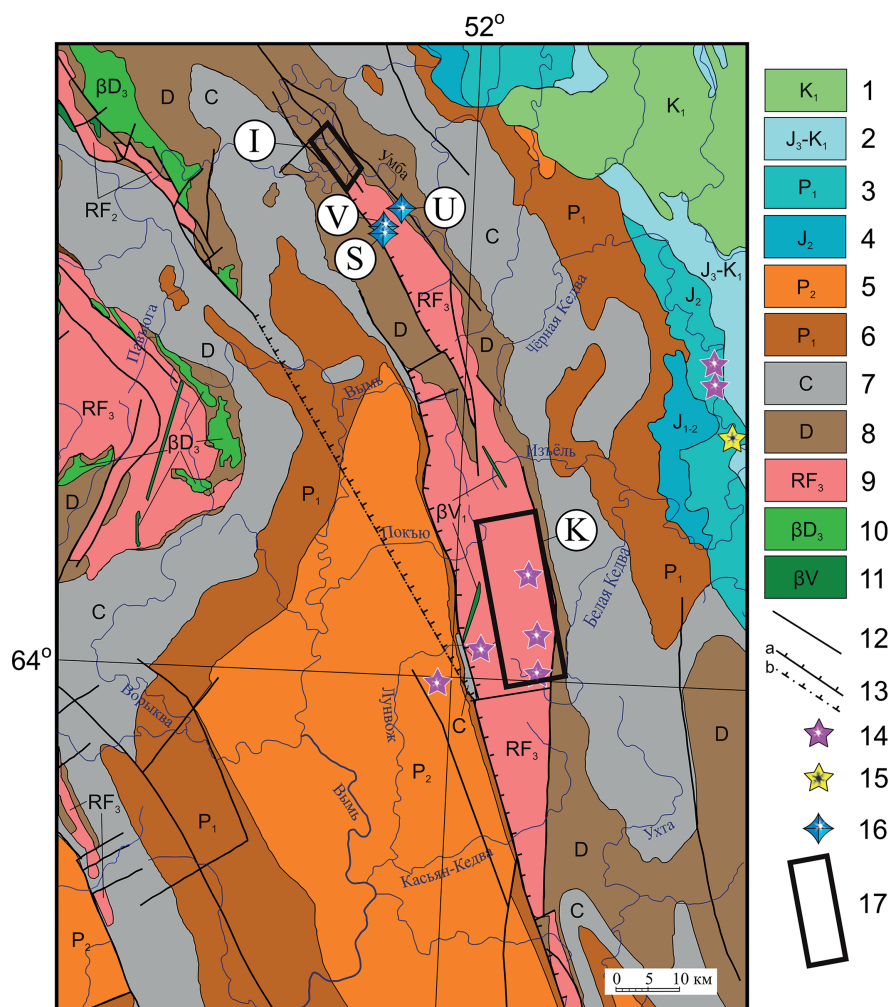


Рис. 1. Геологическая карта-схема золотоносной Кыввожской площади (Вымский выступ) и сопредельных районов (составлена по материалам Д. Б. Соболева и Н. И. Тимонина) [8].

Условные сокращения: 1–8 — фанерозойские терригенные и морские отложения платформенного чехла; 9 — протерозойские метаморфические комплексы фундамента; 10 — позднедевонские субвулканические интрузии и покровные базальты; 11 — вендские дайки долеритов; 12 — тектонические нарушения; 13 — надвиги (а — установленные, б — предполагаемые); 14 — находки пиропов в аллювии; 15 — находка оливина в аллювии; 16 — трубки взрыва (U — Умбинская, S — Средненская, V — Водораздельная); 17 — россыпные поля: I — Ичетьюское алмаз-золото-редкометальное палеороссыпное, K — Кыввожское золотороссыпное

Fig. 1. Geological schematic map of Kyvvozhskaya goldbearing area (Vymsky horst) and frontier terrains (based on the map materials of D. B. Sobolev and N. I. Timonin) [8].

Legend: 1–8 — Phanerozoic terrigenous and marine sediments of the platform cover; 9 — Proterozoic metamorphic complexes of the basement; 10 — Late Devonian subvolcanic intrusions and cover basalts; 11 — Vendian dykes of dolerites; 12 — discontinuous faults; 13 — overthrust faults (a — established, b — assumed); 14 — finds of pyrope in alluvium; 15 — finding of olivine in alluvium; 16 — Explosion pipes (U — Umbinskaya, S — Srednenskaya, V — Vodorazdel'naya); 17 — placer fields: I — Ichetyu diamond-gold-rare-metal paleoplacer area, K — Kyvvozhskaya gold placer area

тела метадолеритов руч. Лунвож. Примерно в 12-ти километрах на юго-восток от россыпного Ичетьюского поля были выявлены прорывающие докембрийские породы фундамента трубки взрыва Средненская и Водораздельная и перекрытая девонскими отложениями щелочная альнётитовая диатрема Умбинская [4, 5]. Все эти трубки Умбинского кимберлитового поля оказались неалмазоносными. Несмотря на то, что в вопросе связи магматизма и рудогенеза Тимана ещё многое остаётся неясным, поиск новых магматических тел и изучение связанных с ними акцессорных рудоиндикаторных минералов представляются перспективными исследовательскими направлениями.

В предшествующий период на Среднем Тимане усилиями ухтинских геологов и сотрудников Института геологии Коми НЦ РАН [1, 4, 5, 10] велась систематиче-

ская работа по изучению акцессорных минералов глубинных магматических комплексов пород, относящихся к группе минералов алмазной ассоциации. В данной работе приводятся новые сведения по пиропам и оливину, которые были обнаружены в шлиховых пробах Кыввожской золотоносной площади.

Методы исследования

Исследования проводились на базе ЦКП «Геонаука» Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН. Акцессорные минералы отбирались препаровальной иглой под бинокулярным микроскопом из электромагнитной фракции концентратов шлиховых проб (исходный объём ~ 0.01 м³). Фотоизображения пироповых гранатов получены при помощи оптического микроско-

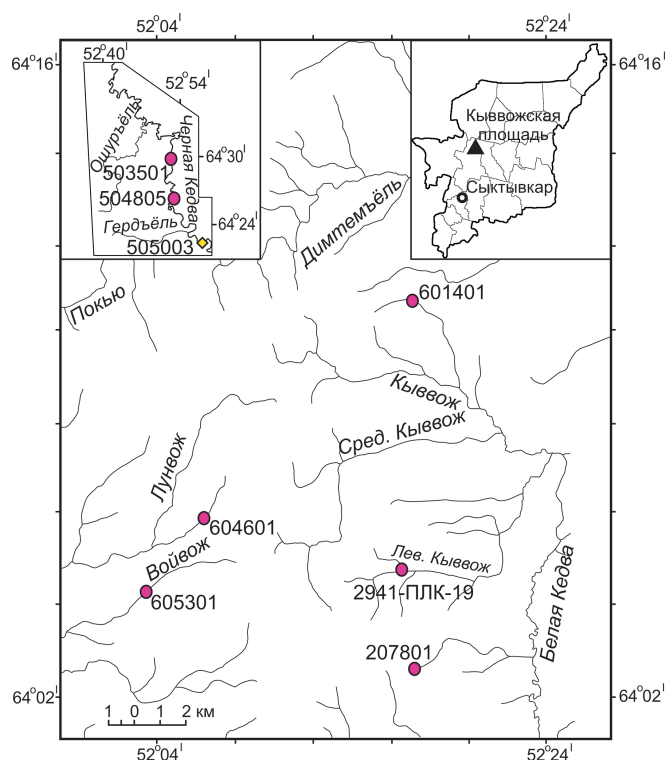


Рис. 2. Район работ и локализация точек пробоотбора (лиловое — пиропы, жёлтое — оливин)

Fig. 2. The study area and localization of sampling points (lilac — pyroxenes, yellow — olivine)

па МБС-9 и цифрового фотоаппарата Sony Cyber-shot DSC-W830). Детали микрорельефа поверхности минеральных зёрен и их элементный состав изучались при помощи растрового электронного микроскопа Tescan VEGA 3 LMN с энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 450 и приставкой EBSD (рабочее напряжение — 20 kV, напыление углеродом).

Результаты исследования

Оливин. Единственное зерно оливина (проба 505003) было обнаружено в грубообломочном современном аллювии примерно в 6 км выше устья р. Чёрная Кедва (рис. 2).

Оливин был представлен бледно-жёлтым, полупрозрачным, угловатым, без следов окатывания, брусковидным индивидом размером 0.2×0.3×0.5 мм. Первичная поверхность оливина (его разделивших при препарировании фрагментов) под электронным микроскопом имеет специфичный занозистый бугорчато-ямчатый микрорельеф (рис. 3). На сколотых поверхностях видны многочисленные треугольные устья дислокаций (рис. 3, b).

По химическому составу оливин относится к форстеритам (таблица). Содержание железа находится в интервале 9–10 мас. % FeO, соответствующий коэффициент магнезиальности ($Mg\# = MgO/(MgO+FeO)$) составляет 0.83–0.84. Имеются следы марганца (0.2 мас. % MnO) и никеля (0.3–0.4 мас. % NiO).

Пироп. Зёрна хромсодержащих мантийных пиропов в шлиховых пробах из современных аллювиальных псефитов обнаруживались в единичных экземплярах: обр. 504805 и обр. 503501 (среднее течение р. Чёрная Кедва), обр. 601401 (верховья притока руч. Киввовож);

обр. 604601 (руч. Лунвож) и 605301 (руч. Войвож); обр. 2941а-ПЛК-19, обр. 2941в-ПЛК-19 (приток руч. Левый Киввовож), обр. 207801 (верховья р. Белая Кедва).

Пиропы имеют характерный лиловый цвет различного насыщения и цветовых оттенков — от бледно-розовато-сиреневых до фиолетовых (рис. 4). Зёрна полупрозрачны, у многих видны внутренние трещины. У трёх индивидов присутствует бурый нацвет (все с южной части Киввовожского района). По форме пиропы представляют собой угловато-округлые и округлые уплощённые тела. По максимальному размеру зёрна варьируют от 0.4 до 0.7 мм, и практически все обнаруживаются в гранулометрическом классе крупности +0.25–0.5 мм.

Пиропы обладают различной степенью окатанности, под которой мы здесь понимаем механическую изношенность эндогенной (первичной) поверхности, отличая таким образом окатанность и округлость (последняя может возникать и в эндогенных обстановках вследствие растворения или оплавления зерна минерала). Практически неокатанными оказались округло-угловатое зерно пироба из пробы 504805, отобранной на р. Чёрная Кедва (рис. 4, a1–a6), рис. 5 (a–i) и округлое сильноуплощённое зерно из пробы 601401, взятой в верховьях левого притока руч. Киввовож (рис. 4, b1–b4)

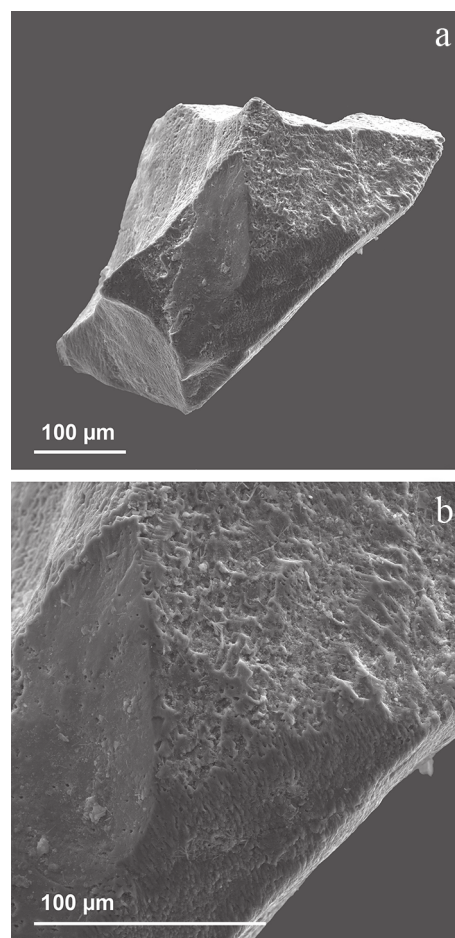


Рис. 3. Микрорельеф первичной (справа) и сколовой (слева) поверхностей фрагмента индивида оливина: а — общий вид, b — детализация. Электронный микроскоп Tescan VEGA 3 LMN, вторичные электроны

Fig. 3. Microrelief of the primary (right) and shear (left) surfaces of an individual olivine fragment. a — general view, b — detail. Tescan VEGA 3 LMN electron microscope, secondary electrons

Химический состав оливина, пиропов и микроминеральных включений в пиробах / The chemical composition of the olivine, pyrope and micromineral inclusions in pyrope

Номер спектра Spectrum No	Номер образца Sample No	Компонент / Component													Сумма Total	Минерал Mineral
		SiO ₂	TiO ₂	ZrO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	V ₂ O ₅	FeO	MnO	MgO	CaO	NiO	ZnO	Na ₂ O		
1 ц	605301	41.19	0.12	—	22.46	1.65	—	12.54	0.57	16.30	6.12	—	—	—	100.94	пироп / pyrope Prp ₅₈ Alm ₂₅ Uv ₅ Grs ₁₀ Sps ₁ Adr ₁
2 к	605301	41.08	—	—	22.47	1.62	—	12.77	0.55	16.18	6.24	—	—	—	100.91	пироп / pyrope Prp ₅₈ Alm ₂₅ Uv ₅ Grs ₁₁ Sps ₁
3 вкл	605301	1.72	0.66	—	25.66	32.05	0.47	25.13	—	10.69	0.56	0.51	0.26	—	97.71	хромшпинель / chrome spinel (Mg _{0.50} Fe _{0.48} Ni _{0.01} Zn _{0.01})(Al _{0.96} Cr _{0.81} Fe _{0.19} Ti _{0.03} V _{0.01}) ₂ O ₄
4 вкл	605301	—	0.71	—	25.66	34.24	0.53	26.16	—	10.42	0.23	0.37	—	—	98.32	хромшпинель / chrome spinel (Fe _{0.51} Mg _{0.48} Ni _{0.01})(Al _{0.94} Cr _{0.84} Fe _{0.18} Ti _{0.03} V _{0.01}) ₂ O ₄
5 вкл	605301	2.62	0.85	—	25.98	32.17	0.39	25.80	—	11.37	0.37	0.40	0.64	0.22	100.81	хромшпинель / chrome spinel (Mg _{0.53} Fe _{0.45} Ni _{0.01} Zn _{0.01})(Al _{0.95} Cr _{0.79} Fe _{0.21} Ti _{0.04} V _{0.01}) ₂ O ₄
6 вкл	605301	39.43	—	—	26.37	—	—	13.36	0.17	0.51	0.62	—	—	—	80.46	алюмосиликат (каолинит?) / Aluminosilicate (kaolinite?)
7 вкл	605301	—	0.85	—	26.89	33.76	0.45	25.10	0	9.28	—	0.53	—	—	96.85	хромшпинель / chrome spinel (Fe _{0.55} Mg _{0.44} Ni _{0.01})(Al _{1.00} Cr _{0.84} Fe _{0.11} Ti _{0.04} V _{0.01}) ₂ O ₄
8 ц	604601	41.06	—	—	20.93	3.65	—	9.01	0.47	18.41	6.09	—	—	—	99.62	пироп / pyrope Prp ₆₆ Alm ₁₈ Uv ₁₀ Grs ₄ Sps ₁ Adr ₁
9 к	604601	41.49	—	—	21.30	3.51	—	8.98	0.50	18.52	6.08	—	—	—	100.39	пироп / pyrope Prp ₆₆ Alm ₁₈ Uv ₁₀ Grs ₅ Sps ₁
10 вкл	604601	1.06	—	—	29.15	44.74	0.40	12.70	0	12.63	—	—	0.54	—	101.21	хромшпинель / chrome spinel (Mg _{0.64} Fe _{0.35} Zn _{0.01})(Cr _{1.01} Al _{0.98} V _{0.01}) ₂ O ₄
11 ц	207801	41.93	0.22	—	22.58	2.46	—	6.45	0.22	20.73	5.53	—	—	—	100.12	пироп / pyrope Prp ₇₃ Alm ₁₃ Uv ₇ Grs ₆ Adr ₁
12 к	207801	42.19	0.15	—	22.51	2.24	—	6.44	0.29	21.03	5.47	—	—	—	100.33	пироп / pyrope Prp ₇₃ Alm ₁₂ Uv ₆ Grs ₇ Sps ₁ Adr ₁
13 вкл	207801	5.96	46.54	37.73	3.67	0.29	0.51	1.12	—	3.68	1.06	—	—	—	100.56	ширланит / srilankite (Zr _{0.33} Ti _{0.67})O ₂
14 вкл	207801	4.62	46.34	37.72	2.52	0.39	0.72	1.22	—	1.88	1.07	—	—	—	96.48	ширланит / srilankite (Zr _{0.33} Ti _{0.67})O ₂
15 вкл	207801	6.98	79.38	3.39	4.46	1.33	—	1.04	—	4.63	1.25	—	—	—	102.46	рутилоподобный / rutile-like TiO ₂
16 вкл	207801	6.79	50.11	31.94	4.84	0.65	—	1.24	—	5.30	0.87	—	—	—	101.74	ширланит / srilankite (Zr _{0.33} Ti _{0.67})O ₂
17 вкл	207801	3.52	47.35	32.76	5.07	1.81	0.58	1.17	—	3.28	0.67	—	—	—	96.20	ширланит / srilankite (Zr _{0.33} Ti _{0.67})O ₂
18 ц	601401	41.92	—	—	21.81	3.12	—	8.89	0.37	20.09	4.60	—	—	—	100.81	пироп / pyrope Prp ₇₀ Alm ₁₇ Uv ₉ Grs ₂ Sps ₁ Adr ₁
19 к	601401	41.28	—	—	21.70	3.05	—	8.70	0.48	19.78	4.40	—	—	—	99.40	пироп / pyrope Prp ₇₀ Alm ₁₇ Uv ₉ Grs ₃ Sps ₁
20 ц	503501	41.90	—	—	22.33	2.64	—	6.60	0.44	21.33	4.92	—	—	—	100.16	пироп / pyrope Prp ₇₄ Alm ₁₂ Uv ₇ Grs ₅ Sps ₁ Adr ₁
21 к	503501	42.07	—	—	22.14	2.64	—	6.58	0.27	21.40	4.95	—	—	—	100.04	пироп / pyrope Prp ₇₅ Alm ₁₂ Uv ₇ Grs ₄ Sps ₁ Adr ₁
22 ц	504805	41.52	—	—	21.83	2.90	—	8.31	0.52	19.39	5.75	—	—	—	100.22	пироп / pyrope Prp ₆₈ Alm ₁₆ Uv ₈ Grs ₆ Sps ₁ Adr ₁
23 к	504805	41.96	—	—	21.79	3.05	—	8.46	0.48	19.43	5.64	—	—	—	100.81	пироп / pyrope Prp ₆₈ Alm ₁₆ Uv ₉ Grs ₅ Sps ₁ Adr ₁
24 ц	505003	40.42	—	—	—	—	—	9.71	0.15	49.16	—	0.29	—	—	99.73	оливин / olivine Fo ₉₀ Fa ₁₀
25 ц	505003	40.37	—	—	—	—	—	9.61	0.26	49.26	—	0.38	—	—	99.87	оливин / olivine Fo ₉₀ Fa ₁₀
26 ц	505003	40.60	—	—	—	—	—	9.85	0.48	48.82	—	0.41	—	—	99.67	оливин / olivine Fo ₉₀ Fa ₁₀
27 ц	2941a/11	42.03	—	—	22.38	2.50	—	7.83	0.56	20.20	5.42	—	—	—	100.92	пироп / pyrope Prp ₇₀ Alm ₁₅ Uv ₇ Grs ₆ Sps ₁ Adr ₁
28 к	2941a/11	41.13	—	—	21.65	2.79	—	7.85	0.50	19.80	5.42	—	—	—	99.14	пироп / pyrope Prp ₇₀ Alm ₁₅ Uv ₈ Grs ₅ Sps ₁ Adr ₁
29 ц	2941b/21	41.88	—	—	21.79	3.17	—	7.58	0.38	20.47	4.96	—	—	—	100.23	пироп / pyrope Prp ₇₂ Alm ₁₅ Uv ₉ Grs ₃ Sps ₁
30 к	2941b/21	41.90	—	—	21.82	3.15	—	7.30	0.40	20.46	4.79	—	—	—	99.82	пироп / pyrope Prp ₇₂ Alm ₁₅ Uv ₉ Grs ₃ Sps ₁
31 вкл	2941b/21	58.18	—	—	1.29	0.5	—	3.62	—	36.98	0.21	—	—	—	100.78	пироксен / pyroxene (Mg _{1.90} Fe _{0.10}) ₂ Si ₂ O ₆
32 вкл	2941b/21	4.48	0.10	—	23.85	43.42	0.36	12.13	—	17.84	0.17	—	—	—	102.35	хромшпинель / chrome spinel (Mg _{0.80} Fe _{0.20})(Cr _{1.02} Al _{0.85} Fe _{0.11} V _{0.01} Ti _{0.01}) ₂ O ₄
33 вкл	2941b/21	56.17	—	—	2.81	0.75	—	4.2	—	35.37	0.76	—	—	—	100.06	пироксен / pyroxene (Mg _{1.88} Fe _{0.12}) ₂ Si ₂ O ₆

Примечание: номера проб и точек микроанализа: 1–7 — пр. 605301 (Войвож); 8–10 — пр. 604601 (руч. Лунвож); 11–17 — пр. 207801 (верховья р. Белая Кедва); 18, 19 — пр. 601401 (левый приток Кыввожа); 20–26 — пр. 503501, 504805, 505003 (Чёрная Кедва); 27–33 — пр. 2941–ПЛК-19 (приток Левого Кыввожа). Используемые сокращения для обозначения места точки микроанализа: ц — центр, к — край (кайма), вкл — включение. Сокращённые названия минералов: Prp — пироп, Alm — альмандин, Uv — уваровит, Grs — гроссуляр, Sps — спессартин, Adr — андрадит, Fo — форстерит, Fa — фаялит.

Note: Numbers of samples and microanalysis points: 1–7 — sp. 605301 (Voivozh); 8–10 — sp. 604601 (Lunvozh); 11–17 — sp. 207801 (upper reaches of the Belaya Kedva river); 18, 19 — sp. 601401 (left tributary of Kyvvozh river); 20–26 — sp. 503501, 504805, 505003 (Chyornaya Kedva); 27–33 — sp. 2941–PLK-19 (tributary of Levyi Kyvvozh river). Abbreviations used to indicate the location of the microanalysis point: ц — center, к — edge (rim), вкл — inclusion. Abbreviation of minerals: Prp — pyrope, Alm — almandine, Uv — uvarovite, Grs — grossular, Sps — spessartine, Adr — andradite, Fo — forsterite, Fa — fayalite.

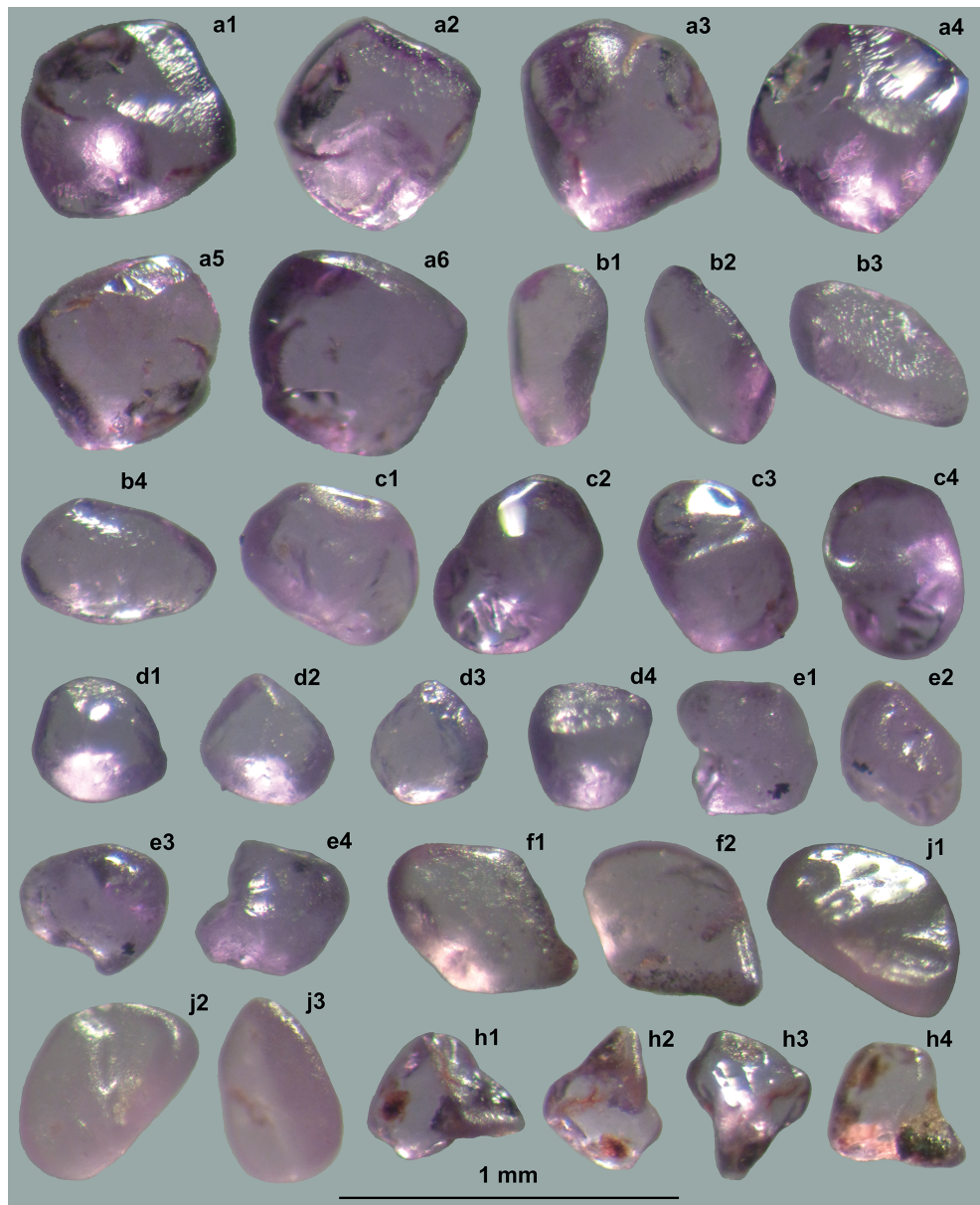


Рис. 4. Морфология и поверхность пиропов различных классов механического износа (оптический микроскоп МБС-9, цифровой фотоаппарат Sony Cyber-shot DSC-W830): a1–a6 — I класс, обр. 504805 (р. Чёрная Кедва); b1–b4 — I класс, обр. 601401 (верховья левого притока руч. Кыввож); c1–c4 — II класс, обр. 503501 (р. Чёрная Кедва); d1–e4 — II класс, d1–d4 — обр. 2941a-ПЛК-19, e1–e4 — обр. 2941b-ПЛК-19 (приток Левого Кыввожа); h1–h4 — II класс, обр. 604601 (руч. Лунвож), f1–f2 — III класс, обр. 207801 (верховья р. Белая Кедва); j1–j3 — III класс, обр. 605301 (руч. Войвож). Типоморфные элементы: a1–a3, b1–b4, d1–d4, f1 — бугорчатость (пузырчатость); a4, b4, c2–c4, d1, e2–e4, j1–j2, h1, h3 — зеркальный блеск; a4, a5, e2–e4 — свежий скол; a1, j1–j2, h1–h4 — старый скол; a1, a6 — неизношенное ребро; c1, d2, f1–f2, j1–j3, h2 — матировка изношенного ребра; f1, j2 — матировка поверхности; a1–a6, c1, c3, e3, f2 — внутренние трещины; h4 — железомарганцевая оксигидроксидная корка; f1–h4 — бурый нацвет

Fig. 4. Morphology and surface images of pyropes of various classes of mechanical wearing (MBS-9 optical microscope, Sony Cyber-shot DSC-W830 digital camera): a1–a6 — class I, sp. 504805 (Chjornaya Kedva); b1–b4 — I класс, обр. 601401 (headstream of left tributary stream of Kyvvozh); c1–c4 — — class II, sp. 503501 (Chjornaya Kedva); d1–e4 — II класс, d1–d4 — sp. 2941a-ПЛК-19, e1–e4 — sp. 2941b-ПЛК-19 (tributary stream of Levj Kyvvozh); h1–h4 — class II, sp. 604601 (Lunvozh), f1–f2 — III class, sp. 207801 (headstream of Belaya Kedva); j1–j3 — III class, sp. 605301 (Vojvozh). Typomorphic elements: a1–a3, b1–b4, d1–d4, f1 — tuberosity (blistering); a4, b4, c2–c4, d1, e2–e4, j1–j2, h1, h3 — mirror brilliance; a4, a5, e2–e4 — fresh cleavage; a1, j1–j2, h1–h4 — old-aged cleavage; a1, a6 — unworn edge; c1, d2, f1–f2, j1–j3, h2 — matting of the worn edge; f1, j2 — matting of the surface; a1–a6, c1, c3, e3, f2 — internal cracks; h4 — iron-manganese hydroxide crust; f1–h4 — brown pigmentation

Руководствуясь принципами типизации, предложенной Л. А. Зиминим [11], данные зерна можно отнести по степени механического износа к классу I. Характерные типоморфные особенности этих пироповых индивидов — отсутствие износа рёбер и сторон («псевдограней»), являющиеся признаком близости к их магматическим источникам. У этих пиропов также

присутствует специфичный бугорчатый (пузырчатый) микрорельеф (рис. 4, a1–a3, b1–b4) и глянцевый (стеклянный) блеск (рис. 4, a4, b4), обусловленный способностью этих эндогенных поверхностей зеркально отражать свет. У пироповых зерна из аллювия Чёрной Кедвы есть свежие и старые сколы. Поверхность сколов глянцевая и покрыта многочисленными однород-

ными кристаллографически упорядоченными («правильными») ямками растворения (рис. 5, h).

Округлое уплощённое зерно пробы 503501 из аллювия Чёрной Кедвы (рис. 3, b1–b4), округло-угловатое зерно пробы 2941a–ПЛК–19 и сколотое уплощённое округло-угловатое зерно пробы 2941в–ПЛК–19 из голоценовых псефитов притока Левого Кыввожа (соответственно рис. 4, e1–e4 и рис. 4, e1–e4), а также округло-угловатый индивид пробы 604601, отобранной на Лунвоже (рис. 4, e1–e4), являются полукатанными и относятся к классу II механического износа. Как и у пиропов класса I механического износа, у них есть специфические признаки недавнего пребывания в магматических телах, также имеются сколы. Отличие выражено механическим износом рёбер (рис. 5, l), которые округлены и выделяются характерной матовостью, обусловленной способностью данных участков поверхности пироповых зёрен эффективно рассеивать свет (диффузное отражение света). Под электронным микроскопом хорошо видно, что данные участки механического воздействия в отличие от реликтовых эндогенных поверхностей покрыты многочисленными хаотически расположенными разнородными ямками механических повреждений (рис. 5, j–o). Наконец, ещё два округлых, сильно уплощенных пироповых зерна из пробы 207801, отобранной в верховьях Белой Кедвы (рис. 4, f1–f2), и пробы 605301 с Войвожа (рис. 4, j1–j3) относятся к классу III механического износа. У данных пиропов механически затёрты не только рёбра, но и бока (рис. 5, o). На поверхности зёрен нет эндогенных бугорков, а изобилуют разнородные механические мелкие ямки и крупные выбоины.

По данным микрозондового анализа, концентрации хрома в лиловых пиропсах невысокие и флуктуируют в весьма узком диапазоне значений — от 1.6 до 3.6 мас. % Cr_2O_3 (см. таблицу). Регистрируются повышенные содержания железа — 6.4–12.7 мас. % FeO. Содержания кальция варьируют в узком диапазоне — от 4.5 до 6.1 мас. % CaO. Во всех точках анализа зарегистрировано присутствие следов марганца до 0.57 мас. % MnO. В одном случае (обр. 605301, Войвож) зафиксированы следовые содержания титана — 0.12 % TiO_2 .

По составу гранатовых миналов хромсодержащие лиловые гранаты можно охарактеризовать как пиропы, включающие небольшое количество альмандиновых, уваровитовых и гроссуляровых компонентов (в сумме не превосходят первые десятки мас. %).

Включения в пиропсах. Во внутренних частях зёрен пиропов из проб южной части района работ (Лунвож, Войвож, Левый Кыввож и верховья Белой Кедвы) обнаружены микроминеральные включения. У этих зёрен имеется характерный буроватый нацвет. На срезах пироповых индивидов из Лунвожа и Войвожа локально по периферийной области виднеются ламелевидные и овальные крошечные выделения хромшпинелей размерами в несколько единиц микрометров (максимальные размеры — до 10–12 мкм). В одном примере (обр. 605301) на срезе граната наблюдается вытянутый шестиугольник гетерофазного хромшпинель-силикатного включения размером 17×22 мкм. Основная (~ 90 %) часть камеры включения выполнена труднодиагностируемой (возможно, эпигенно-изменённой) алюмосиликатной фазой, похожей по составу (низкая сумма) на каолинит. Внутри по центру находится ксеноморф-

ное удлинённое выделение хромшпинели размером 6×10 мкм. Включения хромшпинелей войвожского пиропса из пробы 605301 характеризуются близким шпинелевым (субферрихромпикотитовым — по номенклатуре Н. В. Павлова [6]) составом и имеют практически один и тот же набор следовых примесей (десятые доли мас. %) титана, никеля, ванадия и цинка (натрия — в единственном микроанализе). Хромшпинелевое включение в другом войвожском пироповом зерне из пробы 604601 имеет хромитовый (алюмохромитовый — по номенклатуре Н. В. Павлова [6]) состав. В числе примесей (десятые доли мас. %) в этом зерне были обнаружены только ванадий и цинк.

В одном из двух зёрен, найденных в грубообломочном аллювии притока руч. Левый Кыввож (обр. 2941в–ПЛК–19/21), были обнаружены микровключения хромшпинели и ортопироксена (рис. 6, a, b).

Одно из включений размером 6×12 мкм, вытянутое, каплевидное, является двухфазным. Большая часть камеры (~ 75 %) заполнена пироксеновой фазой, остальное пространство (~ 25 %) занимает хромшпинель. Пироксеновая фаза по составу является энстатитом. Помимо магния (37 мас. % MgO) энстатитовая фаза содержит железо (3–4 мас. % FeO). Остальные следовые элементы (алюминий, кальций, хром), обнаруженные в микрозондовом спектре рентгенофлуоресценции, по-видимому, обусловлены перекрытием при микрозондовом анализе матрицы окружающего пиропового граната и соседствующей хромшпинели. Хромшпинель имеет хромитовый (алюмохромитовый — по номенклатуре Н. В. Павлова [6]) состав. В числе примесей (десятые доли мас. %), уверенно относящихся к выделению хромшпинели, обнаружен титан, а также ванадий, которых нет в гранатовой матрице и соседствующем пироксене.

На полированном срезе пиропового индивида из верховий Белой Кедвы (обр. 207801) выявлены десятки хаотически расположенных ламелевидных и субизометричных выделений оксидной фазы титан-циркониевого (ширланкитового) состава (рис. 5, c, d). Из примесей в составе данных включений уверенно определяется ванадий (до 0.7 мас. % V_2O_5), который отсутствует в пироповой матрице. Размеры данных выделений — от долей микрометров в поперечнике до нескольких единиц микрометров по удлинению. Среди включений были обнаружены также редкие, игольчатого облика выделения рутилоподобного TiO_2 . Размеры одного такого включения составляют 4×0.5 мкм.

Обсуждение результатов

Проведённое исследование оливина и пироповых гранатов из шлиховых проб аллювия Вольско-Вымской гряды указывает на присутствие среди них индивидов с относительно высокой сохранностью «первичных» эндогенных поверхностей (т. е. сформировавшихся непосредственно в коренном теле, из которого они впоследствии были вымыты). Дальность переноса для пиропов, обнаруженных в речном аллювии притока руч. Кыввож и на р. Чёрная Кедва, имеющих механический износ поверхности класса I, может составлять всего лишь первые километры. Такую же субкилометровую близость источника позволяет прогнозировать обнаружение крайне неустойчивого в механических потоках форстерито-

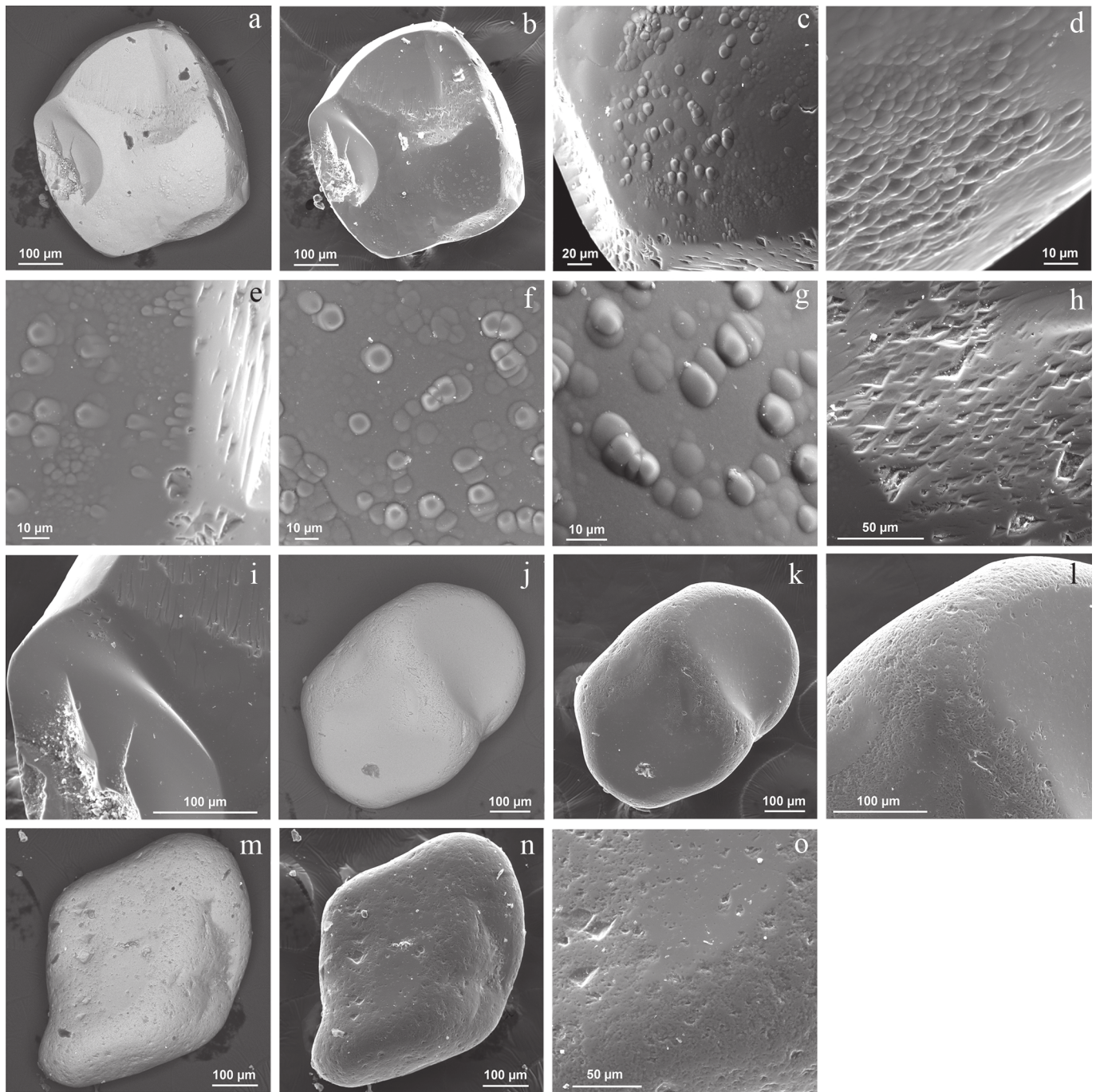


Рис. 5. Микрорельеф пиропов различной степени механического износа. Классы механического износа: а–і — I класс, обр. 504805 (р. Чёрная Кедва); j–l — II класс, обр. 503501 (р. Чёрная Кедва); m–o — III класс, обр. 207801 (верховья Белой Кедвы). Типоморфные элементы морфологии и поверхности: с–g — бугорчатость (пузырчатость); h — упорядоченные ямки растворения; l, o — экзогенные разнородные ямки механических повреждений; i — свежий скол; а–с, е — неизношенные рёбра; j–o — изношенные рёбра, изношенные стороны («псевдограницы») пироповых зёрен. Режим сканирования (электронный микроскоп Tescan VEGA 3 LMN): а, j, m — обратнорассеянные электроны; b–i, k, l, n, o — вторичные электроны

Fig. 5. Images of microrelief of pyrope of diverse degrees of mechanical abrasion (electron scanning microscope Tescan VEGA 3 LMN). Mechanical wear classes: a–i — class I, sp. 504805 (Chjornaya Kedva); j–l — class II, sp. 503501 (Chjornaya Kedva); m–o — class III, sp. 207801 (headstream of Belaya Kedva). Typomorphic elements of the morphology and the surface: c–g — blistering, h — ordered dissolution pits; l, o — exogenous heterogeneous pits of mechanical damages; i — fresh cleavage; a–c, e — unworn edges; j–o — worn edges, worn sides («pseudo-faces») of pyrope grains. Scanning mode (Tescan VEGA 3 LMN): a, j, m — backscattered electrons; b–i, k, l, n, o — secondary electrons

вого оливина, подобного тому, что был найден вблизи устья р. Чёрная Кедва. По нашему мнению, эти сведения позволяют прогнозировать существование выходов коренных магматических источников оливинов и пиропов на Вольско-Вымский гряде (по-видимому, где-то в центральной части Вымского выступа), которые в силу плохой оснащённости в регионе всё ещё не обна-

ружены. Для верификации данного прогноза целесообразно проведение в регионе более представительного слухового опробования.

Положение точек составов изученных среднететманских пиропов на дискриминационной диаграмме Н. В. Соболева [9] (рис. 7) показывает, что все изученные пиропы относятся к лерцолитовому парагенезису

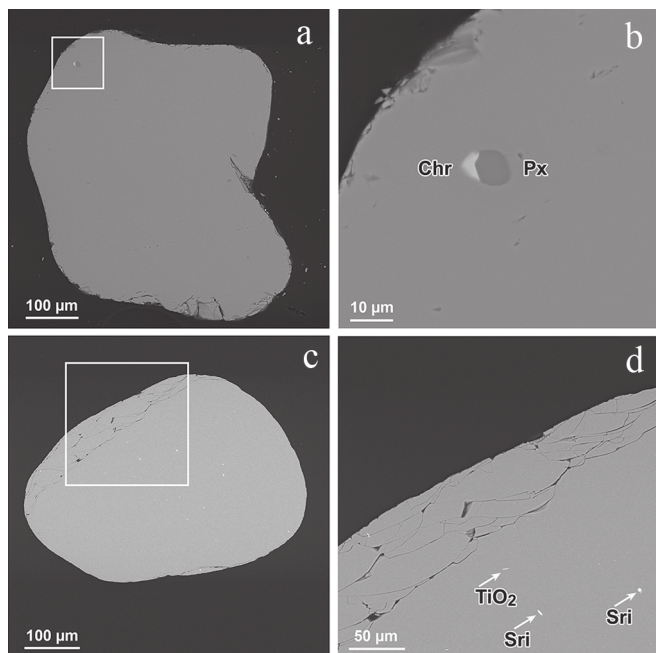


Рис. 6. Внутреннее строение пироповых гранатов (a, c — общий вид) и минеральные микровключения (b, d — детализация). Условные сокращения включений минералов: Chr — хромшпинель, Px — пироксен, Sri — шриланкит, TiO_2 (рутилоподобная фаза). Электронный микроскоп Tescan VEGA 3 LMN; режим сканирования: обратнорассеянные электроны

Fig. 6. Internal structure of pyrope garnets (a, c — general view) and mineral microinclusions (b, d — detail). Abbreviations for mineral inclusions: Chr — chrome-spinel, Px — pyroxene, Sri — srilankite, TiO_2 (rutile-like phase). Electron microscope Tescan VEGA 3 LMN; scanning mode: back-scattered electrons

литосферной мантии. Данному парагенезису соответствуют и обнаруженные в пироповых микровключениях ортопироксена (энстатита), а также хромшпинелей, уступающих по содержанию хрома хромшпинелям из гарцбургитов и дунитов.

Также хорошо видно, что большая часть фигуративных точек данных пиропов локализована в контурах пироповых составов из трубок взрыва Умбинского кимберлитового поля, располагающегося в нескольких десятках километров к северу и северо-западу от точек находок исследованных пиропов. При этом чаще всего фигуративные точки оказывались внутри контуров Умбинской и Средненской трубок. Этот результат, очевидно, указывает на то, что магматические породы трубок взрыва Умбинского поля являются аналогами пород — источников пиропов, обнаруженных нами в голоценовых аллювиальных псефитах в бассейнах рек Белая и Черная Кедва, а также Выми. Поскольку большая часть исследованных пиропов всё же имеет заметный механический износ эндогенных поверхностей, не исключено, что трубки Умбинского поля могут и сами быть коренными источниками для этих пироповых гранатов.

Любопытно, что шриланкит, который обнаружен нами в виде микровключений в пироповом индивиде в одном из притоков Левого Кывожа, является достаточно редко встречающимся в земной коре оксидом циркония и титана [7] и ранее был замечен во включениях в гранате из лампрофировой трубки Ягодка на Тубук-Хатыстырском поле Южной Якутии [3]. Судя по неко-

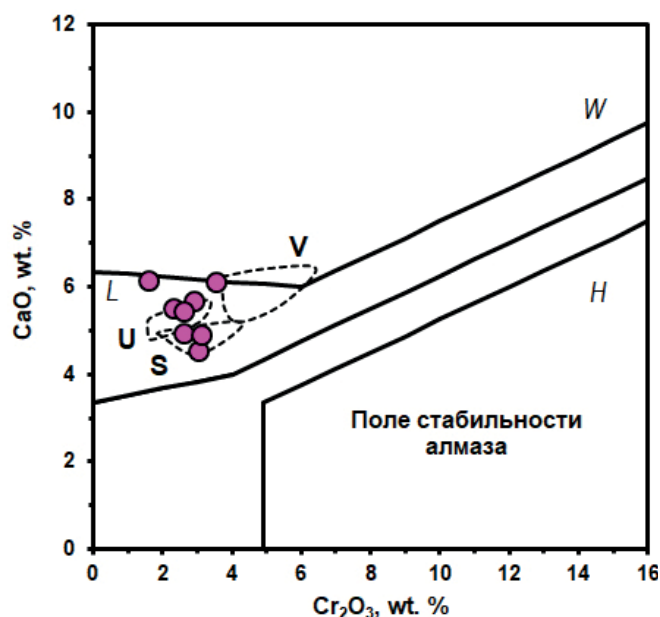


Рис. 7. Составы пиропов Вольско-Вымской гряды в полях гранатов различных парагенезисов на диаграмме Н. В. Соболева [9]: W — верлиты, L — лерцолиты, Н — дуниты и гарцбургиты. Контур пироповых составов из трубок взрыва Среднего Тимана: U — Умбинская (по данным [5]); S — Средненская, V — Водораздельная (по данным [4])

Fig. 7. Compositions of pyrope of the Volsko-Vymskaya ridge in garnet fields of various parageneses on the N. V. Sobolev diagram [9]: W — verlites; L — lherzolites; N — dunites and harzburgites. Contours of pyrope compositions from explosion pipes of the Middle Timan: U — Umbinskaya (according to [5]); S — Srednenskaya, V — Vodorazdel'naya (according to [4])

торым опубликованным работам, шриланкит — минерал глубинный, условия его формирования высокотермические и высокобарические. В работе [2] приводятся сведения о формировании граната и сингенетического ему шриланкита при температуре 800 °С и давлениях 15–20 кбар. В частности, предполагается [12], что он может образовываться при гранулитовом метаморфизме и является продуктом реакции между бадделейтом и ильменитом в среде, недосыщенной кремнезёмом.

Выводы

На Среднем Тимане в голоценовых аллювиальных псефитах различных водотоков верховий Белой Кедвы и Выми (Кыввожский золотороссыпной район), а также в среднем течении Чёрной Кедвы обнаружены признаки ореолов рассеяния пироповых гранатов. Гранаты принадлежат лерцолитовому парагенезису и по составу идентичны гранатам из Умбинского кимберлитового поля Среднего Тимана. Магматические породы трубок взрыва Умбинского поля, по-видимому, являются аналогами пока ещё не обнаруженных коренных источников пиропов Кывожского района и (или) сами являются источниками данных пиропов.

В пироповом индивиде верховий р. Белая Кедва обнаружены многочисленные микровключения шриланкита — высокобарного и высокотемпературного оксида циркония и титана (первая находка минерала на Тимане).

Авторы выражают благодарность работникам Сыктывкарского сектора ВСЕГЕИ (В. Н. Иванову,



Н. А. Васильченко, В. Г. Котельникову, В. А. Жаркову, А. А. Пархачёву), любезно предоставившим минералы шилловых концентратов для исследования. Авторы признательны работникам Института геологии ФИЦ Коми НЦ, осуществлявшим различные рутинные исследования: А. С. Шуйскому, Е. М. Тропникову (электронная микроскопия сканирующего типа, микрозондовый анализ), Н. Х. Хачатурян (поиск и выделение минералов тяжёлой фракции), а также В. И. Ракину за консультации по вопросам кристалломорфологии граната.

Литература

1. Бакулина Л. П. Типоморфизм минералов мантийных ассоциаций на Среднем Тимане: Автореф. дис. ... канд. г-м. наук. Свердловск, 1986. 18 с.
2. Кориневский В. Г., Блинов И. А. Первая находка минерала шриланкита на Урале // ДАН. 2016. Т. 470. № 2. С. 204–207.
3. Костровицкий С. И., Гаранин В. К., Варламов Д. А. Шриланкит — вторая находка в мире // ДАН. 1993. Т. 328. № 5. С. 601–604.
4. Макеев А. Б., Дудар В. А. Минералогия алмазов Тимана. СПб.: Наука, 2001. 336 с.
5. Мальков Б. А., Холопова Е. Б. Трубки взрыва и алмазоносные россыпи Среднего Тимана. Сыктывкар: Геопринт, 1995. 49 с.
6. Павлов Н. В. Химический состав хромшпинелидов в связи с петрографическим составом пород ультраосновных интрузивов // Труды института геологических наук. Серия рудных месторождений. 1949. Вып. 103 (13). 88 с.
7. Резвухин Д. И. Гранаты с минеральными включениями оксидов и сульфидов из кимберлитовой трубки Интернациональная: минералогия, геохимия и связь с процессами мантийного метасоматоза в литосферной мантии Мирнинского поля, Сибирский кратон: Автореф. канд. дис. Новосибирск, 2016. 17 с.
8. Соболев Д. Б., Тимонин Н. И. Геологическая карта. Атлас Республики Коми. М.: Фория, 2011, с. 44–45.
9. Соболев Н. В. О минералогических критериях алмазоносности кимберлитов // Геология и геофизика. 1971. № 3. С. 70–79.
10. Тиманский кряж : В 2 т. / Ред.-сост.: Л. П. Шилов, А. М. Плякин, В. И. Алексеев. Т. 1. История, география, жизнь: Монография. Ухта: УГТУ, 2010. 339 с.
11. Хмельков А. М. Основные минералы кимберлитов и их эволюция в процессе ореолообразования (на примере Якутской алмазоносной провинции). Новосибирск: АРТА, 2008. 252 с.
12. Bingen B., Austrheim H., Whitehouse M. J. Ilmenite as a source for zirconium during high-grade metamorphism? Textural evidence from the Caledonides of western Norway and implications for zircon geochronology // Journal of Petrology, 2001. Vol. 42 (2). Pp. 355–375.

References

1. Bakulina L. P. *Tipomorfizm mineralov mantijnyh asociacij na Srednem Timane* (Typomorphism of minerals of mantle associations on the Middle Timan), author's abs. of dissert. of the cand. of geol. and mineral. sci., Sverdlovsk, 1986, 18 p.
2. Korinevsky V. G., Blinov I. A. *Pervaya nahodka minerala shrilankita na Urale* (First find of srilankite in the Urals). Doklady Earth Sciences, 2016, Moscow, 470, pp. 957–960.
3. Kostrovitsky S. I., Garanin V. K., Varlamov D. A. *Shrilankit — vtoraya nahodka v mire* (Srilankite — the second find in the world). Doklady Earth Sciences, 1993, V. 328, No. 5, pp. 601–604.
4. Makeyev A. B., Dudar V. A. *Mineralogiyaalmazov Timana* (Diamond Mineralogy of the Timan). St. Petersburg: Nauka, 2001, 336 p.
5. Malkov B. A., Kholopova E. B. *Trubki vzryva ialmazonosnye rossypi Srednego Timana* (Explosion pipes and diamond-bearing placers of the Middle Timan). Syktyvkar: Geoprint, 1995, 49 p.
6. Pavlov N. V. *Himicheskij sostav hromshpinelidov v svyazi s petrograficheskim sostavom porod ul'traosnovnyh intruzivov* (Chemical composition of chrome-spinels in view of the petrographic composition of the rocks of the ultrabasic intrusions). Proceedings of the Institute of Geological Sciences. Ore deposits series, 1949, 103(13), 88 p.
7. Rezvukhin D. I. *Granaty s mineralnymi vklyucheniyami oksidov i sulfidov iz kimberlitovoj trubki Internatsionalnaya: mineralogiya, geohimiya i svyaz s processami mantijnogo metasomatoza v litosfernoj mantii Mirninskogo polya, Sibirskij kraton* (Garnets with mineral inclusions of oxides and sulfides from the Internatsionalnaya kimberlite pipe: mineralogy, geochemistry, and relation to mantle metasomatoses processes in the lithospheric mantle of the Mirny field, Siberian craton). Cand. degree thesis, Novosibirsk, 2016, 17 p.
8. Sobolev D. B., Timonin N. I. *Geologicheskaya karta* (Geological map). *Atlas Respubliki Komi* (Atlas of Komi Republic). Moscow: Foriya, 2011, pp. 44–45.
9. Sobolev N. V. *O mineralogicheskikh kriteriyakhalmazonosnosti kimberlitov* (On mineralogical criteria for the diamond content of kimberlites), *Geologiya i geofizika*, 1971, No 3, pp. 70–79.
10. *Timanskiy kryazh* (Timan ridge). Compiling editors: L. P. Shilov, A. M. Plyakin, V. I. Alekseev. Vol. 1. *Istoriya geografiya, zhizn' Monografiya* (History, geography, practice: monography). Ukhta, Ukhta State Techn. Univ., 2010, 339 p.
11. Khmelkov A. M. *Osnovnye mineraly kimberlitov i ih evolyuciya v processe oreolobrazovaniya (na primere Yakutskojalmazonosnoj provincii)* (Fundamental minerals of kimberlites and their evolution in the process of halo-forming (on the example of the Yakutia diamond-bearing province). Novosibirsk: ARTA, 2008, 252 p.
12. Bingen B., Austrheim H., Whitehouse M. J. Ilmenite as a source for zirconium during high-grade metamorphism? Textural evidence from the Caledonides of western Norway and implications for zircon geochronology. *Journal of Petrology*, 2001, V. 42 (2), pp. 355–375.

Поступила в редакцию / Received 08.10.2020



МИНЕРАЛЬНЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ ПЕЩЕРЫ ХОЛОДНЫЙ ГРОТ (БЗЫБСКОЕ УЩЕЛЬЕ, АБХАЗИЯ) И ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ УГЛЕРОДА $\delta^{13}\text{C}$ И КИСЛОРОДА $\delta^{18}\text{O}$ КАРСТОГЕННЫХ КАРБОНАТОВ

О. Я. Червяцова¹, С. С. Потапов², Л. В. Леонова³, Дж. Бейкер⁴, Р. С. Дбар⁵

¹Государственный природный заповедник «Шульган-Таш», Иргизлы, Башкортостан

²Институт минералогии ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, Миасс

³Институт геологии и геохимии УрО РАН, Екатеринбург

⁴Университет Сиань Цзяотун, Сиань, Китай

⁵Институт экологии АНА, Сухум, Абхазия

s_almazov@74.ru

Статья посвящена результатам исследования минерального и изотопного состава спелеотем пещеры Холодный грот в Бзыбском ущелье Абхазии. Проведено картирование полости и зафиксированы различные типы вторичных минеральных отложений. В пещере установлены следующие минеральные образования (спелеотемы): мондмилх, кораллиты, гуры, карбонатные брекчии, биогенные фосфаты. Обращает на себя внимание обилие аллогенных минеральных включений в натечном кальците, связанных с продуктами выветривания магматических пород (циркон, калиевый полевой шпат, ильменит, рутил, монацит, апатит). Источником этих минералов предположительно являются коры выветривания среднеюрских вулканитов.

Изотопный состав кислорода всех изученных карбонатов отражает участие вод метеорной генерации. При этом изотопный состав углерода подвержен существенным вариациям, связанным с кинетическим фракционированием (дегазацией CO_2). По результатам петрографических и изотопных исследований была предпринята попытка типизации спелеотем по характеру питания и особенностям кристаллизации.

Также в пещере выявлена фосфатная минерализация в виде темно-коричневых тонкослоистых корочек гидроксилапатита, образованных на месте старых залежей гуано.

Ключевые слова: карбонатный карст, карбонатная и фосфатная минерализация, кальцит, гидроксилапатит, гуано летучих мышей, изотопный состав, пещера Холодный грот, Бзыбское ущелье, Абхазия.

MINERAL SEDIMENTS OF THE KHOLODNY GROTTO CAVE (BZYB GORGE, ABKHAZIA) AND $\delta^{13}\text{C}$ CARBON AND $\delta^{18}\text{O}$ OXYGEN ISOTOPE COMPOSITION OF KARSTOGENIC CARBONATES

O. Ya. Chervyatsova¹, S. S. Potapov², L. V. Leonova³, J. Baker⁴, R. S. Dbar⁵

¹«Shulgan-Tash» State Nature Reserve, Irgizly, Bashkortostan

²Institute of Mineralogy SU FRC MG UB RAS, Miass

³Institute of Geology and Geochemistry, UB RAS, Yekaterinburg

⁴Xi'an Jiaotong University, China

⁵Institute of Ecology of ANA, Sukhum, Abkhazia

The article is devoted to the results of the study of the mineral and isotopic composition of speleothems of the of the Kholodnyy Grotto cave in the Bzyb gorge of Abkhazia. The cavity was mapped and various types of secondary mineral deposits were recorded. The following mineral formations (speleothems) have been established in the cave: Mondmilch, corallites, guhrs, carbonate breccias, biogenic phosphates. Attention is drawn to the abundance of allogeneic mineral inclusions in drap calcite associated with the weathering products of igneous rocks (zircon, potassium feldspar, ilmenite, rutile, monazite, apatite). The source of these minerals is presumably the weathering crust of the Middle Jurassic volcanics.

The oxygen isotope composition of all studied carbonates reflects the participation of meteoric waters. Moreover, the isotopic composition of carbon is subject to significant variations associated with kinetic fractionation (CO_2 degassing). Based on the results of petrographic and isotopic studies, an attempt was made to typify speleothems according to the nature of their feeding and the characteristics of crystallization.

Also, the cave revealed phosphate mineralization in the form of dark brown thin-layered crusts of hydroxylapatite, formed in place of old guano deposits.

Keywords: carbonate and phosphate mineralization, calcite, hydroxylapatite, bat guano, isotopic composition, Kholodnyy Grotto cave, Bzyb gorge, Abkhazia.

Для цитирования: Червяцова О. Я., Потапов С. С., Леонова Л. В., Бейкер Дж., Дбар Р. С. Минеральные отложения пещеры Холодный грот (Бзыбское ущелье, Абхазия) и изотопный состав углерода $\delta^{13}\text{C}$ и кислорода $\delta^{18}\text{O}$ карстогенных карбонатов // Вестник геонаук. 2020. № 10(310). С. 12–21. DOI: 10.19110/geov.2020.10.2.

For citation: Chervyatsova O. Ya., Potapov S. S., Leonova L. V., Baker J., Dbar R. S. Mineral sediments of the Kholodnyy Grotto cave (Bzyb gorge, Abkhazia) and $\delta^{13}\text{C}$ carbon and $\delta^{18}\text{O}$ oxygen isotope composition of karstogenic carbonates. Vestnik of Geosciences, 2020, 10(310), pp. 12–21. DOI: 10.19110/geov.2020.10.2.



Введение

Краткое описание географического положения и морфологии пещеры

Пещера Холодный грот расположена в низовьях Бзыбского ущелья, в левом борту, на абсолютной отметке около 300 м н.у.м. Она хорошо известна местному населению, однако описаний её в литературе найти не удалось. Пещера заложена в нижнемеловых известняках вблизи крупного тектонического нарушения субмеридионального простирания (рис. 1).

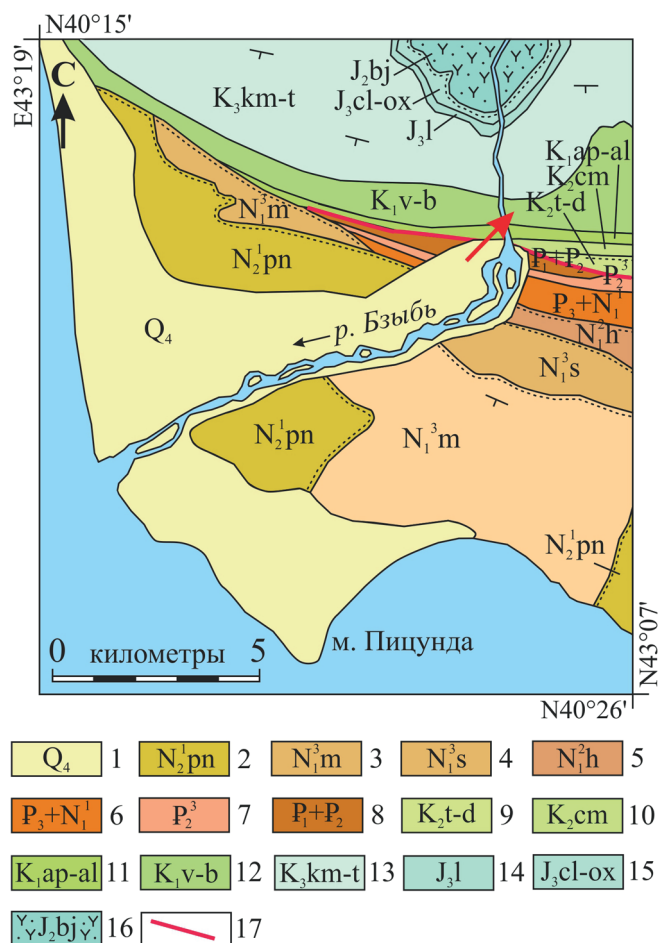


Рис. 1. Геологическая карта масштаба 1 : 200000 ([2] с изменениями) с указанием стрелкой положения пещеры Холодный грот.

Условные обозначения. Возраст и литология пород: 1 — четвертичная система, современный отдел — аллювиальные галечники и пески; 2 — нижний плиоцен, понтический ярус — глины, пески, конгломераты; 3 — миоцен, мэотический ярус — конгломераты с прослоями песчаников, глин, известняков; 4 — миоцен, сарматский ярус — глины, песчаники, конгломераты; 5 — средний миоцен, гельветский ярус — конгломераты, песчаники, глины; 6 — олигоцен и низы среднего миоцена — гипсоносные глины и песчаники (майкопская свита); 7 — верхний эоцен — битуминозные сланцеватые мергели; 8 — палеоцен, нижний и средний эоцен — известняки и фораминиферовые мергели; 9 — верхний мел, туронский, сенонский и датский ярусы — слоистые известняки; 10 — верхний мел, сенонский ярус — глины, мергели и туффиты; 11 — верхний мел, аптский и альбский ярусы — глины, мергели и мергелистые известняки; 12 — верхний мел, валанжинский, готеривский и барремский ярусы — слоистые и массивные известняки; 13 — верхняя юра, киммериджский и титонский ярусы — известняки, доломиты, глины, песчаники и конгломераты; 14 — верхняя юра, луситанский ярус — органогенные извест-

няки, доломиты и мергели; 15 — верхняя юра, келловейский и оксфордский ярусы — песчаники и глины; 16 — средняя юра, байосский ярус — порфириновые туфы, туфобрекчии, туфо-конгломераты; 17 — тектонические нарушения

Fig. 1. Geological map of scale 1: 200000 (Kurochkin et al., 1959 with changes) with an arrow indicating the position of the Kholodnyy Grotto cave.

Legend. Age and lithology of rocks: 1 — Quaternary system, modern division — alluvial pebbles and sands; 2 — Lower Pliocene, Pontian stage — clays, sands, conglomerates; 3 — Miocene, Meotian stage — conglomerates with interlayers of sandstones, clays, limestones; 4 — Miocene, Sarmatian stage — clays, sandstones, conglomerates; 5 — Middle Miocene, Helvetian stage — conglomerates, sandstones, clays; 6 — Oligocene and lower strata of the Middle Miocene — gypsum-bearing clays and sandstones (Maikop suite); 7 — Upper Eocene — bituminous shale marls; 8 — Paleocene, Lower and Middle Eocene — limestones and foraminiferal marls; 9 — Upper Cretaceous, Turonian, Senonian and Danian stages — layered limestones; 10 — Upper Cretaceous, Cenomanian stage — clays, marls and tuффites; 11 — Upper Cretaceous, Aptian and Albian stages — clays, marls and marly limestones; 12 — Upper Cretaceous, Valanginian, Hauterivian and Barremian stages — layered and massive limestones; 13 — Upper Jurassic, Kimmeridgian and Tithonian stages — limestones, dolomites, clays, sandstones and conglomerates; 14 — Upper Jurassic, Lusitanian stage — organogenic limestones, dolomites and marls; 15 — Upper Jurassic, Callovian and Oxfordian stages — sandstones and clays; 16 — Middle Jurassic, Bajocian stage — porphyritic tuuffs, tuфф breccias, tuфф conglomerates; 17 — Tectonic dislocations

Поскольку на момент исследований отсутствовали топографические материалы, авторами проведено картирование полости и зафиксированы различные типы вторичных минеральных отложений (рис. 2). Характерная морфология входной части пещеры показана также на фото (рис. 2, б). Пещера имеет объёмный входной грот, в котором следы коррозионной проработки напорными водами (с использованием преимущественно трещин напластования с азимутом падения 135° и углом падения 17°) сохраняются только на потолке. Дальняя часть полости полностью закрыта глыбовой осыпью с размерами глыб от 2 м до щебнистой фракции. Эта осыпь, видимо, сложена материалом, вынесенным из внутренних полостей карстовой системы. В южной части входного грота щебнистые отложения осыпи сцементированы кальцитом в брекчию.

Над осыпью доступно два небольших тупиковых восходящих хода, в которых встречаются разнообразные современные спелеотемы (гуровые плотинки, мондмилх, кораллиты, гуры) и старое скопление гуано летучих мышей. Далее ходы перекрываются непроходимыми глыбовыми завалами.

Доступная часть пещеры на момент посещения характеризовалась низким содержанием CO₂, соответствующим атмосферным значениям (0.03 об. %), что указывает на хорошую вентиляцию атмосферным воздухом.

Методы исследований

В пещере Холодный грот отобраны различные минеральные образования (рис. 2). Рентгенофазовый анализ выполнен в Институте минералогии Южно-Уральского ФНЦ минералогии и геоэкологии УрО РАН (г. Миасс) с использованием рентгеновского дифрак-

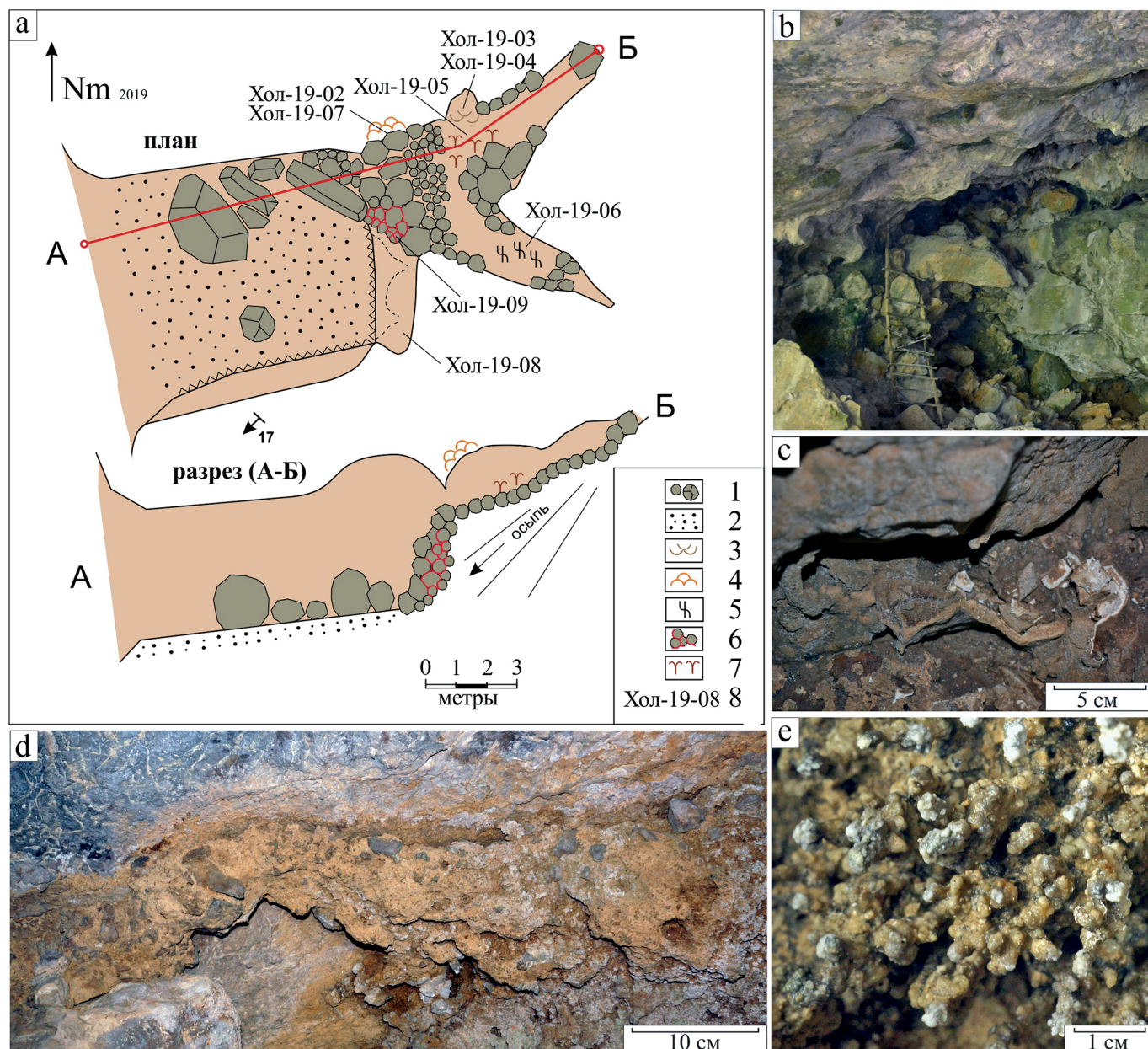


Рис. 2. Топографические материалы и фотографии изученных спелеотем: а — план и разрез пещеры Холодный грот. Условные обозначения: 1 — крупноглыбовая осыпь; 2 — рыхлые отложения; 3 — кальцитовые гурсы; 4 — мондмилч; 5 — геликтиты; 6 — карстогенная брекчия; 7 — старое гуано летучих мышей; 8 — точки отбора минеральных образцов. Фотографии: б — общий вид входного грота пещеры с крупноглыбовой осыпью; с — гуровые плотинки; д — карстогенные брекчии; е — кораллиты с «нашлепками» мондмилча на концах

Fig. 2. Topographic materials and photographs of the studied speleothems: A — plan and section of the Kholodnyy Grotto cave. Legend: 1 — large-block talus; 2 — loose deposits; 3 — calcite guhrs; 4 — mondmilch; 5 — helictites; 6 — karstogenic breccia; 7 — old bat guano; 8 — points of collection of mineral samples. Photos: b — general view of the entrance grotto of the cave with large boulder talus; c — gours dams; d — karstogenic breccias; e — corallites with «blotches» of mondmilch at the ends

тометра ДРОН-2.0 с CuK_α -излучением (операторы Е. Д. Зенович, П. В. Хворов).

Текстурные и структурные особенности кальцитовых минеральных образований изучены в петрографических шлифах с применением поляризационного микроскопа Carl Zeiss Observer Z1m в Институте физики молекул и кристаллов УНЦ РАН (г. Уфа).

Морфология и элементный состав минеральных образцов изучались методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопах JSM 6390LV (JEOL) с энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 450 X-max 80 (Oxford Instruments) в Институте геологии и геохимии УрО РАН (г. Екатеринбург, аналитик Л. В. Леонова) и TESCAN Vega 3 с X-ACT (Oxford

Instruments) в Институте проблем сверхпластичности металлов УНЦ РАН (г. Уфа, аналитик И. И. Мусабилов).

Измерения соотношений стабильных изотопов углерода ($\delta^{13}\text{C}$) и кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) в карбонатных отложениях проведены на IRMS масс-спектрометре Thermo Finnigan MAT253 в Институте глобальных и экологических изменений Университета Сиань Цзяотун (Китай, г. Сиань, аналитик Д. Бейкер). Прибор работает в режиме dual-inlet и присоединен к автосамплеру Kiel IV. Автосамплер криогенно отделяет CO_2 , получаемый при разложении карбонатов фосфорной кислотой. Значения стабильных изотопов калибровались в соответствии с измерениями международного стандарта NBS-19. Точность определения составляет $< 0.08 \text{ ‰}$ для $\delta^{18}\text{O}$ и $< 0.04 \text{ ‰}$ для $\delta^{13}\text{C}$.



Результаты и обсуждение минералогических исследований

Известняк, вмещающий пещеру, характеризуется светло-серым цветом, пелитоморфной текстурой с мелкими стилолитовыми швами. Размер зёрен кальцита не превышает 20 мкм, по химическому составу кальцит относится к низкомагнезиальному (MgO 0.43–1.6 мас. %). В известняке обнаружены акцессорные включения идиоморфных кристаллов калиевого полевого шпата (рис. 3, а), апатита, замещающего органические остатки (рис. 3, б), ильменита (рис. 3, с) и пирита (рис. 3, д). ЭДС-спектры минеральных включений, обнаруженных в кальците гуровой плотинки, показаны на рис. 3 (е–h).

Гуры — кальцитовые плотинки, возникающие в руслах водотоков у любого препятствия на участках с высокой турбулентностью, форсирующей дегазацию CO_2 и кристаллизацию кальцита. При этом плотинка гура растет вширь и вверх, постепенно подпруживая водоток. Гуры локально встречаются в дальней части пещеры. В настоящее время они не активны. Текстурные и структурные особенности кальцита, слагающего плотинки гур (проба Хол-19-03), показаны на рис. 4, а–с. Для кальцита характерно чередование зон, сложенных разноориентированными гипидиоморфными кристаллами кальцита размером до 0.2 мм (рис. 4, б) и зон с волнистой строматолитоподобной текстурой и микритовой структурой (рис. 4, с). Наиболее вероятно, что такая особенность объясняется колебаниями гидрологического и гидрохимического режимов гуровых ванночек.

При изучении кальцита гуровой плотины в шлифе методом СЭМ-ЭДС обнаружены многочислен-

ные полиминеральные включения. Это органоморфные включения, представленные апатитом (рис. 4, d), агрегаты гётита, предположительно являющиеся псевдоморфозами по фрамбоидальному пириту (рис. 4, e). Также были замечены разрушенные зёрна рутила (рис. 4, f) и субмикронные включения (La)-монацита (рис. 4, g). ЭДС-спектры минеральных включений, обнаруженных в кальците гуровой плотинки, показаны на рис. 4, e–h.

Текстурные и структурные особенности цемента карстогенной брекчии показаны на рис. 5, а–с. Для брекчии характерна слоисто-полосчатая текстура, обусловленная включениями механической примеси глинистых частиц, и параллельно-шестоватая структура (рис. 5, b), указывающая на относительно равновесный рост при стабильных малых расходах воды и без существенной дегазации [8]. Иногда в матрице брекчии встречаются зоны, сформированные идиоморфными кристаллами кальцита (рис. 5, c). Особенностью этого кальцита также является обилие аллотигенных включений. В частности, были обнаружены хорошо окристаллизованные индивиды апатита и калиевого полевого шпата (рис. 5, d), короткопризматические кристаллы циркона размером 40–30 мкм (рис. 5, e, f), зёрна ильменита (рис. 5, g). ЭДС-спектры обнаруженных включений показаны на рис. 5, h–k.

Таким образом, внутри кальцитовых спелеотем обильно присутствуют минеральные включения, типичные для продуктов выветривания магматических пород (циркон, рутил, ильменит, калиевый полевой шпат, La-монацит). Включения апатита, по всей ви-

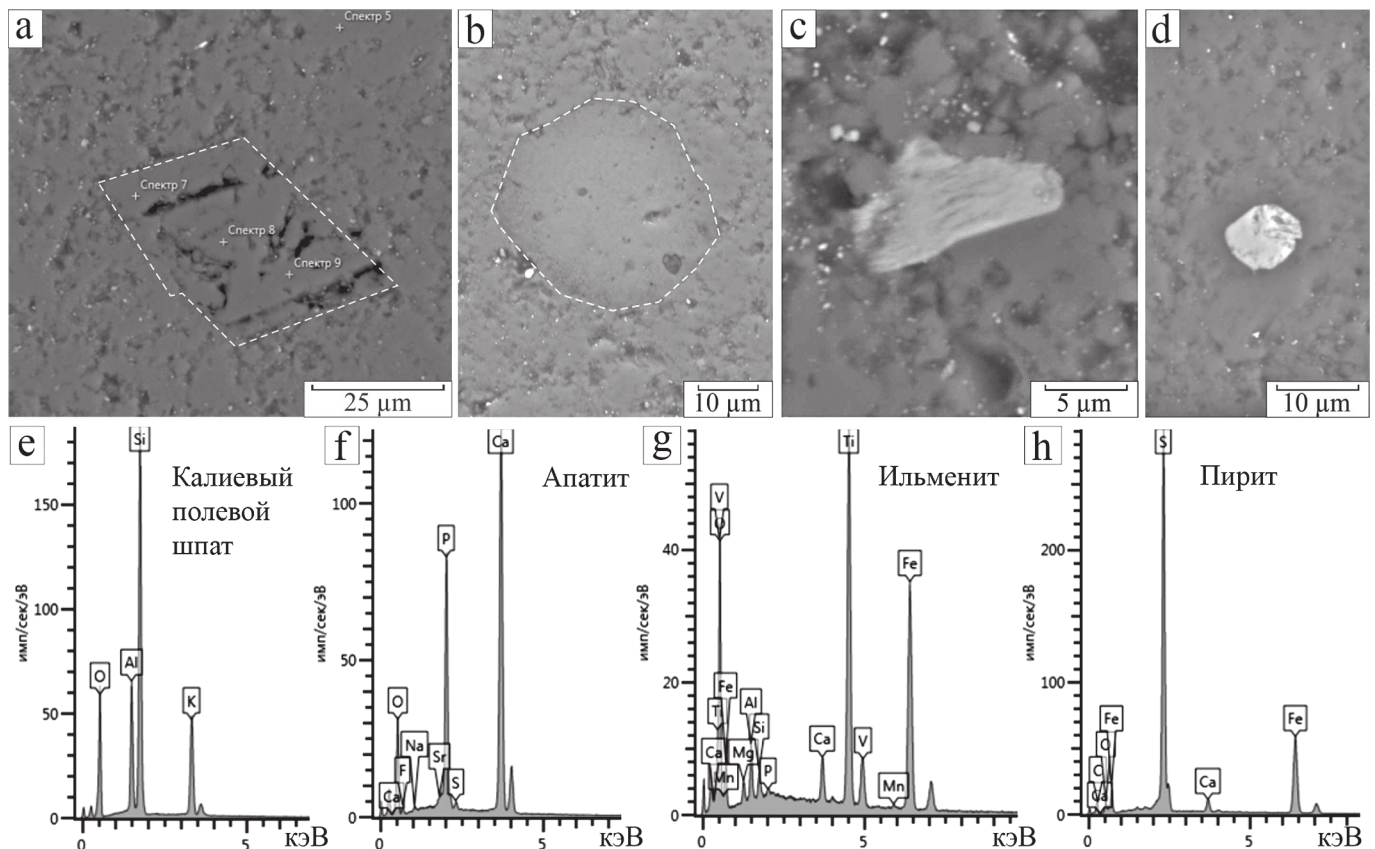


Рис. 3. Акцессорные минералы вмещающих известняков. СЭМ-фотографии, режим BSE: а — калиевый полевой шпат; б — апатит, замещающий органические остатки; с — ильменит; д — пирит; е–h — ЭДС-спектры. Штриховая линия — границы зерна

Fig. 3. Accessory minerals of the host limestone: а — potassium feldspar; б — apatite replacing organic remains; с — ilmenite; д — pyrite; е–h — EDS-spectra. Dashed line — crystal boundaries

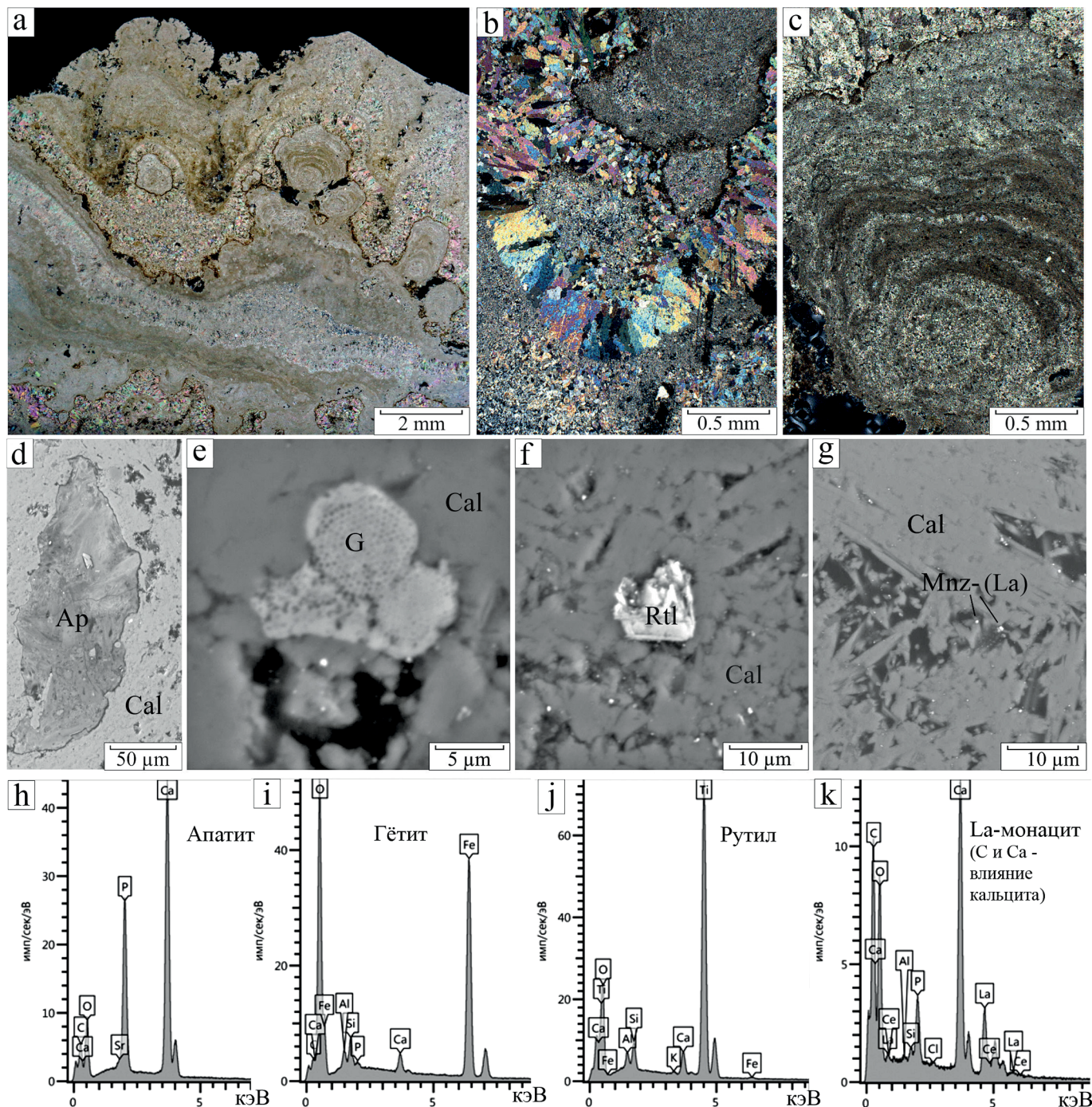


Рис. 4. Текстурно-структурные особенности и минеральные включения в кальците, слагающем гуровые плотинки (проба Хол-19-03). Оптические фотографии, поляризованный свет: а — общий вид агрегата; б — зона гипидиоморфных кристаллов; в — строматолитоподобные зоны. SEM-фотографии, режим BSE: d — апатит, замещающий органические останки; е — псевдоморфозы гётита по фрамбоидальному пириту (?); f — зёрна рутила; g — зёрна La-монацита; h–k — ЭДС-спектры (C и Ca на спектре монацита — артефакт влияния кальцитовой подложки).

Условные обозначения: Ap — апатит, Cal — кальцит, G — гётит; Rtl — рутил; Mnz (La) — La-монацит

Fig. 4. Textural and structural features and mineral inclusions in calcite composing guhr dams (sample Khol-19-03).

Optical photographs, polarized light: a — general view of the unit; b — zone of hypidiomorphic crystals; c — stromatolite-like zones. SEM-photos, BSE-mode: d — apatite replacing organic remains; e — pseudomorphs of goethite over framboidal pyrite (?); f — rutile grains; g — grains of La-monazite; h–k — EDS spectra (C and Ca in the spectrum of monazite are an artifact of the influence of the calcite substrate). Legend on the photo: Ap — apatite, Cal — calcite, G — goethite; Rtl — rutile; Mnz (La) — La-monazite

димости, имеют различное происхождение. Для органоморфных включений во вмещающих породах и спелеотемах (рис. 3, б; 4, d) наиболее вероятно аутигенное биогенное происхождение (о находках биогенных фосфатов в пещере см. ниже), а для окристаллизованных зёрен, несущих следы механического износа (рис. 5, d), — аллотигенный источник.

Часть акцессорных минералов (калиевый полевой шпат, ильменит) также была выявлена в виде акцессорных включений во вмещающих известняках и могла быть освобождена при их коррозии. Другим потенциальным источником сноса являются эффузивные породы байосского яруса средней юры (ходжалская свита), представленные порфиристыми туфами, ту-



фобрекциями, туфоконгломератами [1]. Ближайшие выходы этих пород на дневную поверхность расположены в 2 км севернее от пещеры, их гипсометрическое положение допускает возможность переотложения материала из кор выветривания вулканитов, вмещающих пещеру, на карбонатный массив.

Учитывая близость пещеры к крупному разрывному нарушению (рис. 1), происхождение крупноглыбовой осыпи и карстогенных брекчий может быть связано с дроблением по тектоническим трещинам с одновременным проникновением по ним карстовых вод, отлагавших цементирующий кальцит.

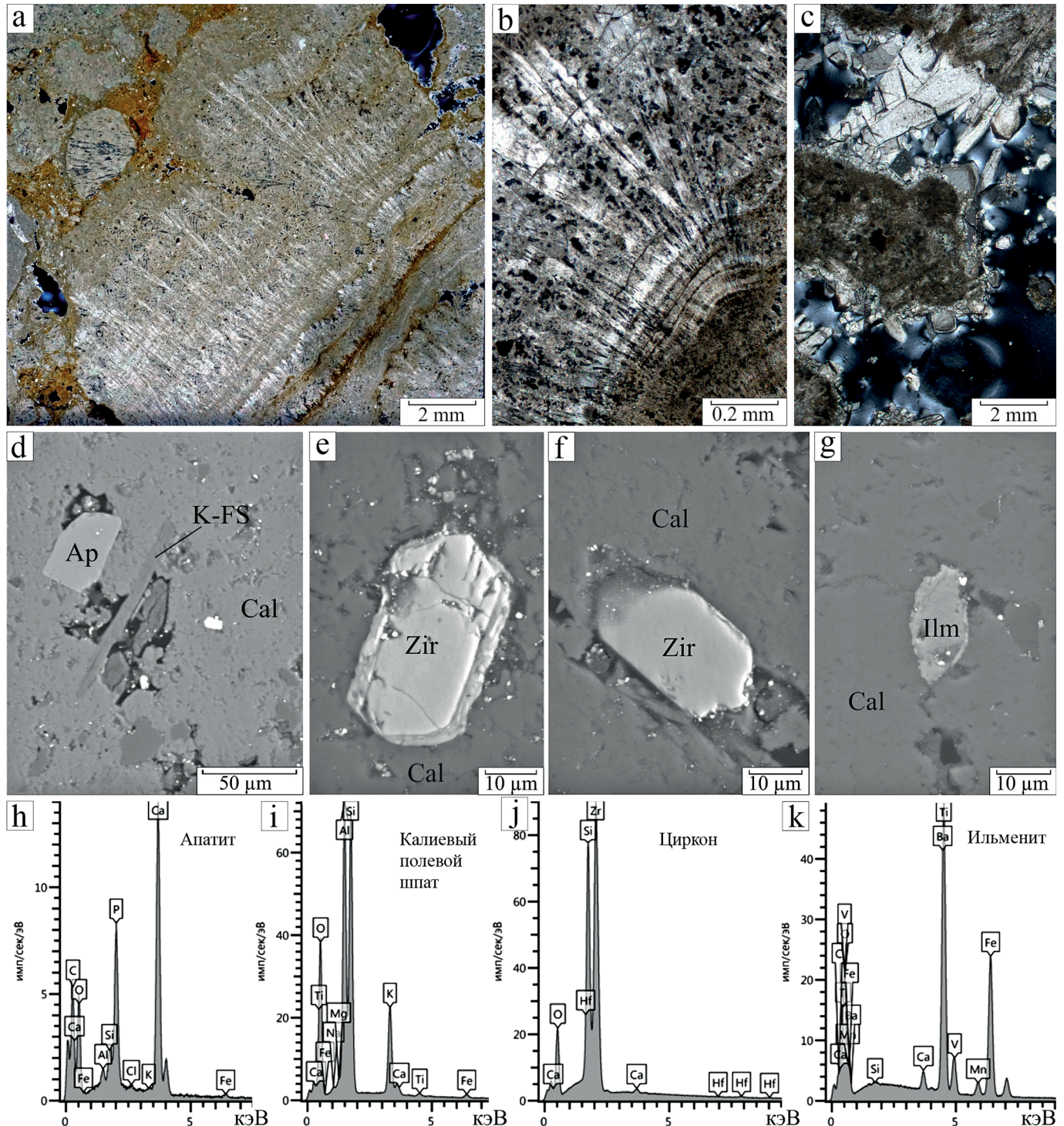


Рис. 5. Текстурно-структурные особенности и минеральные включения в кальците, цементирующем карстовую брекцию (образец Хол-19-09). *Оптические фотографии, поляризованный свет:* а — общий вид; б — параллельно-шестоватая структура; в — идиоморфные кристаллы кальцита в микрополостях. *SEM-фотографии, режим BSE:* д — апатит и калиевый полевой шпат; е, ф — короткопризматические кристаллы циркона; г — зёрна ильменита; *h — к — ЭДС-спектры.*

Условные обозначения: Cal — кальцит; Ap — апатит; K-FS — калиевый полевой шпат; Zir — циркон; Ilm — ильменит

Fig. 5. Textural and structural features and mineral inclusions in calcite cementing karstogenic breccia (sample Khol-19-09). *Optical photographs, polarized light:* a — general view; b — parallel-columnar structure; c — euhedral calcite crystals in microcavities. *SEM-photos, BSE-mode:* d — apatite and potassium feldspar; e, f — short-prismatic zircon crystals; g — grains of ilmenite; *h — k — EDS spectra.*

Legend: Cal — calcite; Ap — apatite; K-FS — potassium feldspar; Zir — zircon; Ilm — ilmenite

Среди современных активных спелеотем в пещере широко распространено лунное молоко (мондмилх), представленное мягкими белыми почковидными выделениями (рис. 6, а). Микроскопическое изучение показало, что мондмилх сложен игольчато-волокнистым кальцитом (*needle-fibre calcite*, или *NFC* в англоязычной литературе) с эпитаксиальными обрастаниями отдельных фибрилл кристаллами более поздней генерации (рис. 6, б, с).

Генезис *NFC* является предметом дискуссий. Часто он трактуется через микробно-опосредованное осаждение при участии метаболитов бактерий [7] или как псевдоморфозы по биологическим объектам — гифам грибов или актиномицет [4, 6, 13]. Другие же авторы объясняют происхождение *NFC* чисто хемогенным осаждением в результате медленной дегазации или испарения капиллярных растворов либо кристаллизацией из аэрозолей [5, 9, 10]. В изученных образцах игольчато-волокнистого кальцита Холодного грота не выявлены микробные объекты, поэтому мы склоняемся к абиогенному происхождению изученных образцов, вероятно за счёт периодической дегазации CO_2 из капиллярных вод.

Следует отметить, что в отличие от вмещающих известняков, характеризующихся примесью магнезии (MgO 0.43–1.6 мас.%), кальцит спелеотем этой примеси не содержит. Такая особенность может объясняться кристаллизацией из постоянно меняющихся растворов, в условиях, не допускающих испарительного насыщения [14].

Также в пещере выявлена фосфатная минерализация в виде тёмно-коричневых тонкослоистых корочек апатита, образованных на месте старых залежей гуано (рис. 7). Поскольку пещеры прибрежной низкотермальной части Абхазии заселены летучими мышами и имеют скопления гуано, для них типичны биогенные фосфаты кальция, образованные при реакции фосфорсодержащих растворов с карбонатным субстратом [3].

Результаты изотопно-геохимических исследований

Изотопный состав углерода и кислорода вмещающих пород и различных спелеотем пещеры Холодный грот приводится в таблице. Также были опробованы современные карбонатные травертины, образующиеся из вод карстового источника Девичьи Слёзы, расположенного в Бзыбском ущелье недалеко от пещеры. Полученные данные в сравнении с хорошо изученными кальцитовыми образованиями Новоафонской пещеры (массив из более 300 проб, неопубликованные данные, 2017–2019 гг.) показаны на рис. 8.

Кальцит вмещающих известняков имеет изотопный состав $\delta^{13}\text{C}$ 2.47 ‰ V-PDB и $\delta^{18}\text{O}$ –5.56 ‰ V-PDB, характерный для морских карбонатов нижнемелового возраста [11]. Изотопный состав кислорода карстогенных карбонатов пещеры Холодный грот и травертинов источника Девичьи Слёзы составляет от $\delta^{18}\text{O}$ –11.49 ‰ V-PDB до $\delta^{18}\text{O}$ –7.86 ‰ V-PDB, что соответствует диапазону составов спелеотем Новоафонской пещеры (это можно объяснить схожими климатическими условиями и изотопным составом осадков ввиду близкой высоты расположения обоих объектов). По изотопному составу углерода выделяются две группы образцов. К первой группе, отличающейся лёгким изотопным составом, относятся травертины источника карстовых вод Девичьи Слёзы ($\delta^{13}\text{C}$ –8.77 ‰ V-PDB) и кальцитовый цемент брекчий пещеры Холодный грот ($\delta^{13}\text{C}$ –9.62 ‰ V-PDB). Такой состав свидетельствует о преимущественном биогенном и атмосферном происхождении CO_2 и об отсутствии кинетического фракционирования (условия постоянно обновляющихся растворов без дегазации и испарения). Ко второй группе относятся современные спелеотемы пещеры Холодный грот (густы, кораллиты, мондмилх), характеризующиеся обогащением тяжёлым изотопом углерода ($\delta^{13}\text{C}$ от –3.05 до –0.74 ‰ V-PDB). Такое обогащение чаще всего связано с кинетическим фракционированием изотопов при быстрой дегазации CO_2 (переход лёгкого изотопа угле-

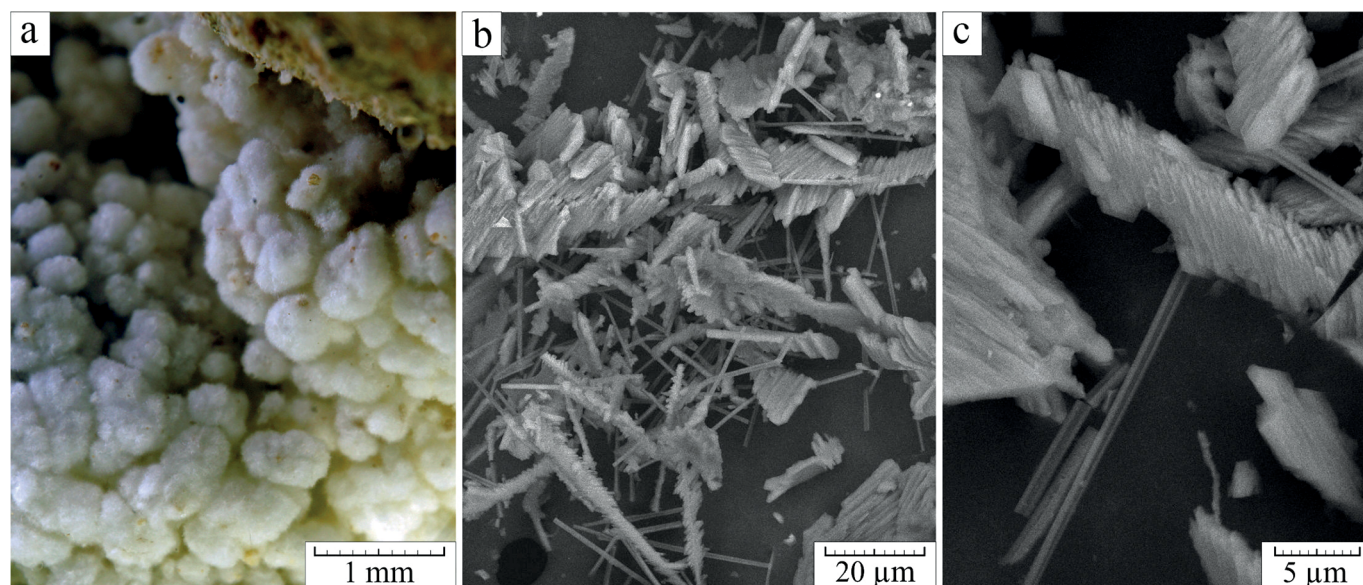


Рис. 6. Мондмилх и входящий в его состав игольчато-волокнистый кальцит (проба Хол-19-02): а — натурная фотография; б, с — электронные микрофотографии в режиме BSE

Fig. 6. Mondmilch and its constituent needle-fibrous calcite (sample Khol-19-02): а — Full-scale photograph; б, с — Electron micrographs, BSE mode

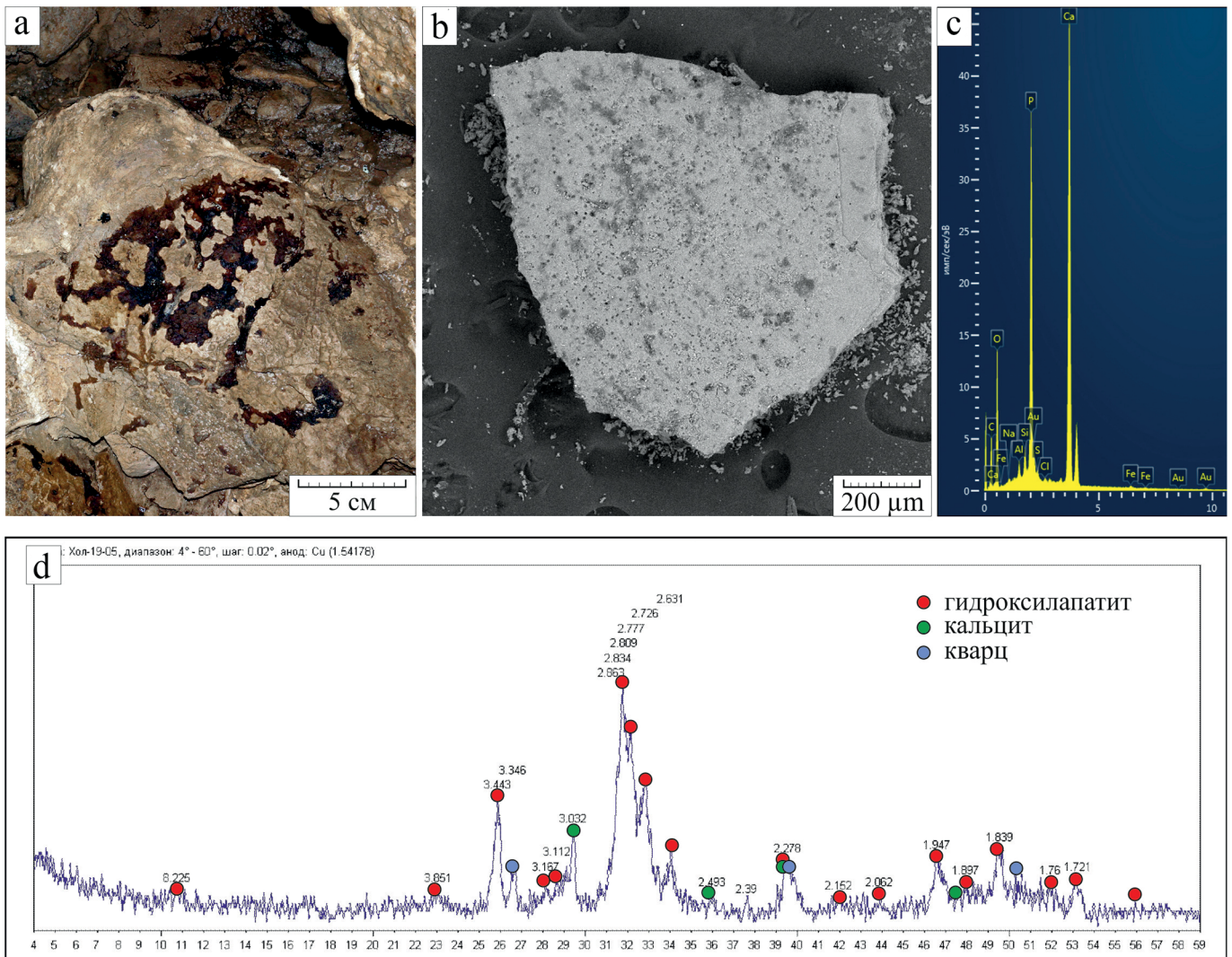


Рис. 7. Гидроксипатитовые коры (проба Хол-19-05): а – нативный вид; б – СЭМ-фото; с – энергодисперсионный спектр; d – рентгенограмма

Fig. 7. Hydroxylapatite crust (sample Khol-19-05): a – native species; b – SEM photo; c – energy dispersive spectrum; d – X-ray diffraction pattern

Изотопные составы углерода $\delta^{13}\text{C}$ и кислорода $\delta^{18}\text{O}$ вмещающих пород и спелеотем пещеры Холодный грот
Isotopic Compositions of $\delta^{13}\text{C}$ Carbon and $\delta^{18}\text{O}$ Oxygen of Host Rocks and speleothems of the Kholodny Grotto cave

№ пробы Sample No	Описание образцов Description of samples	$\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ V-PDB	1- σ	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ V-PDB	1- σ
Хол-19-02 Khol-19-02	игло́чато-воло́книстый кальцит (NFC)	-1.36	0.02	-8.23	0.06
Хол-19-03 Khol-19-03	кальцит гуровых плотин calcite of guhr dams	-0.74	0.31	-9.10	0.45
Хол-19-04 Khol-19-04	кальцит обрамления гуровой ванночки calcite of guhr bath margin	-2.49	0.15	-8.03	0.11
Хол-19-06 Khol-19-06	кораллиты corallites	-3.05	0.41	-7.86	0.23
Хол-19-08 Khol-19-08	вмещающие известняки host limestones	2.47	0.19	-5.56	2.36
Хол-19-09 Khol-19-09	кальцитовый цемент брекчии calcite cement of breccia	-9.62	0.01	-11.49	0.03
Бзып-1 Bzyr-1	современные травертины источника карстовых вод Девичьи Слезы, долина р. Бзыбь modern travertines of the source of karst waters «Maiden's Tears» Bzyb river valley	-8.77	0.03	-10.15	0.02

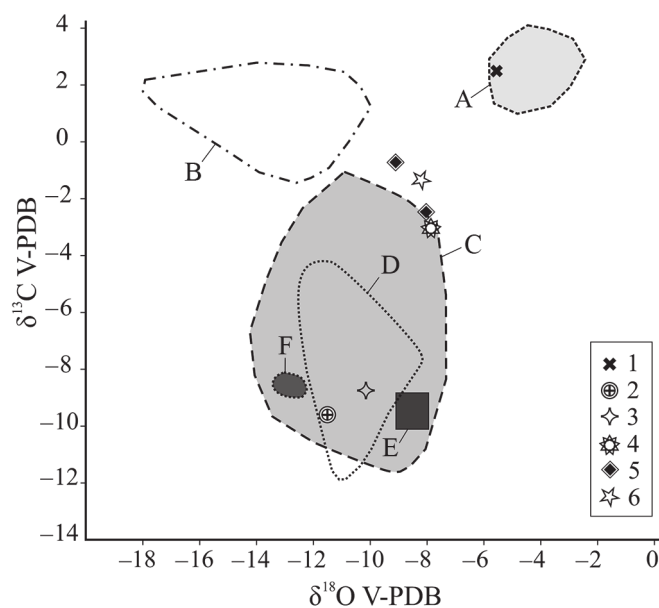


Рис. 8. Изотопный состав углерода $\delta^{13}\text{C}$ и кислорода $\delta^{18}\text{O}$ в изученных карбонатах пещеры Холодный грот в сравнении с различными карбонатными образованиями Новоафонской пещеры.

Условные обозначения: Породы и отложения пещеры Холодный грот: 1 — вмещающие породы (известняки); 2 — современные травертины источника карстовых вод Девичьи слезы; 3 — кальцитовый цемент брекчий; 4 — кораллиты; 5 — кальцит гуровых ванночек; 6 — мондмилх.

Поля сравнения, Новоафонская пещера (неопубликованные данные авторов): А — вмещающие известняки (нижний мел, баррем); В — ранний гидротермальный кальцит; С — сталагмиты; D — кораллиты и антолиты; E — современный растущий кальцит; F — мондмилх

Fig. 8. Isotopic composition of $\delta^{13}\text{C}$ carbon and $\delta^{18}\text{O}$ oxygen in the studied carbonates of the Kholodnyy Grotto cave in comparison with various carbonate formations of the Novoafonskaya cave. Legend: Rocks and sediments of the Kholodnyy Grotto cave: 1 — host rocks (limestones); 2 — modern travertines of the karst water source «Maiden's Tears»; 3 — calcite cement of breccia; 4 — Corallites; 5 — calcite of guhr baths; 6 — mondmilch.

Comparison fields, Novoafonskaya Cave (unpublished data from authors): A — Host limestones (Barremian), B — Early hydrothermal calcite; C — Stalagmites; D — Corallites and antolites; E — Modern growing calcite; F — Mondmilch

рода в газовую фазу и обогащение раствора тяжёлым изотопом) без влияния испарения [12]. Для изученных спелеотем этот тип фракционирования связан с их ростом за счёт дегазации CO_2 из малодебитных плоскостных водотоков (гуров), капиллярных и плёночных вод (кораллиты и мондмилх) на фоне низких концентраций CO_2 в атмосфере пещеры.

Выводы

По результатам интерпретации петрографических и изотопно-геохимических данных карбонатные спелеотемы пещеры подразделяются на два типа по характеру питания и особенностям кристаллизации. К первому типу относится кальцит, сформированный из обильных и постоянно обновляющихся растворов (цемент карстовых брекчий). Для него характерна яснокристаллическая параллельно-шестоватая текстура и отсутствие

кинетического фракционирования стабильных изотопов углерода. Ко второму типу относятся спелеотемы, образованные в неравновесных условиях при активной дегазации CO_2 из плоскостных потоков, плёночных и капиллярных вод (гуровые плотинки, кораллиты, мондмилх). Для этого типа карбонатов характерно существенное обогащение тяжёлым изотопом углерода в результате кинетического фракционирования, возникающего при переходе CO_2 из раствора в газовую фазу. При этом изотопный состав всех изученных пещерных карбонатов отражает участие метеорных вод и CO_2 биогенного и атмосферного происхождения.

Внутри отдельных спелеотем (стенок гуров и цемента карстовых брекчий) было обнаружено высокое содержание аллогенных минеральных включений, характерных для продуктов разрушения магматических пород (циркон, калиевый полевой шпат, ильменит, рутил, монацит, апатит). В качестве потенциального источника сноса этих минералов можно предположить продукты выветривания вулканогенных пород среднего возраста, выходящих на дневную поверхность в 2 км от пещеры.

Также в пещере были обнаружены биогенные фосфаты (апатит), связанные с минерализацией гуано летучих мышей.

Авторы благодарны Ю. В. Дублянскому (Institute of Geology, Innsbruck University, Австрия, г. Инсбрук) за проведение изотопных исследований спелеотем Новоафонской пещеры и предоставление данных для сравнения; П. В. Хворову, Е. Д. Зенович, Н. В. Паршиной (Институт минералогии ИОУ ФНЦ МиГ УрО РАН, г. Миасс) за выполнение рентгенофазовых анализов и их расшифровку; И. И. Мусабирову (Институт проблем сверхпластичности металлов УНЦ РАН, г. Уфа) за электронно-микроскопические исследования; В. В. Мархольца (Унитарное предприятие «Туристический комплекс Новоафонской пещеры имени Г. Ш. Смыр», г. Новый Афон) за организацию и проведение экспедиционных работ, а также З. И. Дбар (Рицинский реликтовый национальный парк, п. Бзыпта) — проводнику нашей экспедиции по Бзыбскому ущелью.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Спектр» ИФМК УФИЦ РАН и РЦКП «Агидель» УФИЦ РАН при поддержке гранта РФФИ № 19-55-40005 Абх_а «Генетические типы карстогенеза прибрежных карбонатных массивов Абхазии».

Литература

1. Букия С. Г., Колосовская Е. М., Абаменко Е. М., Чага-рели А. Л., Твалчрелидзе Г. А. Геологическая карта и карта полезных ископаемых Абхазской ССР. Объяснительная записка. Москва, 1971. 340 с.
2. Курочкин В. И., Астахов Н. Е., Чихелидзе С. С., Сорокина М. Д. Геологическая карта СССР масштаба 1:200000. Серия кавказская. Лист К-37-XI. Объяснительная записка. М.: Гос. науч.-тех. изд-во по геологии и охране недр, 1959. 75 с.
3. Потапов С. С., Червяцова О. Я., Паршина Н. В., Дбар Р. С. О фосфатной минерализации в пещерах Абхазии (на примере Новоафонской пещеры и пещеры Абрскила) // Уральская минералогическая школа—2019: XXV Всероссийская научная молодёжная конференция (19–22 сентября 2019 г.). Екатеринбург: Альфа-Принт, 2019. С. 144–150.
4. Bindaschedler S., Milliere L., Cailleau G., Job D., Verrecchia E. P. Calcitic nanofibres in soils and caves: a putative fungal



contribution to carbonatogenesis // Geological Society. London. Special Publications. 2010. № 336(1). P. 225–238.

5. Borsato A., Frisia S., Jones B., Van Der Borg K. Calcite moonmilk: crystal morphology and environment of formation in caves in the Italian Alps // Journal of sedimentary research, 2000. № 70(5). P. 1171–1182.

6. Cailleau G., Verrecchia E. P., Braissant O., Emmanuel L. The biogenic origin of needle fibre calcite // Sedimentology. 2009. V. 56. P. 1858–1875.

7. Danielli H. M. C., Edington M. A. Bacterial calcification in limestone caves // Geomicrobiology Journal. 1983. № 3. P. 1–16.

8. Frisia S., Borsato A., Fairchild I. J., McDermott F. Calcite fabrics, growth mechanisms, and environments of formation in speleothems from the Italian Alps and Southwestern Ireland // Journal of Sedimentary Research. 2000. V. 70. №. 5. P. 1183–1196.

9. Jones B., Peng X. Abiogenic growth of needle-fiber calcite in spring towers at Shiqiang, Yunnan Province, China // Journal of Sedimentary Research. 2014. V. 84. № 11. P. 1021–1040.

10. Lacelle D., Lauriol B., Clark I. D. Seasonal isotopic imprint in moonmilk from Caverne de l'Ours (Quebec, Canada): implications for climatic reconstruction // Canadian Journal of Earth Sciences. 2004. № 41(12). P. 1411–1423.

11. Léonide P., Fournier F., Reijmer J. J., Vonhof H., Borgomano J., Dijk J., Rosenthal M., Goethem M., Cochard J., Meulenaars K. Diagenetic patterns and pore space distribution along a platform to outer-shelf transect (Urgonian limestone, Barremian–Aptian, SE France) // Sedimentary Geology. 2014. V. 306. P. 1–23.

12. Mickler P. J., Stern L. A. Banner J. L. Large kinetic isotope effects in modern speleothems // GSA Bulletin. January/February 2006. V. 118. № 1/2. P. 65–81.

13. Verrecchia E. P., Verrecchia K. E. Needle-fiber calcite: a critical review and a proposed classification // Journal of Sedimentary Research. 1994. V. 64. P. 650–664.

14. Wong C. I., Banner J. L., Musgrove M. Seasonal drip-water Mg/Ca and Sr/Ca variations driven by cave ventilation: Implications for modeling of speleothem paleoclimate records // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2011. V. 75. P. 3514–3529.

References

1. Bukiya S. G., Kolosovskaya Ye. M., Abamelik Ye. M., Tsagareli A. L., Tvalchrelidze G. A. *Geologicheskaya karta i karta poleznykh iskopayemykh Abkhazskoy SSR* (Geological map and map of mineral resources of the Abkhazian USSR). Explanatory note. Moscow, 1971, 340 p.

2. Kurochkin V. I., Astakhov N. Ye., Chikhelidze S. S. Sorokina M. D. *Geologicheskaya karta SSSR masshtaba 1:200000. Seriya kavkazskaya. List K-37-XI*. (Geological map of the USSR on a scale of 1: 200000. Caucasian series. Sheet K-37-XI. Explanatory

note). Moscow: State scientific and technical publishing house on geology and protection of mineral resources, 1959, 75 p.

3. Potapov S. S., Chervyatsova O. YA., Parshina N. V., Dbar R. S. *O fosfatnoy mineralizatsii v peshcherakh Abkhazii (na primere Novoafonskoy peshchery i peshchery Abrskila)* (Phosphate mineralization in the caves of Abkhazia (on the example of the New Athos cave and the Abrskila cave)). Proceedings of conference. Yekaterinburg: Alfa-Print, 2019, pp. 144–150.

4. Bindschedler S., Milliure L., Cailleau G., Job D., Verrecchia E. P. Calcitic nanofibres in soils and caves: a putative fungal contribution to carbonatogenesis. Geological Society, London, Special Publications, 2010, No. 336(1), pp. 225–238.

5. Borsato A., Frisia S., Jones B., Van Der Borg K. Calcite moonmilk: crystal morphology and environment of formation in caves in the Italian Alps. Journal of sedimentary research, 2000, No. 70(5), pp. 1171–1182.

6. Cailleau G., Verrecchia E. P., Braissant O., Emmanuel L. The biogenic origin of needle fibre calcite. Sedimentology, 2009, V. 56, pp. 1858–1875.

7. Danielli H. M. C., Edington M. A. Bacterial calcification in limestone caves. Geomicrobiology Journal, 1983, No. 3, pp. 1–16.

8. Frisia S., Borsato A., Fairchild I. J., McDermott F. Calcite fabrics, growth mechanisms, and environments of formation in speleothems from the Italian Alps and Southwestern Ireland. Journal of Sedimentary Research, 2000, V. 70, No. 5, pp. 1183–1196.

9. Jones B., Peng X. Abiogenic growth of needle-fiber calcite in spring towers at Shiqiang, Yunnan Province, China. Journal of Sedimentary Research, 2014, V. 84, No. 11, pp. 1021–1040.

10. Lacelle D., Lauriol B., Clark I. D. Seasonal isotopic imprint in moonmilk from Caverne de l'Ours (Quebec, Canada): implications for climatic reconstruction. Canadian Journal of Earth Sciences, 2004, No. 41(12), pp. 1411–1423.

11. Léonide P., Fournier F., Reijmer J. J., Vonhof H., Borgomano J., Dijk J., Rosenthal M., Goethem M., Cochard J., Meulenaars K. Diagenetic patterns and pore space distribution along a platform to outer-shelf transect (Urgonian limestone, Barremian–Aptian, SE France). Sedimentary Geology, 2014, V. 306, pp. 1–23.

12. Mickler P. J., Stern L. A. Banner J. L. Large kinetic isotope effects in modern speleothems. GSA Bulletin. January/February 2006, V. 118, No. 5, pp. 65–81.

13. Verrecchia E. P., Verrecchia K. E. Needle-fiber calcite: a critical review and a proposed classification. Journal of Sedimentary Research, 1994, V. 64, pp. 650–664.

14. Wong C. I., Banner J. L., Musgrove M. Seasonal drip-water Mg/Ca and Sr/Ca variations driven by cave ventilation: Implications for modeling of speleothem paleoclimate records. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2011, V. 75, pp. 3514–3529.

Поступила в редакцию / Received 08.09.2020

АМИНОКИСЛОТЫ КАК БИОМАРКЕРЫ ФАЗОВОГО СОСТАВА ХОЛЕЛИТОВ

О. Е. Амосова, Е. В. Машина, С. Н. Шанина

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар
kramosova@geo.komisc.ru, borovkova@geo.komisc.ru, shanina@geo.komisc.ru

Желчнокаменная болезнь (холелитиаз) остается одним из самых распространенных гастроэнтерологических заболеваний во всем мире. Процесс образования желчных камней (холелитов) до конца не исследован из-за скрытого протекания начальной стадии желчнокаменной болезни. Состав холелитов многообразен. Среди веществ, присутствующих в составе холелитов, наименее исследована белковая составляющая, структурными единицами которой являются аминокислоты. В связи с чем основной целью исследования являлось выявление закономерностей изменения аминокислотного состава желчных камней различных фазовых составов. Объектами исследования послужили 23 образца холелитов, принадлежащих жителям Республики Коми. Анализ данных проводился статистическими одномерными и многомерными методами. Статистический анализ, примененный в данной работе для изучения патогенных образований в организме человека, позволил выявить качественно новые, не отмеченные ранее особенности аминокислотного состава холелитов, что свидетельствует о различии белковой компоненты и её связи с фазовым составом холелитов.

Согласно результатам кластерного анализа по содержаниям всех аминокислот исследуемые холелиты группируются по трем различным по фазовому составу типам — холестерinovому, холестерinovому с минеральной компонентой, пигментному. Критериями Манна – Уитни и Стьюдента установлено, что все три типа холелитов попарно статистически значимо ($p < 0.05$) различаются по содержанию аланина, валина, изолейцина, лейцина, пролина, фенилаланина, аспарагиновой и глутаминовой кислот. Самые низкие содержания перечисленных аминокислот определены в холестериновых желчных камнях, самые высокие — в пигментных. Многомерным методом *деревья классификации* также выявлены индивидуальные аминокислоты — фенилаланин, пролин, лейцин — по которым холелиты разных фазовых составов четко разделяются по типам. Основываясь на результатах, полученных статистическими методами анализа данных, особое внимание следует обратить на фенилаланин. Эта аминокислота наиболее четко по сравнению с другими различает холелиты разного фазового состава.

Установленные зависимости могут быть использованы для прогнозирования типа холелитиаза, решения проблемы образования желчных камней и метафилактики.

Ключевые слова: критерий Манна – Уитни, непарный критерий Стьюдента, кластерный анализ, деревья классификации, холелиты, аминокислоты.

AMINOACIDS AS BIOMARKERS OF PHASE COMPOSITION OF GALLSTONES

O. Ye. Amosova, E. V. Mashina, S. N. Shanina

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

Gallstone disease (cholelithiasis) remains one of the most common gastroenterological diseases worldwide. The formation of gallstones has not been fully studied due to the latent course of the initial stage of gallstone disease. The composition of gallstones is diverse. Among the substances present in gallstones, the least studied is the protein component, the structural units of which are amino acids. In this connection, the main goal of the study was to identify patterns of changes in the amino acid composition of gallstones of various phase compositions. The objects of the study were 23 samples of gallstones belonging to residents of the Komi Republic. Data analysis was carried out by statistical one-dimensional and multidimensional methods. The statistical analysis, used in this work to study pathogenic formations in the human body, revealed qualitatively new, previously unremarked features of the amino acid composition of gallstones, which indicated the difference in the protein component and its relationship with the phase composition of gallstones.

According to the results of cluster analysis by the contents of all amino acids, the studied gallstones were grouped into three different phase compositions of the type — cholesterol, cholesterol with a mineral component, and pigment. The Mann-Whitney and Student's criteria established that all three types of gallstones were statistically significantly ($p < 0.05$) pairwise different in the contents of alanine, valine, isoleucine, leucine, proline, phenylalanine, aspartic and glutamic acid. The lowest contents of the amino acids were determined in cholesterol gallstones, the highest — in pigment ones. The multidimensional method of classification trees also revealed individual amino acids phenylalanine, proline, leucine, according to which gallstones of different phase compositions were clearly separated by type. Based on the results obtained by statistical methods, special attention should be paid to Phenylalanine acid most clearly compared gallstones of different phase composition in comparison with others.

The established relationships can be used to predict the type of cholelithiasis, to solve the problem of gallstones formation and metaphylaxis.

Keywords: Mann-Whitney test, Student's unpaired t-test, cluster analysis, classification trees, gallstones, amino acids.

Введение

Желчнокаменная болезнь (холелитиаз) является одним из самых распространенных гастроэнтерологических заболеваний во всем мире. Тактика лечения и предотвращения данного заболевания остается наиболее актуальной задачей современной медицины [10].

Процесс образования желчных камней (холелитов) до конца не исследован из-за скрытого протекания начальной стадии желчнокаменной болезни. В целом считается, что холелитиаз — многофакторное и многостадийное заболевание, характеризующееся нарушением в первую очередь обмена холестерина или билирубина с

Для цитирования: Амосова О. Е., Машина Е. В., Шанина С. Н. Аминокислоты как биомаркеры фазового состава холелитов // Вестник геонаук. 2020. № 10(310). С. 22—30. DOI: 10.19110/geov.2020.10.3.

For citation: Amosova O. Ye., Mashina E. V., Shanina S. N. Amino acids as biomarkers of phase composition of gallstones. Vestnik of Geosciences, 2020, 10(310), pp. 22—30. DOI: 10.19110/geov.2020.10.3.



образованием холелитов. К общим факторам развития желчнокаменной болезни относят: экологическое неблагополучие, различные нарушения обмена веществ (дисгормональные, воспалительные заболевания органов системы пищеварения, наследственная склонность и др.), особенности питания, образ жизни человека (гиподинамия, алкоголь, курение, стресс и др.), приём некоторых лекарственных препаратов, возраст. В состав холелитов входят соединения органического и неорганического состава: холестерин, пигмент (билирубин), желчные кислоты, минеральные фазы (карбонат кальция, фосфат кальция), микроэлементы (кальций, железо, медь, магний, цинк, натрий и др.) и белковая компонента. По мнению А. А. Кораго [7], несмотря на присутствие в холелитах различных веществ, в целом их следует разделять на две группы по основным составляющим — холестерину (холестериновые) и билирубину (пигментные). Среди веществ, присутствующих в составе холелитов, наименее исследована белковая компонента, структурными единицами которой являются аминокислоты. Об аминокислотном составе желчных камней известно не так много [8, 15]. Какую роль играют белки в формировании холелитов — вопрос до конца не изученный. Обнаружение белков в холелитах не даёт точного ответа, являются ли они причиной образования желчных камней или выполняют второстепенную роль. На сегодняшний день мало данных о том, какие белки участвуют в формировании холелитов разного состава.

В составе пигментных камней установлены белки с высоким содержанием кислых аминокислот (аспарагиновой и глутаминовой) — это альбумин [23], остеопонтин [18] и низкомолекулярные белки [19].

В образовании холестериновых холелитов участвуют муцины MUC3 и MUC5B [25], гликопротеины с разными молекулярными массами [21], аполипотеины [16]. Основную массу белков этих соединений составляют серин, треонин, пролин, лейцин и аланин. Есть данные [3], что в холестериновых холелитах могут присутствовать продукты неполной диссоциации белков в виде димеров, тримеров и олигомеров аминокислот.

Цель исследования — выявление закономерностей изменения аминокислотного состава при формировании холелитов различных фазовых составов методами статистического анализа для решения вопросов прогнозирования типа холелитиаза и метафилактики, определяющих специфику лечения. В задачи исследования входило установление по аминокислотному составу схожести холелитов одного фазового состава и различий холелитов разных фазовых составов, выявление индивидуальных аминокислот, показывающих статистически значимые отличия холелитов разных фазовых составов.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования послужили 23 образца холелитов, принадлежащих жителям Республики Коми, холестеринового и пигментного типов, выделенных в соответствии с классификацией Кораго [7]. Для них были определены содержания 12 аминокислот: аланина (Ala), валина (Val), глицина (Gly), изолейцина (Ile), лейцина (Leu), лизина (Lys), аспарагиновой кислоты (Asp),

глутаминовой кислоты (Glu), серина (Ser), фенилаланина (Phe), тирозина (Tyr), пролина (Pro). Идентификация и определение содержания аминокислот в образцах выполнены на газовом хроматографе GC-17A (Shimadzu, капиллярная колонка Chirasil-L-Val). Для извлечения аминокислот из образцов применяли кислотный гидролиз в 6М HCl при t 105 °С в течение 12 часов. Выделенные из гидролизата аминокислоты очищали от примесей и переводили в N-пентафторпропионовые изопропиловые эфиры соответствующих аминокислот. Методика определения аминокислотного состава подробно описана в работе [14].

Для выявления взаимосвязи фазового состава холелитов (холестерин, билирубин, фосфат кальция, карбонат кальция) с аминокислотным составом нами были привлечены статистические методы исследования с использованием программного продукта Statistica 6.0. Выявление групп холелитов, схожих по аминокислотному составу, проводилось иерархическим агломеративным кластерным анализом (мера расстояния между кластерами — евклидово расстояние, правило связи кластеров — метод полной связи) [13]. Для установления индивидуальных аминокислот, по содержанию которых холелиты разных типов различаются статистически значимо, использовались непараметрический критерий Манна — Уитни и параметрический непарный критерий Стьюдента. Многомерный метод *деревья классификации* был применен для выявления наиболее информативных аминокислот и построения по ним моделей классификации образцов холелитов. Статистическая оценка проводилась для заданного критического уровня значимости 0.05.

Ранее подобные исследования были проведены нами для выявления и подтверждения существования взаимосвязи аминокислотного состава патогенных биоминералов — уролитов (мочевых камней) — с их минеральной составляющей [1, 6].

Результаты исследований

Кластерный анализ

По результатам кластерного анализа холелиты по содержаниям аминокислот группируются в два сильно различающихся кластера — холестериновых и пигментных холелитов (рис. 1). Оказалось, что кластер холестериновых холелитов, в свою очередь, состоит из двух кластеров. Анализ образцов каждого из этих кластеров показал, что один содержит холелиты холестеринового состава, второй — холелиты, состоящие из холестерина и минеральной компоненты (карбонат кальция, фосфат кальция). Таким образом, на основании результатов кластерного анализа холестериновый тип можно разделить на два подтипа — холестериновый и холестериновый с минеральной составляющей. Поэтому далее в статье будем рассматривать три типа холелитов — холестериновый, холестериновый с минеральной компонентой и пигментный. Заметим, каждый кластер содержит образцы холелитов только одного типа. Это показывает, что холелиты одного фазового состава схожи между собой по составу аминокислот. Как видно на рис. 1, по составу аминокислот наиболее неоднородны пигментные холелиты. Содержания аминокислот в холелитах разных типов приведены в табл. 1.

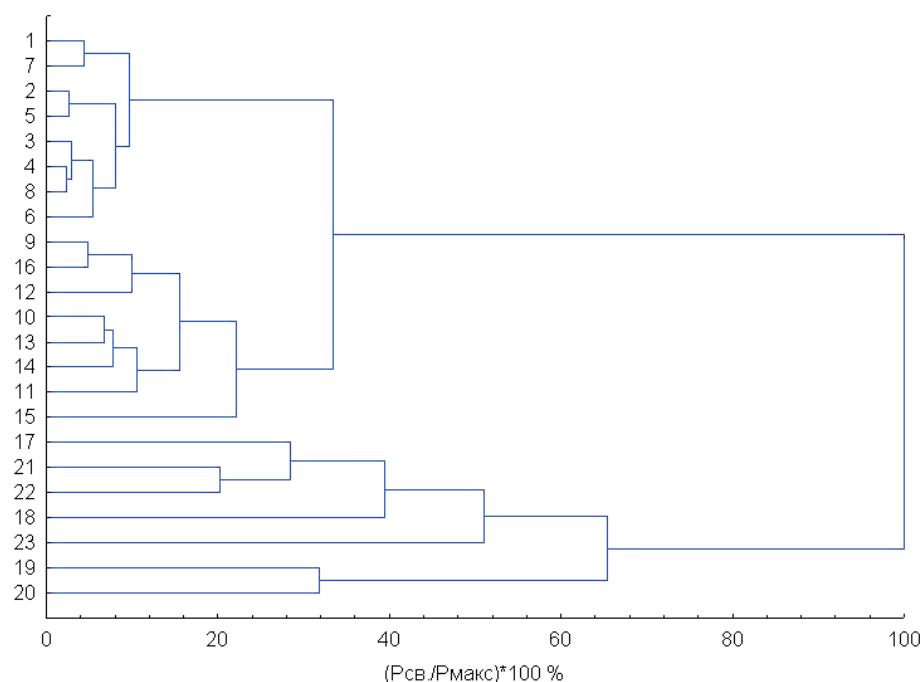


Рис. 1. Дендрограмма кластеров холелитов, схожих по аминокислотному составу, полученная иерархическим агломеративным кластерным анализом (мера расстояния между кластерами — евклидово расстояние, правило связи кластеров — метод полной связи). На оси ординат — образцы холелитов трех типов: 1–8 — холестеринового, 9–16 — холестеринового с минеральной компонентой, 17–23 — пигментного. По оси абсцисс — расстояния объединения кластеров, представленные в масштабированном в процентах виде: (расстояние связи / максимальное расстояние) * 100 %

Fig. 1. A dendrogram of clusters gallstones similar amino acid composition, obtained using hierarchical agglomerative cluster analysis (measure the distance between clusters is the Euclidean distance, the connecting rule of clusters is the method of complete linkage). Designation. On the y-axis marked samples gallstones: 1–8 — cholesterol type, 9–16 — cholesterol with mineral component type, 17–23 — pigment type. On the x-axis is the distance of the joining of clusters presented in a scaled in percent form: (connection distance / maximum distance) * 100 %

Нормальный закон распределения

Проведение проверки нормальности законов распределения содержания аминокислот холелитов каждого типа обусловлено выбором статистических критериев и методов (параметрических или непараметрических) для дальнейшего корректного анализа данных. Для этого были использованы критерии Шапиро — Уилка (статистика W), Колмогорова — Смирнова с поправкой Лиллиефорса (статистика d), оценки значений коэффициентов асимметрии A и эксцесса E (абсолютные значения обоих не превышают единицы), визуальный анализ нормальных вероятностных графиков. По результатам проведенной проверки близкие к нормальному распределению имеют не более пяти аминокислот для каждого типа. Для холестериновых холелитов это Val ($W = 0.949$; $p = 0.699$; $d = 0.180$; $p > 0.20$; $A = -0.35$; $E = -0.19$), Glu ($W = 0.961$; $p = 0.816$; $d = 0.159$; $p > 0.20$; $A = 0.53$; $E = -0.29$), для холестериновых с минеральной компонентой это Ile ($W = 0.962$; $p = 0.833$; $d = 0.140$; $p > 0.20$; $A = -0.54$; $E = 0.14$), Tyr ($W = 0.883$; $p = 0.203$; $d = 0.234$; $p < 0.20$; $A = 0.63$; $E = -0.64$), для пигментных это Val ($W = 0.959$; $p = 0.814$; $d = 0.135$; $p > 0.20$; $A = -0.68$; $E = -0.16$), Gly ($W = 0.916$; $p = 0.438$; $d = 0.189$; $p > 0.20$; $A = 0.69$; $E = -0.64$), Ser ($W = 0.951$; $p = 0.741$; $d = 0.196$; $p > 0.20$; $A = -0.22$; $E = 0.24$), Leu ($W = 0.952$; $p = 0.746$; $d = 0.158$; $p > 0.20$; $A = 0.34$; $E = -0.68$), Glu ($W = 0.965$; $p = 0.863$; $d = 0.162$; $p > 0.20$; $A = -0.08$; $E = -0.75$). Отметим, что ни одна из аминокислот не подчиняется закону нормального распределения для всех трёх типов холелитов одновременно. Только

содержания Val и Glu имеют распределения, близкие к нормальному, для холестеринового и пигментного типов холелитов. Поэтому для выявления различий содержания Val и Glu в образцах этих двух типов можно использовать непарный критерий Стьюдента (параметрический статистический метод сравнения двух независимых групп объектов по одному признаку). Для парного сравнения холелитов разных типов по содержанию остальных аминокислот использовался непараметрический критерий Манна — Уитни.

Критерии Манна — Уитни и Стьюдента

При попарном сравнении всех трёх типов холелитов использовался скорректированный критический уровень значимости 0.017, вычисленный по заданному критическому уровню значимости 0.05. Корректировка критического уровня значимости при попарном сравнении нескольких типов связана с проблемой множественных сравнений [9]. Установлено, что все три типа холелитов статистически значимо ($p < 0.05$) различаются по содержаниям аминокислот Ala, Val, Ile, Leu, Pro, Phe, Asp и Glu. Результаты расчетов критериев Манна — Уитни и Стьюдента приведены в табл. 2 и 3. Причем по Val и Glu оба критерия (Манна — Уитни, непарный Стьюдента) показали наличие статистически значимых различий. По содержанию Gly холелиты холестеринового с минеральной компонентой и пигментного типов статистически значимо ($p < 0.017$) отличаются от холестериновых, но не различаются между собой (табл. 2). Холестериновые холелиты характеризуются низкими содержаниями Gly по сравнению с холесте-



Таблица 1. Описательные статистики содержаний аминокислот (мг/г) в желчных камнях

Table 1. Descriptive statistics of amino acid contents in gallstones

Аминокислота Amino acid	Тип холелита / Type of cholelite					
	Холестериновый Cholesterol		Холестериновый с минеральной компонентой Cholesterol with mineral component		Пигментный Pigment	
	Me		Me		Me	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Ala	0.136		0.461		1.526	
	0.081	0.346	0.301	0.706	1.217	2.423
Val	0.077		0.403		1.116	
	0.0	0.136	0.204	0.541	0.460	1.470
Gly	0.695		1.757		7.528	
	0.361	1.149	0.979	4.164	1.216	21.974
Ile	0.033		0.144		0.706	
	0.0	0.058	0.0	0.236	0.264	0.860
Ser	0.336		0.438		1.119	
	0.075	0.470	0.240	0.562	0.397	1.817
Leu	0.124		0.736		1.893	
	0.058	0.237	0.315	0.939	1.455	2.315
Pro	0.068		0.326		0.949	
	0.0	0.135	0.249	0.619	0.476	1.319
Asp	0.104		0.471		1.716	
	0.0	0.240	0.326	0.971	1.273	4.286
Glu	0.163		0.564		2.373	
	0.035	0.358	0.228	1.314	1.475	3.205
Phe	0.096		0.302		1.013	
	0.024	0.141	0.255	0.454	0.879	1.329
Tyr	0.0		0.094		1.029	
	0.0	0.089	0.0	0.254	0.182	1.551
Lys	0.073		0.110		0.848	
	0.0	0.116	0.031	0.579	0.051	1.238

Примечание: Me — медианное среднее значение, Min, Max — минимальное и максимальные значения.

Note: Me — median average value; Min, Max — minimum and maximum values.

риновыми с минеральной компонентой и пигментными (табл. 1). По содержаниям Ser, Tyr, Lys холелиты холестеринного и холестеринного с минеральной компонентой типов статистически значимо отличаются от пигментных, но не различаются между собой (табл. 2). Пигментные холелиты имеют более высокие содержания Ser, Tyr и Lys, чем холестеринные с минеральной компонентой и холестеринные (табл. 1).

Деревья классификации

Многомерный метод *деревья классификации* [4, 17] использовался нами для выявления индивидуальных аминокислот, по содержаниям которых холелиты разных фазовых составов наиболее сильно различаются между собой, и для построения моделей классификации образцов холелитов по аминокислотному составу. Графы деревьев классификации наглядно демонстрируют различия холелитов разных типов и позволяют предсказывать принадлежность холелитов к определенному, заранее известному типу в зависимости от соответствующих значений содержаний аминокислот. Существует и другой метод классификации — дискриминантный анализ [13], но для его правомерного применения необходимо выполнение некоторых условий: многомерной нормальности распределения содержа-

ний аминокислот для каждого типа холелитов, равенства матриц ковариаций. В связи с невыполнением исходных требований для построения моделей классификации использовался метод *деревья классификации*. Он показал 100 % правильную автоклассификацию всех 23 образцов холелитов для всех типов ветвления, реализованных в программе Statistica 6.0 (дискриминантное одномерное ветвление для категориальных и порядковых предикторов, полный перебор для одномерных ветвлений по методу C&RT, дискриминантное ветвление по линейным комбинациям порядковых предикторов), всех имеющихся условий прекращения ветвлений — прямая остановка, по ошибке классификации, по отклонению — и для заданных априорных вероятностей (0.42 — холестеринные, 0.48 — холестеринные с минеральной компонентой, 0.1 — пигментные). В имеющейся в распоряжении авторов коллекции желчных камней (100 образцов, по одному от человека), полученных от жителей Республики Коми, относительные частоты встречаемости холелитов разных типов неодинаковы. Так, доля холестеринных холелитов составляет 42 %, холестеринных с минеральной составляющей — 48 % и пигментных — 10 %. Поэтому значения априорных вероятностей заданы с учетом исходных частот встречаемости разных типов холелитов.



Таблица 2. Результаты расчёта критерия Манна – Уитни

Table 2. Results of Mann – Whitney test calculation

Аминокислота Amino acid	Сравниваемые типы холелитов / Compared types of cholelites								
	Холестериновые (n ₁ =8) и холестериновые с минеральной компонентой (n ₂ =8) Cholesterol (n ₁ =8) and cholesterol with mineral component (n ₂ =8)			Холестериновые (n ₁ =8) и пигментные (n ₂ =7) Cholesterol (n ₁ =8) and pigment (n ₂ =7)			Холестериновые с минеральной компонентой (n ₁ =8) и пигментные (n ₂ =7) Cholesterol with mineral component (n ₁ =8) and pigment (n ₂ =7)		
	U	Z	p	U	Z	p	U	Z	p
Ala	2.0	–3.151	0.002	0.0	–3.240	0.001	0.0	–3.240	0.001
Val	0.0	–3.361	0.001	0.0	–3.240	0.001	3.0	–2.893	0.004
Gly	4.0	–2.941	0.003	0.0	–3.240	0.001	13.0	–1.736	0.083
Ile	6.5	–2.678	0.007	0.0	–3.240	0.001	0.0	–3.240	0.001
Ser	15.0	–1.785	0.074	1.0	–3.125	0.002	5.0	–2.662	0.008
Leu	0.0	–3.361	0.001	0.0	–3.240	0.001	0.0	–3.240	0.001
Pro	0.0	–3.361	0.001	0.0	–3.240	0.001	2.0	–3.009	0.003
Asp	0.0	–3.361	0.001	0.0	–3.240	0.001	0.0	–3.240	0.001
Glu	2.0	–3.151	0.002	0.0	–3.240	0.001	0.0	–3.240	0.001
Phe	0.0	–3.361	0.001	0.0	–3.240	0.001	0.0	–3.240	0.001
Tyr	12.0	–2.100	0.036	0.0	–3.240	0.001	3.0	–2.893	0.004
Lys	18.0	–1.470	0.142	5.0	–2.662	0.008	6.0	–2.546	0.011

Примечание: n₁, n₂ — количества образцов холелитов соответствующего типа, U — значение критерия Манна – Уитни, p — достигнутый уровень значимости.

Note: n₁, n₂ — numbers of each type of gallstones; U — the value of the Mann – Whitney test; p — achieved level of significance.

Таблица 3. Результаты расчётов непарного критерия Стьюдента проверки гипотезы равенства средних и критерия Левена проверки гипотезы равенства дисперсий содержаний аминокислот Val, Glu для холестеринового (8 образцов) и пигментного (7 образцов) типов холелитов

Table 3. Results of calculations of unpaired Student's t-test for test of means equality hypothesis and Levene's test for test of equality of variance hypothesis for contents of Val, Glu amino acids in gallstones of cholesterol (8 samples) and pigment (7 samples) types

Аминокислота Amino acid	$\bar{X}_1$	$\bar{X}_2$	s ₁	s ₂	Левена F(1,df) Leven F(1,df)	df	p Левена p Leven	t	df	p двуст.
Val	0.077	1.059	0.045	0.353	13.340	13	0.003	–7.317	6.17	2.9E–04
Glu	0.182	2.340	0.105	0.610	7.997	13	0.014	–9.245	6.31	6.7E–05

Примечание: $\bar{X}_1$ — среднее содержание аминокислоты в холелитах холестеринового типа, $\bar{X}_2$ — среднее содержание аминокислоты в холелитах пигментного типа, s₁ — стандартное отклонение для холестеринового типа, s₂ — стандартное отклонение для пигментного типа, F — значение критерия Левена, t — значение критерия Стьюдента с разделёнными оценками дисперсий, df — число степеней свободы, p — достигнутый уровень значимости.

Note: $\bar{X}_1$ — average amino acid content in the gallstones cholesterol type, $\bar{X}_2$ — the average amino acid content in the gallstones pigment type, s₁ — the standard deviation for cholesterol type, s₂ — the standard deviation for pigment type, F — the value of Levene's test, t — the value of Student's t-test with separate estimates of variances, df — the number of degrees of freedom, p — achieved level of significance.

Все деревья классификации, полученные тремя типами ветвления, дают быстрые (короткие) решения — 2 ветвления, 3 терминальные вершины — и верно классифицируют все образцы: каждая из терминальных вершин не содержит неправильно классифицированных образцов (рис. 2, 4).

Так, для дерева классификации, полученного дискриминантным одномерным ветвлением для категориальных и порядковых предикторов, классификация образцов происходит с помощью двух ветвлений по содержанию фенилаланина (рис. 2). Сначала первым ветвлением отделяются все пигментные холелиты от остальных, вторым ветвлением разделяются холестериновые и холестериновые с минеральной компонентой холелиты. Таким образом, холелиты разных типов

хорошо различаются по содержанию одной аминокислоты — Phe. Диапазоны варьирования содержаний Phe в холелитах трёх типов не пересекаются (табл. 1, рис. 3). Установлено, что наибольшие концентрации фенилаланина характерны для пигментных холелитов, а наименьшие — для холелитов холестеринового типа. То же самое наблюдается для Leu, Asp. Таким образом, образцы холелитов можно классифицировать по содержанию Phe, а аминокислоты Leu и Asp использовать как вспомогательные индикаторы классификации. Визуальный анализ варьирования содержаний этих трёх аминокислот во всех исследуемых типах холелитов (табл. 1) показал, что именно для Phe характерны наименьшие степени разбросанности (рассеивания) содержания для каждого исследуемого типа холелитов по сравнению с Leu, Asp.

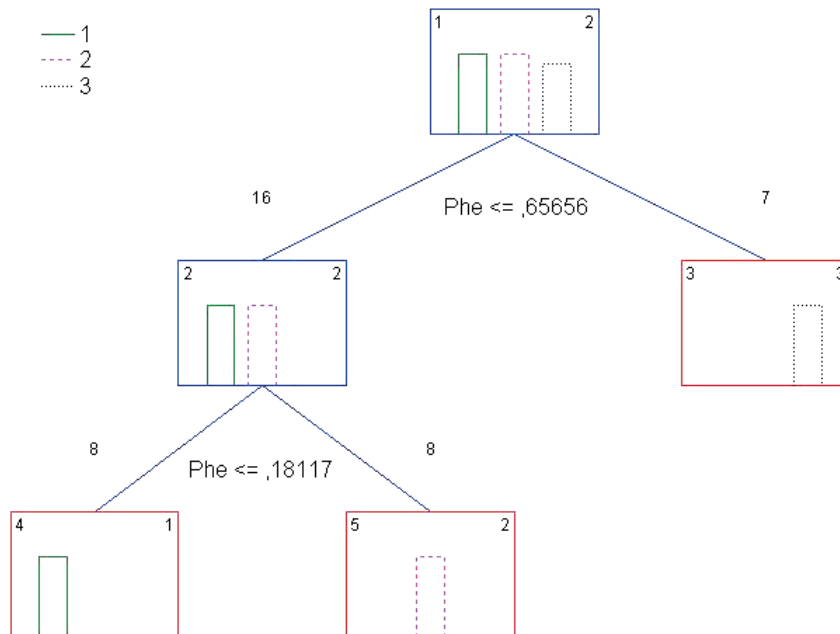


Рис. 2. Граф дерева классификации образцов желчных камней, полученный по составу 12 аминокислот (тип ветвления — дискриминантное одномерное ветвление для категориальных и порядковых предикторов, априорные вероятности: 0.42 — холестерин, 0.48 — холестерин с минеральной компонентой, 0.1 — пигментные). Обозначения: 1 — холестерин, 2 — холестерин с минеральной компонентой, 3 — пигментный тип

Fig. 2. The graph of classification tree of gallstones on composition of 12 amino acids (split selection method — Discriminant-based univariate split for categorical and ordered predictors, a priori probabilities: 0.42 — cholesterol type, 0.48 — cholesterol with mineral component type, 0.1 — pigment type). Designation: 1 — cholesterol type, 2 — cholesterol with mineral component type, 3 — pigment type

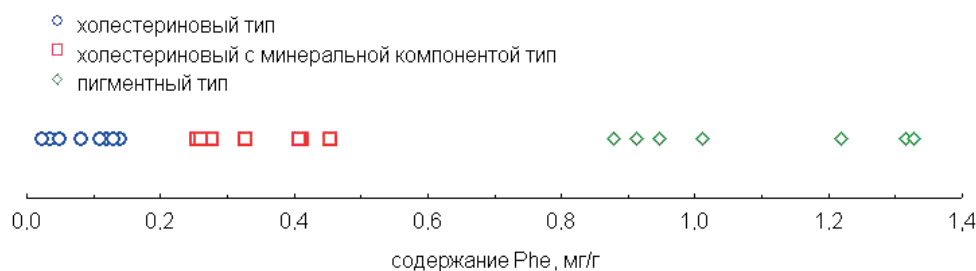


Рис. 3. Изменение содержаний Phe в холелитах трёх типов

Fig. 3. Change of Phe contents in gallstones three types

Для дерева классификации, полученного полным перебором для одномерных ветвлений по методу C&RT (рис. 4), ветвления осуществляются по Pro, Leu. Первым ветвлением по содержанию Pro отделяются все холестериновые холелиты от остальных. Вторым ветвлением по содержанию Leu отделяются холелиты холестерин с минеральной компонентой типа от пигментных.

Оценка полученных моделей деревьев классификации и их способности к прогнозированию была проведена глобальной кросс-проверкой [4, 17]. Наилучшие результаты были достигнуты для деревьев классификации (рис. 2 и 4), полученных дискриминантным одномерным ветвлением для категориальных и порядковых предикторов (правило остановки — прямая остановка FACT) и полным перебором для одномерных ветвлений по методу C&RT (правила остановки — по отклонению и прямая остановка FACT): средняя доля ошибочно классифицированных образцов — 0 %. Для деревьев классификации, построенных по линейным комбинациям предикторов (содержаниям 12 аминокислот) для всех перечисленных выше правил остановки, глобаль-

ная кросс-проверка показала наличие ошибок классификации: средняя доля ошибочно классифицированных образцов — более 60 %.

Обсуждение результатов

На основании статистических исследований установлено, что все изученные типы холелитов статистически значимо различаются по содержаниям аланина, изолейцина, лейцина, пролина, валина, фенилаланина, глутаминовой и аспарагиновой кислот (табл. 2). Самые низкие содержания перечисленных аминокислот определены в холестериновых желчных камнях, самые высокие — в пигментных, что указывает на разные условия образования холелитов различного фазового состава.

Согласно результатам статистического анализа особое внимание следует обратить на аминокислоту Phe. Она наиболее чётко по сравнению с другими отмеченными аминокислотами различает холелиты разного фазового состава, и эти различия статистически значимы. Фенилаланин относится к незаменимым аминокис-

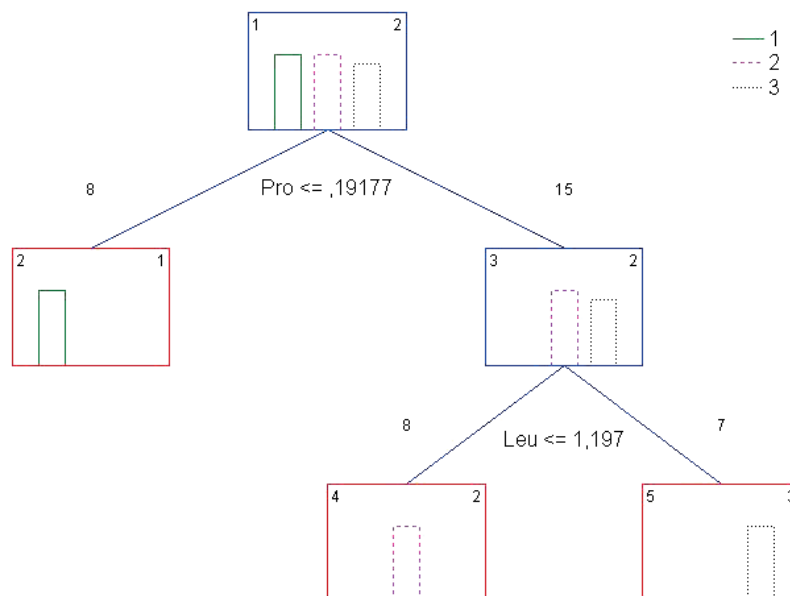


Рис. 4. Граф дерева классификации образцов желчных камней, полученный по составу 12 аминокислот (тип ветвления — полный перебор для одномерных ветвлений по методу C&RT, априорные вероятности: 0.42 — холестериновые, 0.48 — холестериновые с минеральной компонентой, 0.1 — пигментные). Обозначения см. на рис. 2

Fig. 4. The graph of classification tree of gallstones on composition of 12 amino acids (split selection method — C&RT-style exhaustive search for univariate splits, a priori probabilities: 0.42 — cholesterol type, 0.48 — cholesterol with mineral component type, 0.1 — pigment type). See fig. 2 for symbols

кислотам, поскольку ткани организма человека не обладают способностью синтеза его бензольного кольца. Поступая в организм из разных источников пищи, он используется в первую очередь для синтеза различных белков; оставшийся неиспользованный запас аминокислоты под действием фермента монооксигеназы — фенилаланингидроксилазы — превращается в тирозин [11]. Фенилаланин в значительных количествах входит в состав молекул белков системы крови, таких как инсулин, альбумин, гемоглобин, фибрин. Основными патологическими факторами, влияющими на повышение концентрации свободного фенилаланина в крови, являются катаболизм (распад) белков и нарушения функции печени [20, 22]. Есть мнение [2], что пигментные желчные камни образуются на фоне глубоких изменений в работе печени, с чем, вероятно, и связаны высокие содержания фенилаланина в пигментных холелитах.

В результате исследования было установлено, что в холестериновых образцах с минеральной составляющей содержания аминокислот выше, чем в холестериновых камнях без минеральной компоненты (табл. 1). Повышение содержания белковой компоненты происходит за счет увеличения содержаний отдельных аминокислот: аланина, валина, глицина, изолейцина, лейцина, пролина, тирозина, фенилаланина, аспарагиновой и глутаминовой кислот. Вероятно, данные аминокислоты имеют связь с минеральной составляющей. Многие белки, в состав которых входят перечисленные аминокислоты, способствуют образованию карбонатных и фосфатных минералов, как в природных условиях, так и в экспериментальных. Например, в природных условиях образование раковин моллюсков, состоящих из карбоната кальция, не происходит без участия белка конхиолина, характеризующегося большим содержанием кислых аминокислот [5]. Экспериментально выяснено, что в присутствии альбумина образуется карбонатный минерал — ватерит [12, 24]. Тем самым можно

полагать, что определенные белки способствуют процессу образования минеральных фаз.

По нашим данным, содержание глицина в холестериновых холелитах статистически значимо ниже, чем в холелитах холестеринового с минеральной компонентой и пигментного типов (табл. 1, 2). В холелитах этих двух типов содержания глицина не различаются статистически значимо. Глицин — простейшая аминокислота — является составляющей не только белков, но и гликохолевой кислоты (продукт конъюгации холевой кислоты и глицина), присутствующей в желчи. Таким образом, повышенные содержания глицина в пигментных и холестериновых с минеральной компонентой холелитах в отличие от холестериновых, по-видимому, обусловлены не только вхождением его в белки, но и связаны с присутствием гликохолевой кислоты.

Таким образом, каждый тип холелитов характеризуется своими особенностями аминокислотного, а следовательно и белкового состава, что указывает на различие биохимических процессов, протекающих при формировании холелитов.

Как упоминалось выше, в холелитах могут присутствовать самые различные белковые вещества системы крови, гепатобилиарной системы, а также специфичные белки. На данный момент точно не установлено, какие белки участвуют в формировании холелитов разного состава, в связи с чем исследование их аминокислотного состава является важным аспектом, дающим информацию о возможном составе белковых веществ, принимающих участие в образовании холелитов.

Следует отметить, что установление белкового состава патогенных биоминералов требует существенных и трудоемких исследований, тогда как аминокислотный анализ проще в пробоподготовке и расшифровке результатов, но является не менее информативным и более доступным исследователю.



Выводы

Статистический анализ, примененный в данной работе для изучения патогенных образований в организме человека, позволил получить новые результаты, которые могут быть использованы для решения проблемы образования желчных камней, представляющей серьезную опасность для здоровья человека.

Результаты проведенного исследования особенностей аминокислотного состава холелитов разного фазового состава подтвердили различие биохимических процессов, происходящих при холелитиазе. Применение статистических методов позволило выявить прежде не отмеченные закономерности в формировании холелитов. Выявленные отличия в аминокислотном составе свидетельствуют о специфике белковой компоненты, характерной для каждого типа холелитов. Статистическими критериями установлено, что холелиты разного фазового состава значимо ($p < 0.05$) различаются по содержаниям Ala, Val, Ile, Leu, Pro, Phe, Asp и Glu. Самые низкие содержания перечисленных аминокислот определены в холестериновых желчных камнях, самые высокие — в пигментных. Особое внимание следует обратить на аминокислоту фенилаланин. Она наиболее четко по сравнению с другими отмеченными аминокислотами различает холелиты разного фазового состава на основании результатов, полученных одномерными и многомерными статистическими методами анализа данных. Установленные зависимости могут быть использованы для решения вопросов прогнозирования типа холелитиаза и метафилактики.

Определение аминокислотного состава выполнено на аналитическом оборудовании ЦКП «Геонаука» в ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН.

Литература

- Амосова О. Е., Шанина С. Н., Каткова В. И. Статистический анализ аминокислотного состава уrolитов жителей республики Коми // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. 2019. № 4. С. 37–44. DOI: 10.19110/1994-5655-2019-4-37-44.
- Вагнер Е. А., Палатова Л. Ф., Котельникова Л. П. Взаимосвязь изменений ткани печени, химического состава желчи и желчных камней // Вестник хирургии. 1987. № 12. С. 24–27.
- Вахрушев Я. М., Горбунов А. Ю. Содержание микроэлементов желчи в желчных камнях при холелитиазе // Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология. 2009. № 3. С. 64–68.
- Деревья классификации. URL: http://www.statlab.kubsu.ru/sites/project_bank/trees.pdf (дата обращения: 29.03.2018).
- Дроздова Т. В. Геохимия аминокислот. М.: Наука, 1977. 199 с.
- Каткова В. И., Амосова О. Е., Шанина С. Н. Скрытые биомаркеры процессов минералообразования в генезисе уrolитов // Вестник Кольского научного центра Российской академии наук. 2018. № 4. С. 17–24. DOI: 10.25702/KSC.2307-5228-4-2018-10.
- Кораго А. А. Введение в биоминералогию. СПб.: Недра, 1992. 280 с.
- Машина Е. В., Шанина С. Н. Аминокислотный состав холелитов и его связь с минеральной компонентой // Записки Российского минералогического общества. 2019. № 4. С. 95–109. DOI: 10.30695/zrmo/2019.1484.07
- Проблема множественных сравнений при проверках статистических теорий. URL: <https://lit-review.ru/biostatistika/mnozhestvennye-sravneniya/> (дата обращения: 20.06.2019).
- Селезнева Э. Я., Быстровская Е. В., Орлова Ю. Н., Коричева Е. С., Мечетина Т. А. Алгоритм диагностики и лечения желчнокаменной болезни // Русский медицинский журнал. 2015. №13. С. 730–737.
- Сыровая А. О., Шаповал Л. Г., Макаров В. А., Петюнина В. Н., Грабовецкая Е. Р., Андреева С. В., Наконечная С. А., Бачинский Р. О., Лукьянова Л. В., Козуб С. Н., Левашова О. Л. Аминокислоты глазами химиков, фармацевтов, биологов. Харьков: Щедра садиба плюс, 2015. Т. 2. 268 с.
- Трушина Д. Б. Структура и свойства частиц ватерита с регулируемым размером и их применение в качестве основы носителей для доставки лекарственных веществ: Дис... канд. физ. наук. М., 2016. 131 с.
- Факторный, дискриминантный и кластерный анализ: Пер. с англ. / Дж.-О. Ким, Ч. У. Мьюллер, У. Р. Клекка, М. С. Олдендерфер, Р. К. Блэшфилд; Под ред. И. С. Енюкова. М.: Финансы и статистика, 1989. 215 с.
- Amelung W., Zhang X. Determination of amino acid enantiomers in soils // Soil biology and biochemistry. 2001. Vol. 33. P. 553–562.
- Chen Y., Wang L., Yu Y. Analysis of amino acid constituents of gallstones // World Journal Gastroenterology. 1997. Vol. 3, № 4. P. 255–256.
- Hasegawa T., Makino I. Measurement of apolipoprotein A1 in cholesterol gallstones and gallbladder bile of patients with gallstones // Journal Gastroenterology. 1995. Vol. 30, № 1. P. 96–102.
- How to predict Membership, Classification trees. URL: <http://www.statsoft.com/Textbook/Classification-Trees> (accessed: 05.03.2018).
- Imano M., Satou T., Itoh T., Takeyama Y., Yasuda A., Peng YF. An immunohistochemical study of osteopontin in pigment gallstone formation // The American Surgeon. 2010. Vol. 76, № 1. P. 91–95.
- Kestell M. F., Sekijima J., Lee S.P., Park H.Z., Long M., Kaler E.W. A calcium-binding protein in bile and gallstones // Hepatology. 1992. Vol. 16, № 6. P. 1315–1321.
- Kinny-Kuster B., Bartels M., Becker S., Scholz M., Thierry J., Ceglarek U., Kaiser T. Plasma Amino Acid Concentrations Predict Mortality in Patients with End-Stage Liver Disease // PLoS One. 2016. Vol. 11, № 7. P. 1–13.
- Lipsett P. A., Hildreth J., Kaufman H. S., Lillemoe K. D., Pitt H. A. Human gallstones contain pronucleating nonmucin glycoproteins that are immunoglobulins // Annals of Surgery. 1994. Vol. 219, № 1. P. 25–33.
- Morgan M., Marshall A., Milsom J., Sherlock S. Plasma amino-acid patterns in liver disease // Gut. 1982. Vol. 23, № 5. P. 362–370.
- Tandon R. K., Srivastava A. K., Gupta U. Interrelation of biliary infection and proteins to gallstone proteins in man // Indian Journal of Medical Research. 1980. Vol. 72. P. 398–402.
- Wen-kun Z., Xue-gang L., Chi Z., Tao D., Jian Z. Regulation of microstructure of calcium carbonate crystals by egg white protein // Chemical Research Chinese Universities. 2012. Vol. 28, № 2. P. 180–185.
- Yoo K. S., Choi H. S., Jun D. W., Lee H. L., Lee O. Y., Yoon B. C., Lee K. G., Paik S.S., Kim Y. S., Lee J. MUC expression in gallbladder epithelial tissues in cholesterol-associated gallbladder disease // Gut and Liver. 2016. Vol. 10, № 5. P. 851–858.

References

1. Amosova O. E., Shanina S. N., Katkova V. I. *Statisticheskij analiz aminokislotojnogo sostava urolitov zhitelej respubliky Komi* (The statistical analysis of amino acid composition of urinary stones from inhabitants of the Komi Republic). Proceedings of the Komi science center UB RAS, 2019, No. 4, pp. 37–44. DOI: 10.19110/1994-5655-2019-4-37-44.
2. Wagner E. A., Palatova L. F., Kotelnikova L. P. *Vzaimosvyaz izmenenij tkani pecheni, himicheskogo sostava zhelchi i zhelchnyh kamnej* (The relationship of changes in liver tissue, the chemical composition of bile and gallstones). *Vestnik hirurgii* [Herald of Surgery], 1987, No. 12, pp. 24–27.
3. Vakhrushev Y. M., Gorbunov A. Yu. *Soderzhanie mikroelementov zhelchi v zhelchnyh kamnyah pri holelitiaze* (The content of trace elements of bile in gallstones with cholelithiasis). *Ekspierimentalnaya i klinicheskaya gastroenterologiya* (Experimental and clinical gastroenterology), 2009, No. 3, pp. 64–68.
4. *Derevja klassifikacii* [Classification trees]. In Rus. URL: http://www.statlab.kubsu.ru/sites/project_bank/trees.pdf (accessed: 29.03.2018).
5. Drozdova T.V. *Geohimiya aminokislot* (Amino Acid Geochemistry). Moscow: Science, 1977, 199 p.
6. Katkova V. I., Amosova O. Ye., Shanina S. N. *Skrytye biomarkery protsessov mineraloobrazovaniya v genezise urolitov* (Latent biomarkers of mineral-forming processes in the urolith genesis). *Vestnik of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. Apatity: GI, 2018, No. 4, pp. 17–24. DOI: 10.25702/KSC.2307-5228-4-2018-10.
7. Korago A. A. *Vvedenie v biomineralogiu* (Introduction to biomineralogy). St. Petersburg: Nedra, 1992, 280 p.
8. Mashina E. V., Shanina S. N. *Aminokislotojnyj sostav holelitov i ego svyaz' s mineral'noj komponentoj* (Amino acid composition of choleliths and its relationship with the mineral component). *Zapiski Rossijskogo mineralogicheskogo obshchestva* (Notes of the Russian Mineralogical Society), 2019, No. 4, pp. 95–109. DOI: 10.30695/zrmo/2019.1484.07
9. *Problema mnozhestvennyh sravnenij pri proverkah statisticheskijh teorij* (The problem of multiple comparisons in testing statistical theories). URL: <https://lit-review.ru/biostatistika/mnozhestvennye-sravneniya/> (accessed: 20.06.2019).
10. Selezneva E.Ya., Bystrovskaya E.V., Orlova Yu.N., Koricheva E.S., Mechetina T.A. *Algoritm diagnostiki i lecheniya zhelchnokamennoj bolezni* (Algorithm for the diagnosis and treatment of gallstone disease). *Russkij medicinskij zhurnal* (Russian medical journal), 2015, No. 13, pp. 730–737.
11. Syrovaya A. O., Shapoval L. G., Makarov V. A., Petyunina V. N., Grabovetskaya E. R., Andreeva S. V., Nakonechnaya S. A., Bachinsky R. O., Lukyanova L. V., Kozub S. N., Levashova O. L. *Aminokisloty glazami himikov, farmacevtov, biologov* (Amino acids through the eyes of chemists, pharmacists, biologists). X.: Generosity of the Sadiba Plus, 2015, V. 2, 268 p.
12. Trushina D. B. *Struktura i svoystva chastic vaterita s reguliruemym razmerom i ih primenenie v kachestve osnovy nositelej dlya dostavki lekarstvennyh veshchestv: dis...kand. fiz. nauk* (The structure and properties of vaterite particles with an adjustable size and their use as the basis of carriers for drug delivery: disc. cand. physical sciences). Moscow, 2016, 131 p.
13. *Faktornyj, diskriminantnyj i klasternyj analiz* (Factorial, discriminant and cluster analysis), translation from English. Kim J.-O., Muller Ch.U., Klekka U.R., Oldenderfer M. S., Bleshfeld R.K.; ed. I.S. Enukov. Moscow: *Finansy i statistika* Publ., 1989, 215 p.
14. Amelung W., Zhang X. Determination of amino acid enantiomers in soils. *Soil biology and biochemistry*, 2001, V. 33, pp. 553–562.
15. Chen Y., Wang L., Yu Y. Analysis of amino acid constituents of gallstones. *World Journal Gastroenterology*, 1997, V. 3, No. 4, pp. 255–256.
16. Hasegawa T., Makino I. Measurement of apolipoprotein A1 in cholesterol gallstones and gallbladder bile of patients with gallstones. *Journal Gastroenterology*, 1995, V. 30, No. 1, pp. 96–102.
17. How to predict Membership, Classification trees. URL: <http://www.statsoft.com/Textbook/Classification-Trees> (accessed: 05.03.2018).
18. Imano M., Satou T., Itoh T., Takeyama Y., Yasuda A., Peng YF. An immunohistochemical study of osteopontin in pigment gallstone formation. *The American Surgeon*, 2010, V. 76, No. 1, pp. 91–95.
19. Kestell M. F., Sekijima J., Lee S. P., Park H. Z., Long M., Kaler E.W. A calcium-binding protein in bile and gallstones. *Hepatology*, 1992, V. 16, No. 6, pp. 1315–1321.
20. Kinny-Kuster B., Bartels M., Becker S., Scholz M., Thiery J., Ceglarek U., Kaiser T. Plasma Amino Acid Concentrations Predict Mortality in Patients with End-Stage Liver Disease. *PLoS One*, 2016, V. 11, No. 7, pp. 1–13.
21. Lipsett P. A., Hildreth J., Kaufman H. S., Lillemoe K. D., Pitt H. A. Human gallstones contain pronucleating nonmucin glycoproteins that are immunoglobulins. *Annals of Surgery*, 1994, V. 219, No. 1, pp. 25–33.
22. Morgan M., Marshall A., Milsom J., Sherlock S. Plasma amino-acid patterns in liver disease. *Gut*, 1982, V. 23, No. 5, pp. 362–370.
23. Tandon R. K., Srivastava A. K., Gupta U. Interrelation of biliary infection and proteins to gallstone proteins in man. *Indian Journal of Medical Research*, 1980, V. 72, pp. 398–402.
24. Wen-kun Z., Xue-gang L., Chi Z., Tao D., Jian Z. Regulation of microstructure of calcium carbonate crystals by egg white protein. *Chemical Research Chinese Universities*, 2012, V. 28, No. 2, pp. 180–185.
25. Yoo K. S., Choi H. S., Jun D.W., Lee H.L., Lee O. ., Yoon B. C., Lee K.G., Paik S. S., Kim Y. S., Lee J. MUC expression in gallbladder epithelial tissues in cholesterol-associated gallbladder disease. *Gut and Liver*, 2016, V. 10, No. 5, pp. 851–858.

Поступила в редакцию / Received 17.08.2020



НОВЫЙ ПОДХОД В РАСЧЕТЕ НАИБОЛЬШИХ РАСХОДОВ ВЗВЕШЕННЫХ НАНОСОВ ГРЯЗЕВЫХ СЕЛЕЙ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ОСНОВНЫХ ПРИРОДНЫХ ФАКТОРОВ (НА ПРИМЕРЕ РЕК МАЛОГО КАВКАЗА)

Дж. Г. Мамедов, З. Р. Расулов

Институт географии НАН Азербайджана им. акад. Г. А. Алиева, Баку
jumatamedov@yahoo.com

Работа посвящена методике расчета наибольших расходов взвешенных наносов селей рек Малого Кавказа. Материалами для исследования послужили данные стационарных наблюдений за наибольшими расходами взвешенных наносов Департамента гидрометеорологии при Министерстве природных ресурсов Азербайджанской Республики до 2000 г. и данные экспедиционных работ до 2016 г. Для удлинения ряда наибольших расходов взвешенных наносов использовались связи $Q_{\text{наиб.}} = f(R_{\text{наиб.}})$ с 2000 по 2015 гг. Отдельно и в комплексе проанализированы параметры физико-географических факторов, влияющих на наибольшие расходы взвешенных наносов. В качестве основных природных факторов, определяющих величину объема селевых наносов, приняты значения наибольших расходов воды, коэффициент естественной зарегулированности стока рек и залесенность водосбора. В результате впервые разработана методика расчета наибольших расходов взвешенных наносов. Она наиболее полно отражает условия формирования грязевых селей и имеет погрешность расчетов $\pm 25\%$. Формулы могут быть использованы для изучения и описания параметров грязевых селей неизученных рек Малого Кавказа.

Ключевые слова: грязевые сели, естественная зарегулированность стока рек, конус выноса, наибольшие расходы взвешенных наносов, селевые наносы.

A NEW APPROACH TO THE CALCULATION OF THE GREATEST DEBIT OF SUSPENDED MUD FLOOD LOAD CONSIDERING INFLUENCE OF MAIN NATURAL FACTORS (BY THE SAMPLE OF RIVERS OF MINOR CAUCASES)

J. H. Mamedov, Z. R. Rasulov

Azerbaijan, Baku, Land Hydrology and Water Resources Department, Institute of Geography, National Academy of Sciences of Azerbaijan (ANAS), Azerbaijan, Baku city,

The work is devoted to the methodology for calculating the highest flow rates of suspended sediment mudflows of the rivers of the Minor Caucasus. The research materials were the data from stationary observations of the highest suspended sediment load presented by the Department of Hydrometeorology under the Ministry of Natural Resources of the Republic of Azerbaijan until 2000 and data from expeditionary operations until 2016. For extension of the series of the highest suspended sediment load rates, the relationships $Q_{\text{max.}} = f(R_{\text{vax.}})$ from 2000 to 2015. The parameters of physical and geographic factors influencing the high flow rates of suspended sediments are analyzed separately and in a complex. As main natural factors that determine the volume of mudflow sediment load, the values of the highest water discharge, the coefficient of natural regulation of river flow and forest cover of the catchment area were taken. The study resulted in the methodology for calculating the largest flow rate of suspended sediment. It mostly reflects conditions for the formation of mudflows and has a calculation error of $\pm 25\%$. Recommended formulas can be used to study and describe parameters of mudflows of unexplored rivers of the Minor Caucasus.

Keywords: mudflows, natural regulation of river runoff, alluviums, alluvial cone, highest flow rates of suspended sediments, mudflows.

Введение

Малый Кавказ отличается разнообразием природных условий. Территория является преимущественно горной, и рельеф ее крайне сложный. Так, амплитуда колебания абсолютных высот достигает 3724 м, что наряду с другими причинами обуславливает значительные изменения (вертикальную поясность) климата, растительности, почв и др. Коэффициент нарушения селей речных водосборов для Малого Кавказа составляет 0.04–0.16 [7].

Селевые наносы являются в основном продуктом эрозионной деятельности поверхностных вод. Чем интенсивнее ливневые дожди, тем сильнее происходят процессы эрозии и денудации в речных водосборах, соответственно, увеличиваются мутность и величина стока селевых наносов.

В последние годы вследствие глобального изменения климата активизировались селевые потоки, которые наносят огромный ущерб природной среде, и в частности на Малом Кавказе. Среди них особое место

Для цитирования: Мамедов Дж. Г., Расулов З. Р. Новый подход в расчете наибольших расходов взвешенных наносов грязевых селей с учетом влияния основных природных факторов (на примере рек Малого Кавказа) // Вестник геонаук. 2020. № 10(310). С. 31–37. DOI: 10.19110/geov.2020.10.4.

For citation: Mamedov J. H., Rasulov Z. R. A new approach to the calculation of the greatest debit of suspended mud flood load considering influence of main natural factors (by the sample of rivers of Minor Caucasuses). Vestnik of Geosciences, 2020, 10(310), pp. 31–37. DOI: 10.19110/geov.2020.10.4.

занимают грязевые сели. К изучению этого вопроса с целью разработки научных основ решения инженерных задач по защите хозяйства от селевых разрушений привлечен ряд проектных и научных учреждений.

Усиление водно-эрозионных и денудационных процессов, приводящих к образованию селевых процессов, тесно связано с нерациональным природопользованием, в частности уничтожением лесов для бытовых нужд и производства строительных материалов, а также с распаханностью водосборов и чрезмерным выпасом скота. В связи с указанными факторами грязевые сели наиболее характерны в рассматриваемом регионе. Все это требует анализа влияния совокупности природных факторов на формирование грязевых селевых явлений, а также разработки методики расчета их расхода. В формировании грязевых селей существенную роль играют наибольшие расходы взвешенных наносов рек, поэтому настоящее исследование посвящено расчетам селевых наносов для определения объема материала, выносимого на конусы выносов всеми реками и временными водотоками Малого Кавказа.

Известно, что в гидрологическом аспекте селевые наносы рек Малого Кавказа, как и в других регионах Азербайджана, по сравнению со среднесовременным стоком наносов изучены слабо. С целью правильного проектирования берегозащитных и других гидротехнических сооружений требуются более надежные данные для определения наиболее точного объема селевого материала.

Большое разнообразие и сложность рельефа с его высокими хребтами и отрогами в совокупности обуславливают большую пестроту селевых ландшафтов территории.

Материалы исследования

В исследовании были использованы систематизированные данные наибольших расходов воды и взвешенных наносов рек Национального департамента гидрометеорологии при Министерстве экологии и природных ресурсов Азербайджанской Республики до 2000 г., а также данные формирования и измерения наибольших расходов по следам прошедших селей до 2016 г. в ходе экспедиционных работ. Материалы наблюдений наибольших расходов взвешенных наносов рек до 2000 г. по сравнению с произведенными измерениями до 1960 г. отличаются большей достоверностью. К сожалению, после 2000 г. стационарные наблюдения над стоками взвешенных наносов указанных организаций прекратились, однако продолжают наблюдения за стоками вод. Учитывая вышеизложенное, для удлинения ряда наибольших расходов взвешенных наносов нами использовались связи $Q_{\text{наиб}} = f(R_{\text{наиб}})$. Это позволило впервые разработать методику расчета наибольших расходов взвешенных наносов рек исследуемой территории, которая для рек других регионов не использовалась. Существует ряд разработанных методик по расчету наибольших расходов взвешенных наносов рек других регионов, но из-за отличительных особенностей местных условий эти методики приводят к большим погрешностям. Пользуясь накопленным материалом в ходе экспедиционных работ, мы имели возможность провести более углубленный анализ условий формирования селевых наносов, разработать методику их расчета и рассмотреть закономерности формирования селей.

Результаты наибольших расходов взвешенных наносов и воды представлены в таблице 1. Установленные величины наибольших расходов наносов за многолет-

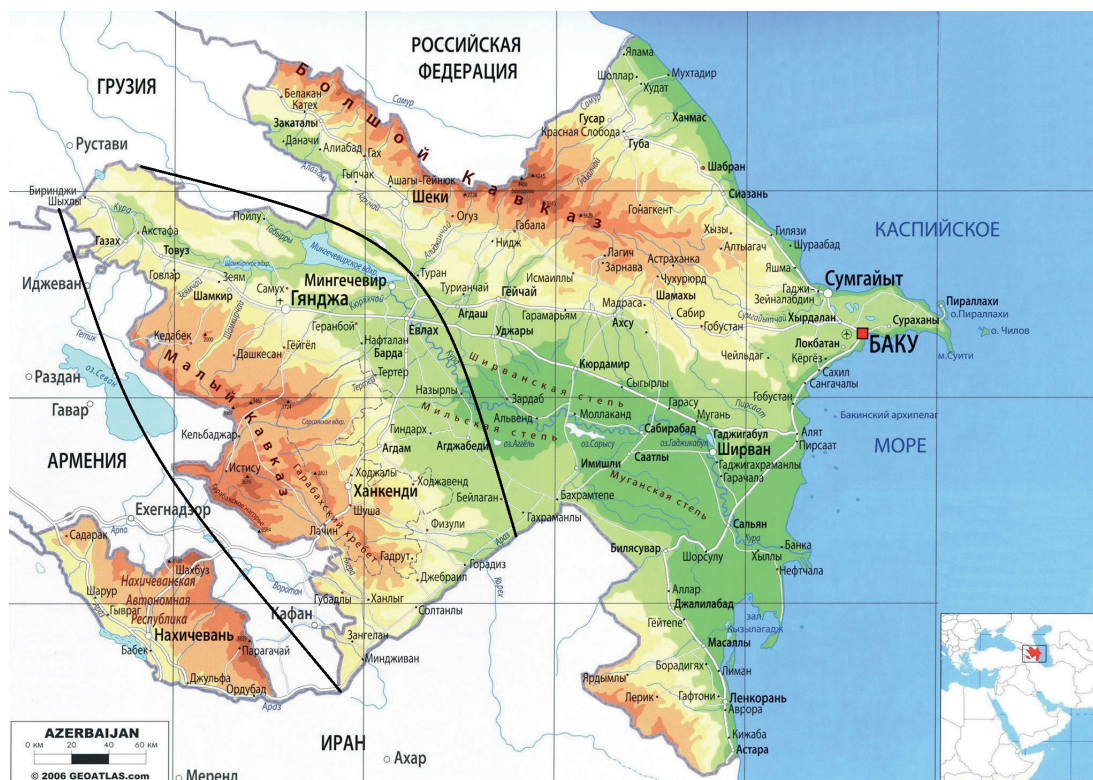


Рис. 1. Исследуемый регион на физической карте Азербайджанской Республики

Fig. 1. Investigated region on physical map of Azerbaijan Republic



Таблица 1. Многолетний наибольший расход взвешенных наносов и воды

Table 1. Long-term highest load of suspended alluvium and water

№ п/п No.	Река – пункт River – area	Площадь водосбора F, км ² Flood area	Наибольший расход Greatest discharge		Отношение / Ratio	
			воды $Q_{\max}$, м ³ /с Water discharge	взв. наносов $R_{\max}$ кг/с Suspended sediment discharge	подз. стока к повер. ϕ Underground flow to surface	лесных площадей к площади водосбора ψ Forest areas to flood area
1	Агстафачай – г. Кривой Мост Agstafachai – s. Krivoi Most	1610	158	400	0.67	0.031
2	Ахынджачай – с. Айгедзор Ahyndzhachai – v. Aigedzor	403	75	100	0.42	0.05
3	Ахынджачай – с. Агдам Ahyndzhachai – v. Agdam	493	68.7	5.7	0.33	0.75
4	Асрикчай – с. Асрикджирдахан Asrikchai – v. Asrikdzhirdahan	114	85.5	23	0.71	0.44
5	Товузчай – пгт. Берд Tovuzchai – v. Berd	102	110	160	0.66	0.05
6	Гасансу – с. Цахкабан Gasansu – v. Tsahkaban	169	40.1	80	0.96	0.05
7	Гянджачай – с. Алаханчаллы Gyandzhachai – v. Alahanchally	94.4	13.7	6.5	1.03	0.09
8	Гянджачай – с. Зивлан Gyandzhachai – v. Zivlan	112	21	6.2	1.03	0.19
9	Дастафурчай – с. Дастафур Dastafurchai – v. Dastafur	68.4	28.6	47	1.12	0.05
10	Зивланчай – с. Суговушан Zivlanchai – v. Sugovushan	46.6	15.7	2.6	1.22	0.4
11	Левчай – с. Гамышлы Levchai – v. Gamyshly	363	121	240	1.7	0.16
12	Тутгун – близ устья Tutgun – near mouth	522	104	100	0.84	0.18
13	Тертер – с. Вагуасский Мост Terter – s. Vaguasskii Most	1915	156	230	1.03	0.25
14	Тертер – с. Магавуз Terter – v. Magavuz	2160	455	670	1.03	0.25
15	Гаргарчай – Мост Агакерпи Gargarchai – Agakerpi Bridge	238	116	140	0.58	0.06
16	Кенделанчай – пгт. Красный Базар Kendelanchai – v. Krasnyi Bazar	166	90	93	0.40	0.34
17	Гуручай – с. Туг Guruchai – v. Tug	201	41.3	0.35	0.54	0.89
18	Акерачай – с. Лачын Akerachai – v. Lachyn	1180	106	140	0.32	0.33
19	Акерачай – с. Гараджанлы Akerachai – v. Garadzhanly	2310	81.8	540	0.72	0.25
20	Базарчай – с. Ангехакот Bazarchai – v. Angehakot	643	93	39	0.22	0.01
21	Базарчай – с. Ейвазлар Bazarchai – v. Eivazlar	2020	252	1300	0.28	0.04
22	Гехи – с. Гехи Gehi – v. Gehi	195	37.7	31	0.43	—

ний период позволили рассмотреть закономерности их распределения по территории, а также рекомендовать методику расчета.

Результаты исследования

Изучением методики расчета объема селей занимались многие исследователи [3, 5, 9–15, 19, 20 и др.]. В методическом отношении гидрологи особое внимание уделяют разработке расчетных методов селевых на-

носов, которые позволили с меньшей затратой времени и при отсутствии натурных наблюдений получить с достаточной точностью характеристику селевых наносов. При обобщении данных расходов селевых наносов преобладает разработка эмпирических формул, которые имеют особое значение в проектировании водохранилищ.

Для реализации указанной задачи нами в принятой расчетной схеме учтены параметры, способные интегрально отразить влияние комплекса физико-гео-



Таблица 2. Характеристики наибольших расходов взвешенных наносов

Table 2. Characteristics of the highest expenditure of suspended alluvium

№ п/п No.	Река – пункт / River – area	Комплексы Complexes		Наибольший расход Greatest discharge		Отличие вычисл. величин от фактич. % Deviation of value from factors
		$Q_{\max\phi} / \Psi$	$Q_{\max\phi}$	$R_{\max}$ факт. тыс. т Fact thousand t	$R_{\max}$ расч. тыс. т Calculated thousand t	
1	Агстафачай – Кривой Мост Agstafachai – Krivoi Bridge	3415		400 1	380	–5
2	Гасансу – Цахкабан Gasansu – Tsahkaban	770		80 1	100	+25
3	Товузчай – пгт. Берд Tovuzchai – m. Berd	1452		160 1	180	+12
4	Ахынджачай – с. Айгедзор Ahyndzhachai – m. Aigedzor	630		100 1	85	–15
5	Ахынджачай – с. Агдам Ahyndzhachai – v. Agdam	30		5.7 1	5.8	+1
6	Асрикчай – с. Асрикджырдахан Asrikchai – v. Asrikdzhyrdahan	138		23 1	22	–4
7	Гянджачай – с. Зивлан Gyandzhachai – v. Zivlan	114		6.2 2	6.0	–4
8	Гяджачай – с. Алаханчаллы Gyadzhachai – v. Alahanchally	157		6.5 2	8.5	+30
9	Зивланчай – с. Суговушан Zivlanchai – v. Sugovushan	48		2.6 2	2.3	–12
10	Дастафурчай – с. Дастафур Dastafurchai – v. Dastafur	641		47 2	41	–13
11	Тертерчай – Вагуасский мост Terterchai – Vaguasskii bridge		161	230 4	220	–4
12	Левчай – с. Гамышлы Levchai – v. Gamyshly		206	240 4	280	+17
13	Тутгун – близ устья Tutgun – near mouth		87.4	100 4	130	+30
14	Тертер – Магавуз Terter – Magavuz		487	670 4	590	–12
15	Гаргарчай – Агакерпи Gargarchai – Agakerpi		67.3	140 4	100	–29
16	Кенделанчай – пгт. Красный Базар Kendelanchai – v. Krasnyi Bazar	10.6		93 3	100	+7.5
17	Гуручай – с. Туг Guruchai – v. Tug	2.5		35 3	30	–14
18	Базарчай – с. Ангехакот Bazarchai – v. Angehakot		20.46	39 5	49	–14
19	Базарчай – с. Эйвазлар Bazarchai – v. Eivazlar		70.6	1300 5	960	+23
20	Акерачай – г. Лачын Akerachai – c. Lachyn		33.9	140 5	170	–12
21	Акерачай – с. Гараджанлы Akerachai – v. Garadzhanly		58.9	540 5	620	–17
22	Гехи – с. Гехи Gehi – v. Gehi		16.2	31 5	28	–10

графических условий на величину селевых объемов. В качестве основных факторов, определяющих величину селевых наносов, приняты величины наибольших расходов воды, коэффициент естественной зарегулированности стока рек, который непосредственно связан с гидрологическими условиями, а также залеженностью водосбора.

Величины наибольших расходов воды зависят от климатических, геолого-геоморфологических условий, почвенно-растительного покрова, хозяйственной деятельности человека и других факторов. Для наглядности мы считаем целесообразным представить гидрогра-

фическую сеть и её географическое расположение на исследуемой территории (рис. 1).

Сток воды является одним из главных факторов, влияющих на селевые наносы. Он характеризует водоносность рек, отображая способность переноса селевых наносов.

В литологическом отношении исследуемая территория сложена в основном вулканогенно- и вулканогенно-осадочными породами мезозоя и четвертичного периода кайнозоя. В связи с этим на оголенных участках водосборов имеет место сильная трещиноватость и водопроницаемость пород.



Коэффициент трещиноватости и пустотности в эффузивных породах составляет 0.5–2 %. С учетом этого для исследуемой территории доля подземного стока достигает 50 % и более. В этом можно убедиться на примере рр. Забухчай (88 %), Акера (70 %), Тертер (63 %), Гочассу (63 %), Базарчай (50 %) и др.

Собранные в таблице 1 материалы проливают свет на географическое распространение селей, морфометрические характеристики водосборов, а также гидрологический режим и количественные характеристики селевых расходов, имеющих место в этом малоизученном районе Малого Кавказа.

Для определения коэффициента естественной зарегулированности стока рек были использованы данные монографии [18].

Необходимо отметить, что чем больше естественная зарегулированность стока рек, тем меньше величина селевых наносов.

Для практического решения поставленной задачи нами проанализирована связь наибольшего расхода взвешенных наносов с приведенными выше параметрами (рис. 2). Анализ связи показывает, что величина селевых наносов возрастает с увеличением наибольшего расхода воды, коэффициента естественной зарегулированности стока рек и соотношения лесных площадей к площади речного бассейна. Общий вид уравнения представлен в формуле (1):

$$R_{\max} = f(Q_{\max} \phi / \Psi), \quad (1)$$

где $R_{\max}$ — расход селевых наносов, кг/с; $Q_{\max}$ — наибольший расход воды, м³/с; ϕ — отношение подземного стока к поверхностному (т. е. коэффициент естественной зарегулированности стока рек); Ψ — соотношение площади лесов к площади водосборов (т. е. коэффициент уменьшения стока наносов).

Значительная дифференциация физико-географических условий, экспозиции склонов хребтов Малого Кавказа, весьма специфические геолого-геоморфологические условия, а также коэффициент нарушения сели речных водосборов (0.04–0.16) для отдельных групп речных бассейнов определили целесообразность представления вышеуказанной зависимости в виде трех групп рек (рис. 2)

При разработке методики расчета наибольших расходов взвешенных наносов рек получены нижеследующие формулы:

для Агстафачай-Товузчай —

$$R_{\max} = 0.2916(Q_{\max} \phi / \Psi)^{0.88}, \quad (2)$$

для бассейна р. Ганджачай —

$$R_{\max} = 0.0296(Q_{\max} \phi / \Psi)^{1.12}, \quad (3)$$

для междуречья Кенделанчай-Гуручай —

$$R_{\max} = 13.2(Q_{\max} \phi / \Psi)^{0.88}. \quad (4)$$

Однако локальность гидрогеологических условий территории, а также коэффициенты нарушения сели речных водосборов (0.41–0.16), в том числе междуречья Тертерчай — Гаргарчай и Акерачай — Гехи требуют приведения вышеуказанных связей для данных групп речных бассейнов в следующий общий вид (рис. 3):

$$R_{\max} = f(Q_{\max} \phi) \quad (5)$$

для Тертерчай-Гаргарчай —

$$R_{\max} = 2.5556(Q_{\max} \phi)^{0.88}, \quad (6)$$

для Акерачай-Гехи —

$$R_{\max} = 0.0228(Q_{\max} \phi)^{2.51}, \quad (7)$$

Результаты вычисления по предлагаемым формулам приведены в таблице 2.

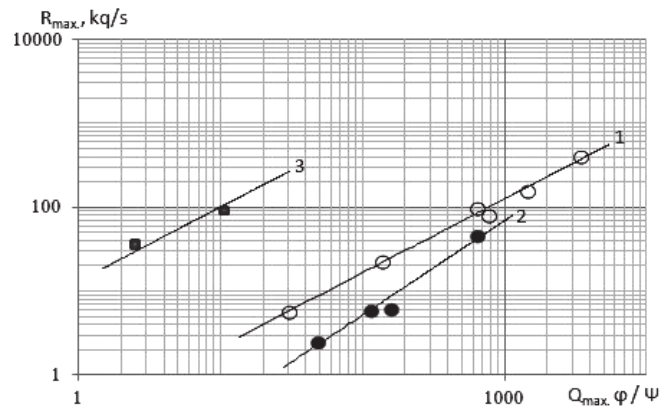


Рис. 2. Кривые связи $R_{\max} = f(Q_{\max} \phi / \Psi)$: 1 — междуречье Агстафачай — Товузчай; 2 — бассейн р. Гянджачай; 3 — междуречье Кенделанчай — Гуручай;

Fig. 2. $R_{\max}$ connection curves $= f(Q_{\max} \phi / \Psi)$: 1 — Akstafachay — Tovuzchay interfluvium; 2 — Ganjachai river basins; 3 — Kendelanchai — Guruchai Interfluvium

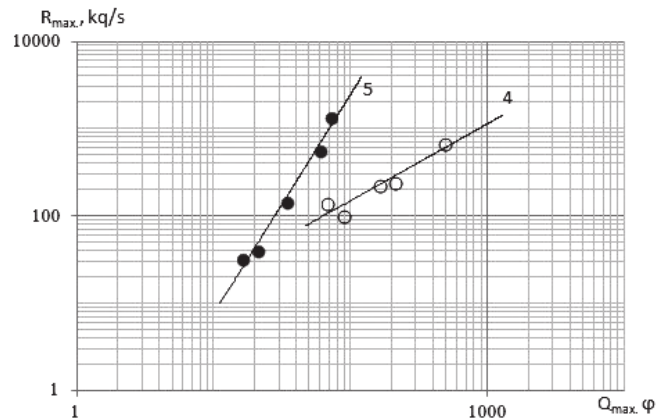


Рис. 3. Кривые связи $R_{\max} = f(Q_{\max} \phi)$: 1 — для группы рек Тертерчай — Гаргарчай; 2 — для группы рек Акерачай — Гехи

Fig. 3. Coupling curves $R_{\max} = f(Q_{\max} \phi)$: 1 — for the Terterchay — Gargarchay river group; 2 — for the group of rivers Akarachay — Gekhi

Анализ таблицы 2 показывает удовлетворительную сходимость вычисленных величин $R_{\max \text{ выч.}}$ с фактическими данными $R_{\max \text{ факт.}}$. С полученными формулами погрешность расчета колеблется от 1 до 30 % и в основном не превышает ± 25 %.

На основании вышеизложенного рекомендуем использовать предлагаемые формулы для расчета величины наибольших расходов взвешенных наносов селей неизученных рек данной территории.

Для всех селевых бассейнов средняя скорость интенсивности смыва составляет 3.04 мм/с. Соответственно, средний объем одной сели за 5 часов составляет 3 583 565 тонн. По сравнению с денудационным сносом с Малого Кавказа указанная величина в 1.18 раза больше.

Аналогичный показатель для гор Средней Азии [19] — 0.26 мм/год, для Кавказа [4] — 0.20 мм/год, для Большого Кавказа (в пределах Азербайджана) [2] — 0.50 мм/год. Скорость интенсивности смыва с поверхности селевых водосборов исследуемой территории превышает таковую, например, для Гималаев в 3 раза, для гор Средней Азии — в 11.6 раза, для Кавказа — в 15, в том числе азербайджанской части Большого Кавказа — в 6 раз.

Наряду с этим из селевых бассейнов исследуемой территории денудационный метр в среднем составляет 1122 лет.

Изучение современных селевых процессов позволяет сделать вывод о том, что сели в формировании современного рельефа Малого Кавказа играют важную роль. Известны работы по изучению стихийных бедствий в горах и их влияние на социально-экономическое развитие [8], плоскостной эрозии как фактора геоморфологического риска в бассейнах рек [6], роли различных денудационных процессов в развитии склонов [1], сравнительной оценки темпа современной денудации [10], оценки современного денудационного снижения гор по данным о стоке взвешенных наносов рек [17], соотношения скоростей современной денудации и тектонических поднятий эпигеосинклинальных гор [16], а также влияния антропогенной деятельности на интенсивность экзогенных процессов и др.

Выводы

Предлагаемая методика расчета наиболее полно отражает условия формирования селевых расходов наносов. Новыми методами расчета авторы добились снижения погрешности наибольших расходов взвешенных наносов. Поэтому рекомендуемые формулы могут быть использованы для расчета расхода грязевых селей незатронутых рек Малого Кавказа.

Для грязевых селей естественная зарегулированность стока рек, а также отношение площади лесов к площади водосборов являются весьма важными параметрами водосборов рек, формирующих селевые потоки исследуемой территории. Результаты расчета грязевых селей по разработанной методике соответствуют фактическим величинам селей натурных наблюдений. Полученные выводы и закономерности являются наиболее приемлемыми для всех исследуемых рек.

Предложенная методика расчета расхода грязевых селей может использоваться при создании противоселевых сооружений, необходимых для регулирования селевых потоков.

Литература

1. Ажигиров А. А. О роли различных денудационных процессов в развитии склонов на Северо-Западном Кавказе // Геоморфология. 1991. № 2. С. 46–51.
2. Ахундов С. А. Сток наносов горных рек Азербайджанской ССР. Баку, 1978, 98 с.
3. Виноградов Ю. Б. Этюды о селевых потоках. Л.: Гидрометеиздат, 1980, 144 с.
4. Габриелян Г. К. Интенсивность денудации на Кавказе // Геоморфология. 1971. № 1. С. 22–27.
5. Голосов В. Н., Дела Сета Т., Ажигиров А. А., Кузнецова Ю. С., Дель Монте М., Фредди П. Лупия, Пальмиери Е., Григорьева Т. М. Влияние антропогенной деятельности на интенсивность экзогенных процессов в низкотропическом поясе // Там же. 2012. № 2. С. 7–17.
6. Евсеева Н. С., Осинцева Н. В., Квасникова З. Н. Плоскостная эрозия как фактор геоморфологического риска в бассейне нижнего течения реки Том // География и природные ресурсы. 2012. № 3. С. 13–21.
7. Каталог селеопасных рек Азербайджана / Национальный гидрометеорологический департамент, Научно-иссле-

довательский институт гидрометеорологии и Министерство экологии и природных ресурсов. Баку, 2008. 104 с.

8. Котляков В. М. Стихийные бедствия в горах и их влияние на социально-экономическое развитие // Вопросы географии. М.: Кодекс, 2014. № 37. С. 205–233.

9. Мамедов Дж. Г. Распределение интенсивности смыва селевых наносов азербайджанской части Большого Кавказа // Современные проблемы комплексного и рационального использования водных ресурсов / Науч.-исслед. институт водных проблем Азербайджана. 2007. № 4. С. 17–24 (на азерб. языке)

10. Мамедов Дж. Г. Влияние глобального изменения климата на формирование селей // Географический вестник. 2014. № 3 (30). С. 60–71

11. Мамедов Дж. Г. Влияние геологических и геоморфологических факторов формирования селей азербайджанской части Большого Кавказа // Современные проблемы рационального и комплексного использования водных ресурсов: Вестник научных трудов / Научно-исследовательский институт водных проблем Азербайджана. Баку, 2017. С. 21–25.

12. Мамедов Дж. Г. Динамические особенности селей (на примере селей азербайджанской части Большого Кавказа) // Вестник Кемеровского государственного университета. Серия: Биол., техн. науки и науки о Земле. Кемерово, 2017. С. 61–66.

13. Мамедов Дж. Г. Сель как фактор разрушения гор (на примере азербайджанской части Большого Кавказа) // Вестник КемГУ. Серия: Биол., техн. науки и науки о Земле. 2018. № 1. С. 61–67.

14. Мамедов Дж. Г., Расулов З. Р. Методика расчета наибольших расходов взвешенных наносов грязевых селей и паводков (на примере рек Ленкоранской природной области) // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2019. № 4-1. С. 47–54.

15. Мамедов Дж. Г. Методика расчета наибольших расходов взвешенных наносов грязевых селей (в пределах Нахчыванской АР) // Известия РАН. Серия географическая. 2019. № 3. С. 98–104.

16. Мамина Л. Р. О соотношении скоростей современной денудации и тектонических поднятий эпигеосинклинальных гор Евразии // Геоморфология. 2005. № 3. С. 98–101.

17. Мозжерин В. В., Шарифуллин А. Г. Оценка современного денудационного снижения гор по данным о стоке взвешенных наносов рек (на примере Тянь-Шаня, Памиро-Алая, Кавказа и Альп) // Там же. 2014. № 1. С. 15–23.

18. Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 9, вып. 2. Бассейн Аракса. М., 1973, 471 с.

19. Шульц В. Л. Реки Средней Азии. Ч. 1 и 2. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 691 с.

20. Mammadov J. H. The influence of global climatic changes on formulation of mudstream in the river of major causausus at present. // Innovations and Technologies. Nevs Riqqa. 2011. № 2 (11). Pp. 3–10.

References

1. Azhigirov A. A. *O roli razlichnyh denudatsionnyh protsessov v razvitii sklonov na severo-zapadnom Kavkaze* (About the role of different denudation processes in the development of slopes in the north western Caucasus). Geomorphology. Moscow, RAS, 1991, No. 2, pp. 46–51.
2. Akhundov S. A. *Stok nanosov gornyh rek Azerbaidzhanskoi SSR* (Runoff of alluvium of mountain rivers of the Azerbaijan SSR). Baku, 1978, 98 p.



3. Vinogradov Yu. B. *Etyudy o selevykh potokakh* (Etudes about mudflows). Hydrometeoizdat, Leningrad, 1980, 144 p.
4. Gabrielyan G. K. *Intensivnost denudatsii na Kavkaze* (intensity of denudation in Caucasus). Geomorphology. Moscow, Russian Academy of Sciences, 1971, No. 1, pp. 22–27
5. Golosov V. N., Dela Seta T., Azhigirov A. A., Kuznetsova Yu. S., Del Monte M., Fredy P. Lupia Palmieri E., Grigorieva T. M. *Vliyanie antropogennoi deyatel'nosti na intensivnost ekzogenykh protsessov v nizkogoryakh subtropicheskogo poyasa* (Influence of anthropogenic activity on the intensity of exogenous processes in the low mountains of the subtropical belt). Geomorphology, Moscow, RAS, 2012, No. 2, pp. 7–17
6. Evseeva N. S., Osintseva N. V., Kvasnikova Z. N. *Ploskostnaya eroziya kak faktor geomorfologicheskogo riska v basseine nizhnego techeniya rek Tom* (Planar erosion as a factor of geomorphological risk in the basin of the lower currents of the Tom River). Geography and natural resources. Irkutsk, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2012, No. 3, pp. 13–21.
7. *Katalog seleopasnykh rek Azerbaidzhana* (Catalogue of danger torrents rivers in Azerbaijan). National Hydrometeorological Department, Scientific Research Institute of Hydrometeorology and Ministry of Ecology and Natural Resources. Baku, 2008, 104 p.
8. Kotlyakov, V. M. *Stihiinye bedstviya v gorah i ih vliyanie na sotsial'no-ekonomicheskoe razvitiye* (Natural disasters in the mountains and their impact on socio-economic development). Questions of Geography. Moscow: Publishing House «Codex», 2014, No. 137, pp. 205–233.
9. Mamedov J. H. Distribution of washout intensity of mud deposits in the Azerbaijan part of the Great Caucasus. Modern problems of integrated and rational use of water resources. Scientific-Research Institute of Water Problems of Azerbaijan. Baku, 2007, No. 4. pp. 17–24 (in the Azeri language).
10. Mamedov J. H. *Vliyanie globalnogo izmeneniya klimata na formirovaniye selei* (Influence of global climate change on the formation of mudflows). Geographical Bulletin, Perm, 2014, No. 3 (30), pp. 60–71.
11. Mamedov J. H. *Vliyanie geologicheskikh i geomorfologicheskikh faktorov formirovaniya selei Azerbaidzhanskoi chasti Bolshogo Kavkaza* (The influence of geological and geomorphological factors to the formation mudflows in the part of Azerbaijan of the Great Caucasus). Modern problems of rational and integrated use of water resources (Bulletin of Scientific Works) Research Institute of Water Problems of Azerbaijan, Baku, 2017, pp. 21–25.
12. Mammadov J. H. *Dinamicheskie osobennosti selei (na primere selei Azerbaidzhanskoi chasti Bolshogo Kavkaza)* (Dynamic peculiarities of mudflows in the Azerbaijan area of the Great Caucasus)). Bulletin of Kemerovo University, Biological technical and Earth sciences, 2017, pp. 61–66
13. Mammadov J. H. *Sel kak faktor razrusheniya gor (na primere Azerbaidzhanskoi chasti Bol'shogo Kavkaza)* (Mudflows as factor demolishing mountains (on the example of the Azerbaijan parts of Great Caucasus). Bulletin of Kemerovo University, Biological technical and Earth sciences, 2018, No. 1, pp. 61–67
14. Mammadov J. H. Rasulov Z. R. *Metodika rascheta naibol'shih rashodov vzveshennykh nanosov gryazevykh selei i pavodkov (na primere rek Lenkaranskoi prirodnoi oblasti)* (Method of calculation largest expenditure raise of alluvium mudden flows and floods (By example of the rivers of Lenkoran natural area). International journal of humanitarian and natural sciences. Novosibirsk, 2019. No. 4-1, pp. 47–54.
15. Mammadov J. H. *Metodika rascheta naibol'shih rashodov vzveshennykh nanosov gryazevykh selei (v predelakh Nahchyvanskoi AR)* (Methodology of Calculation the Maximum Flow Rate of Suspended Sediments of Mudflows (within Nakhchivan Autonomous Rtpublic)). Moscow, Proceedings of RAS, Geographical series, 2019, No. 3, pp. 98–104.
16. Mamina L. R. *O sootnoshenii skorostei sovremennoi denudatsii i tektonicheskikh podnyatii epigeosinklinal'nykh gor Evrazii* (Ratio of the rates of modern denudation and tectonic uplifts of the epigeosynclinal mountains of Eurasia). Geomorphology. Moscow, RAS, 2005, No. 3, pp. 98–101.
17. Mozzherin V. V., Sharifullin A. G. *Otsenka sovremenno-go denudatsionnogo snizheniya gor po dannym o stoke vzveshennykh nanosov rek (na primere Tyan-Shanya, Pamiro-Alaya, Kavkaza i Alp)* (Estimation of the modern denudation reduction of mountains according to the data on the runoff of suspended river deposits (on the example of the Tien Shan, Pamir-Alai, the Caucasus and the Alps). Geomorphology, Moscow, RAS, 2014, No. 1, pp. 15–23.
18. *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR* (Surface water resources of the USSR). V. 9, 2, Araks Basin. Moscow, 1973, 471 p.
19. Schultz V. L. *Reki Srednei Azii* (Rivers of Central Asia). Part 1 and 2, Gidrometeoizdat, Leningrad, 1965, 691 p.
20. Mammadov J. H. The influence of global climatic changes on formulation of mudstream in the river of major causalem at present. Innovations and Technologies. News Riga, 2011, No. 2 (11), pp. 3–10.

Поступила в редакцию / Received 18.03.2020



МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕТРОГРАФИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Памяти д. г.-м. н. Ю. А. Ткачева

Ю. Л. Войтеховский^{1, 2}, А. А. Захарова¹¹Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург²Геологический институт ФИЦ КНЦ РАН, Апатиты

Voytekhovskiy_YuL@pers.spmi.ru

В статье изложена методика 2D-моделирования структур биминеральных горных пород в терминах вероятностей бинарных межзерновых контактов. Показано, что типовые петрографические структуры (вкрапленная, цепочечная, пойкилитовая, порфировая) и текстуры (массивная, полосчатая, шлировая) закономерно заполняют барицентрическую диаграмму (p_{ii} , p_{ij} , p_{ji}) вероятностей контактов. Указанные структуры и текстуры соотношены с равновесием Харди — Вайнберга. Обсуждены проблемы моделирования полиминеральных петрографических структур и текстур. Предложен новый тип структурных диаграмм. Статья посвящена памяти д. г.-м. н. Ю. А. Ткачева — известного российского специалиста в области моделирования структур осадочных горных пород.

Ключевые слова: кристаллическая горная порода, петрографические структуры: вкрапленная, цепочечная, пойкилитовая, порфировая; петрографические текстуры: массивная, полосчатая, шлировая.

MODELING PETROGRAPHIC STRUCTURES

Dedicated to the memory of Dr. Sci. Yu. A. Tkachev

Yu. L. Voytekhovskiy^{1, 2}, A. A. Zakharova¹¹Saint-Petersburg Mining University, Saint Petersburg²Geological Institute FRC KSC RAS, Apatity

The article describes a technique for 2D modeling of structures and textures of bimineral rocks in terms of the probabilities of binary intergranular contacts. It is shown that typical petrographic structures (disseminated, chained, poikilitic, porphyric) and textures (massive, banded, schlieren) regularly fill the barycentric diagram (p_{ii} , p_{ij} , p_{ji}) of contact probabilities. These structures and textures are correlated with the Hardy-Weinberg equilibrium. The problems of modeling polymineral petrographic structures and textures are discussed. A new type of structural diagrams is suggested. The article is dedicated to the memory of Dr. Sci. Yu. A. Tkachev — a well-known Russian specialist in the field of modeling the structures of sedimentary rocks.

Keywords: crystalline rock, petrographic structures: disseminated, chained, poikilitic, porphyric; petrographic textures: massive, banded, schlieren.

Введение

Структура и текстура — атрибуты любой горной породы, содержащие разнородную информацию о ее генезисе. Петрографические словари определяют их как совокупные характеристики форм (панидио-, гипидио- и ксеноморфно-зернистые структуры), абсолютных и относительных размеров (тонко-, мелко-, средне- и крупно-, равномерно- и неравномерно-зернистые, порфировидные и порфировые структуры) слагающих горную породу минеральных зерен, а также пространственных отношений их самих (пойкилитовая структура) и агрегатов (массивная, шлировая, полосчатая текстуры) [5]. Отдавая должное поколениям петрографов, описавших сотни структур и текстур, заметим, что они не укладываются в математическую систему не столько из-за разнообразия, сколько из-за намерения вместить в одну характеристику несколько разнородных измеримых параметров и даже генетические (!) представления. Типичный пример — лепидогранобластовая структура, указывающая на чешуйки слюды, изометричные зерна кварца и бластез горной породы. Мы

видим в этом недостаток сегодняшней петрографической номенклатуры. (Можно ли представить номенклатуру точечных или пространственных групп симметрии, в которую входили бы утверждения о генезисе измеряемых кристаллов?) Тем не менее подчеркнем, что дальнейшие подходы предлагаются в дополнение, а не вместо существующих.

Принципы моделирования

Всякая модель представляет объект лишь в тех аспектах, которые полагаются всеобщими и принципиальными. Все более полное описание достигается поэтапным добавлением в модель более частных аспектов. В этом исследовании мы руководствовались следующими принципами.

Номенклатура петрографических структур и текстур сложилась при их наблюдении в 2D-поверхностях: обнажениях, штуфах, шлифах под микроскопом. Моделирование в 3D привело бы к сложной проблеме

Для цитирования: Войтеховский Ю. Л., Захарова А. А. Моделирование петрографических структур // Вестник геонаук. 2020. № 10(310). С. 38—42. DOI: 10.19110/geov.2020.10.5.

For citation: Voytekhovskiy Yu. L., Zakharova A. A. Modeling petrographic structures. Vestnik of Geosciences, 2020, 10(310), pp. 38—42. DOI: 10.19110/geov.2020.10.5.



ме стереологической реконструкции, то есть распознаванию в сечениях. Поэтому моделирование выполнялось сразу в 2D.

Горная порода — системный объект с определенными элементами (минеральными зёрнами различных видов) и пространственными отношениями (контактирования/неконтактирования). Сложность системы более зависит от специфики отношений, чем от разнообразия элементов (хотя ясно, что отношений без элементов не бывает). В этом исследовании мы избегаем описания элементов (форм и размеров минеральных зёрен) и делаем акцент на описании их отношений контактирования.

Диагностика минеральных видов и характеристика форм и размеров минеральных индивидов — минералогический, а не петрографический уровень исследования. Последний состоит в узнавании горной породы по ее модальному составу (из которого следует химический состав, а если не следует, то потому, что составы минералов варьируют в широких пределах) и типу организации (структуре и текстуре), что в обоих аспектах подразумевает статистический подход.

Статистический подход содержится и в традиционном описании горной породы, ведь мы всегда отбираем «представительный» штуч, в котором достигается ее узнаваемый облик. В этом исследовании для характеристики пространственных отношений минеральных зёрен мы используем вероятности бинарных контактов. Моделирование выполнено для биминеральной горной породы. В этом простейшем случае вероятности контактов и расчетные тренды можно изобразить в барицентрической диаграмме $\{p_{ii}, p_{ij}, p_{jj}\}$. Возможности моделирования полиминеральных структур обсуждены отдельно.

Принципиально важная черта организации горных пород (а также металлов и сплавов) состоит в том, что 4 зёрна контактируют в точке, 3 — по линейному ребру, 2 — по некоторой поверхности [1; 6, с. 34–35]. В случайное сечение первые не попадают, вторые выглядят как тройные контакты в точке, последние — как бинарные контакты вдоль линии (рис. 1). Но для любого планарного графа выполняется соотношение Эйлера: $n - e + v = 1$, где n — число клеток, e — ребер, v — вершин. В нашем случае (представляя граф без края — так мыслится и кристаллическая решетка) $3v = 2e$. Тогда $e = 3n - 3 \approx 3n$ при $n \rightarrow \infty$. Средняя координация клеток: $2e / n = 6 - 6/n \rightarrow 6$ при $n \rightarrow \infty$.

Поэтому статистическое моделирование петрографических структур возможно на гексагональной сетке (рис. 1). На первый взгляд, это противоречит сказан-

ному выше об игнорировании форм минеральных зёрен. Но для дальнейшего важны не гексагоны (их можно заменить точками в центрах), а усредненные характеристики сетки: общее число бинарных контактов $3n$ и средняя координация клетки 6. Историческая аналогия — переход О. Браве от форм «полиэдрических молекул» Р.-Ж. Гаюи к размещению в пространстве их центров, что привело к открытию 14 типов решеток. Удивительно, что правильное кристаллографическое разбиение плоскости на гексагоны проявилось «в среднем» в неправильном рисунке межзерновых границ в сечении горной породы.

Вкрапленные структуры, массивные текстуры

Пусть n — общее число минеральных зёрен, тогда $3n$ — общее число бинарных контактов в структуре. Пусть kn — число черных зёрен, рассеянных в белой матрице, здесь и далее $0 < k < 1$ (оценка точной верхней границы для k всякий раз составляет задачу). Тогда числа различных бинарных контактов равны: $N_{qq} = 0$, $N_{qb} = 6kn$, $N_{bb} = 3n - 6kn$. Делением на $3n$ найдем соответствующие вероятности: $p_{qq} = 0$, $p_{qb} = 2k$, $p_{bb} = 1 - 2k$. Предположительно, максимальная концентрация черных зёрен достигается для $k = 1/4$ (рис. 2). Серия вкрапленных структур для $0 < k < 1/4$ образует ограниченный непрерывный тренд на ребре (p_{bb}, p_{qb}) барицентрической диаграммы (рис. 3). Равномерное рассеяние черных зёрен среди белых создает массивную текстуру.

Пойкилитовые структуры

Пусть n — общее число ойкокристаллов, m — хадакристаллов (рис. 2). Общее число контактов: $N_{qq} = 0$, $N_{qb} = m$, $N_{bb} = 3n$. Соответствующие вероятности: $p_{qq} = 0$, $p_{qb} = m/(3n+m) = 1/(1+3n/m)$, $p_{bb} = 3n/(3n+m) = 1/(1+m/3n)$. Если хадакристаллов относительно мало, т. е. $m/3n \rightarrow 0$, то $p_{qb} \rightarrow 0$, $p_{bb} \rightarrow 1$. Если хадакристаллов относительно много, т. е. $3n/m \rightarrow 0$, то $p_{qb} \rightarrow 1$, $p_{bb} \rightarrow 0$. Тренд пойкилитовых структур занимает все ребро (p_{bb}, p_{qb}) барицентрической диаграммы (рис. 3).

Цепочечные структуры, полосчатые текстуры

Пусть n — общее число минеральных зёрен, тогда $3n$ — общее число бинарных контактов в структуре. Пусть kn — число черных зёрен в цепочках. Тогда $N_{qq} = kn$, $N_{qb} = 4kn$, $N_{bb} = 3n - 5kn$. Соответствующие

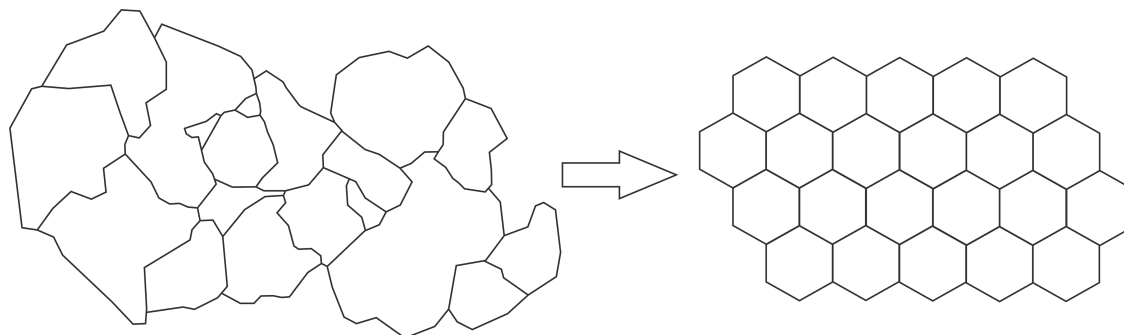


Рис. 1. Межзерновые границы в петрографическом шлифе и гексагональная сетка

Fig. 1. Intergranular boundaries in a petrographic section and a hexagonal net

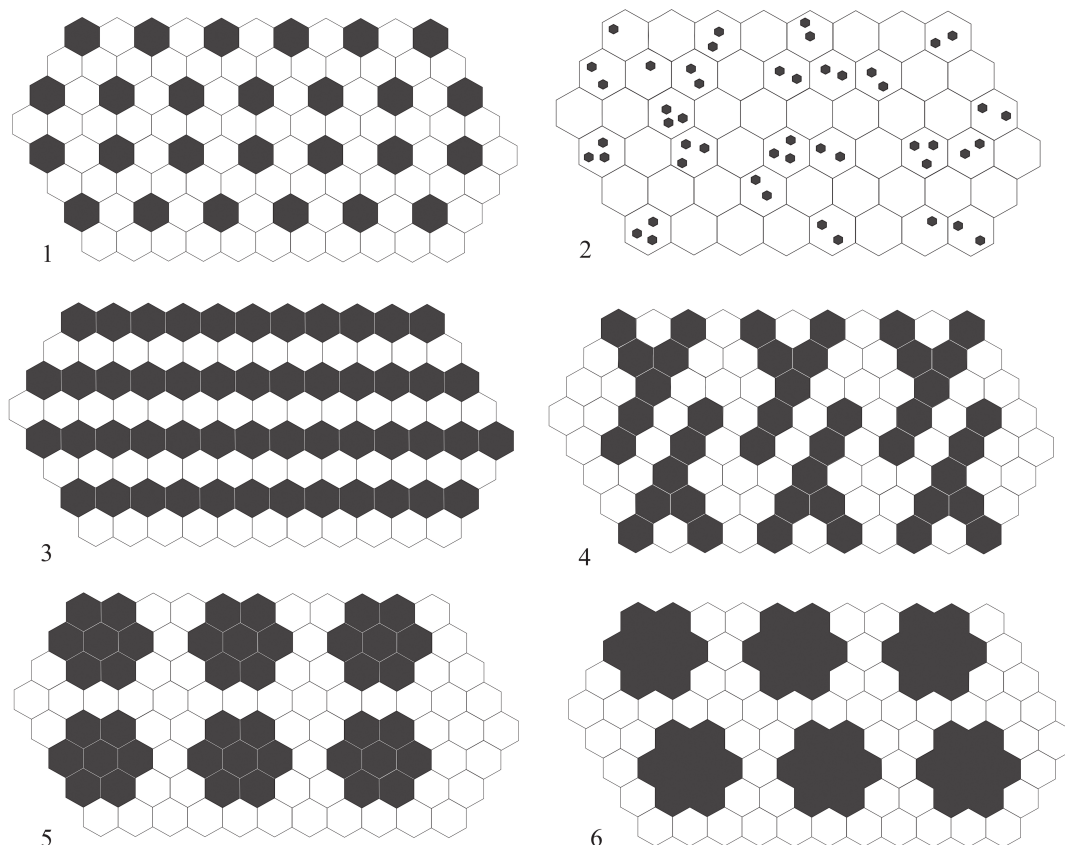


Рис. 2. Модели структур и текстур: 1 — вкрапленная, 2 — пойкилитовая, 3 — цепочечная, 4 — с ветвящимися кластерами, 5 — шлировая, 6 — порфировая

Fig. 2. The models of the structures and textures: 1 — disseminated, 2 — poikilitic, 3 — chained, 4 — with branching clusters, 5 — schlieren, 6 — porphyritic

вероятности: $p_{чч} = k/3$, $p_{чб} = 4k/3$, $p_{бб} = 1 - 5k/3$. Предположительно, максимальная концентрация черных зерен достигается для $k = 1/2$ (рис. 2). Серия цепочечных структур для диапазона $0 < k < 1/2$ образует непрерывный тренд (рис. 3). Превращением цепочек в черные полосы и варьированием (через k) ширины белых полос между ними моделируются полосчатые текстуры. Их тренды покрывают угол барицентрической диаграммы ниже тренда цепочечной структуры.

Структуры с ветвящимися кластерами

В работе [2, с. 10–13] описаны структуры с ветвящимися кластерами зерен кварца в полевошпатовой матрице. Выполним моделирование для кластеров из 7 зерен (рис. 2). Пусть n — общее число минеральных зерен в структуре, тогда $3n$ — общее число бинарных контактов. Пусть kn — общее число кварцевых зерен в кластерах. Тогда число кластеров равно $kn/7$. Число контактов: $N_{чч} = kn$, $N_{чб} = 4kn$, $N_{бб} = 3n - 5kn$. Соответствующие вероятности: $p_{чч} = k/3$, $p_{чб} = 4k/3$, $p_{бб} = 1 - 5k/3$. Результат совпал с предыдущим, так как цепочки и ветвящиеся кластеры отличаются лишь одним зерном — центром ветвления, что не сказалось на статистике контактов.

Шлировые текстуры

Пусть n — общее число минеральных зерен, тогда $3n$ — общее число бинарных контактов в структуре. Пусть kn — число зерен, собранных в шлиры по 7

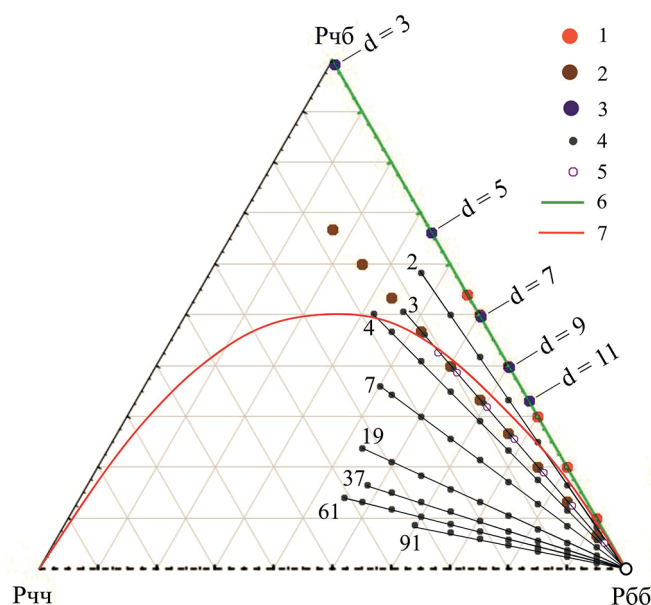


Рис. 3. Барицентрическая диаграмма вероятностей (p_{ii} , p_{ij} , p_{ji}). Структуры и текстуры: 1 — вкрапленная, 2 — цепочечная, 3 — порфировые (d — диаметр фенокристалла), 4 — шлировые (количества зерен в шлирах указаны числами), 5 — с ветвящимися кластерами, 6 — пойкилитовые; 7 — линия равновесия Харди — Вайнберга

Fig. 3. Barycentric diagram of (p_{ii} , p_{ij} , p_{ji}) probabilities. Structures and textures: 1 — disseminated, 2 — chained, 3 — porphyritic (d — diameter of phenocryst), 4 — schlieren (quantities of grains in the schlieren are indicated by the numbers), 5 — with branching clusters, 6 — poikilitic; 7 — the Hardy–Weinberg equilibrium line



(рис. 2). Тогда число шлиров в структуре $kn/7$, число контактов: $N_{чч} = 12kn/7$, $N_{чб} = 18kn/7$, $N_{бб} = 3n - 30kn/7$, соответствующие вероятности: $p_{чч} = 4k/7$, $p_{чб} = 6k/7$, $p_{бб} = 1 - 10k/7$. Тренды шлировых текстур для разных размеров шлиров и значений k покрывают барицентрическую диаграмму ниже тренда цепочечной структуры (рис. 3).

Порфиroidные и порфиrowые структуры

Эти структуры удобно моделировать как предыдущие, у которых в шлирах стерты межзерновые границы. Характеристика модельных шлиров дана в таблице. Здесь d — диаметр шлира (диаметр белого зерна принят за 1), $n(d)$ — число зерен в шлире (аппроксимируется величиной $\pi d^2/4$), $v(d) = N_{чч}$ — число границ в шлире, $p(d) = N_{чб} = 6d$ — число внешних границ шлира, $\Sigma = N_{чч} + N_{чб}/2 = 3n(d)$.

Характеристика модельных шлиров
Characteristics of model shlirens

d	3	5	7	9	11
n(d)	7	19	37	61	91
v(d)	12	42	90	156	240
p(d)	18	30	42	54	66
Σ	21	57	111	183	273

Пусть n — общее число минеральных зерен, тогда $3n$ — общее число бинарных контактов в структуре. Пусть kn — число зерен в шлирах, тогда $3kn$ — числа контактов в $kn/n(d)$ -шлирах. Стирая внутренние границы, превратим шлиры в порфиrowые вкрапленники. Число оставшихся контактов: $N_{чч} = 0$, $N_{бб} = 3n - 3kn - knp(d) / 2n(d) = 3n(1-k) - 12kn / \pi d$, $N_{чб} = 2knp(d) / 3n(d) = 16kn / \pi d$. Деля на их сумму, получим вероятности: $p_{чч} = 0$, $p_{чб} = 16k / [3\pi d(1-k) + 4k]$, $p_{бб} = 1 - p_{чб}$.

Тренды порфиrowидных и порфиrowых структур в совокупности покрывают ребро ($p_{бб}$, $p_{чб}$) барицентрической диаграммы (рис. 3). Каждый начинается вблизи вершины $p_{бб}$ и простирается к вершине $p_{чб}$ тем далее, чем меньше диаметр кластера. При фиксированном d предельное значение k вычисляется из условия $p_{чб} > 0$ (рис. 4).

Обсуждение и выводы

Выше предложена барицентрическая диаграмма нового типа, показывающая вероятности бинарных межзерновых контактов (в простейшем случае биминеральной горной породы), существующих во всех кристаллических горных породах и тем самым выражающих фундаментальные пространственные отношения между слагающими их минеральными индивидами. При заданном виде кластера моделируются любые петрографические структуры и текстуры. При этом их канонические типы закономерно заполняют поле диаграммы трендами, определяемыми видом кластера и его концентрацией в структуре. (Левая часть диаграммы на рис. 3 симметрично заполняется структурами «белые кластеры в черной матрице».) Фигуративные

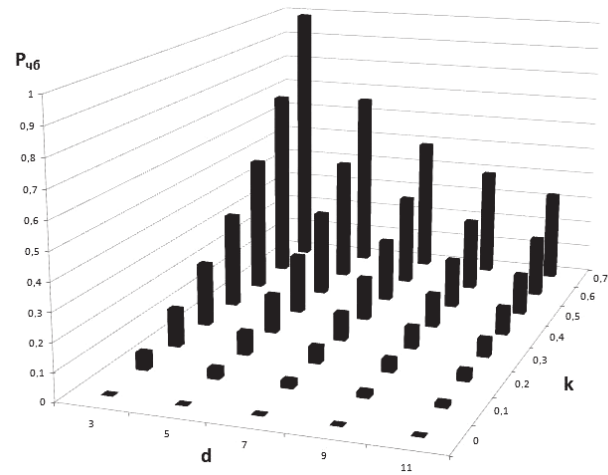


Рис. 4. Соотношение d и k для порфиrowых структур
Fig. 4. Relationship between d and k for porphyritic structures

точки реальных петрографических структур и текстур должны занимать промежуточные положения между модельными трендами.

Около вершины $p_{чб}$ внутри диаграммы есть поле, в которое модельные тренды не проникают. Это означает, что невозможна петрографическая структура без мономинеральных контактов (типа шахматной доски), образуемых хотя бы одним минералом (таковы модельные вкрапленные и пойкилитовые структуры). В реальных петрографических структурах обычны мономинеральные контакты обоих видов. Для расчетных трендов могут быть оценены предельные точки, вместе ограничивающие запрещенное поле.

Тренды различных структур (например, цепочечной и с ветвящимися кластерами) и поля текстур (полосчатых и шлировых) в поле диаграммы перекрываются. Совпадение статистик бинарных контактов и, как следствие, термодинамических характеристик [3] сети межзерновых границ обращает внимание на фундаментальный вопрос: почему горная порода следует той или иной стратегии кристаллизации, приводящей к той или иной структуре?

Интересен вопрос о соотношении различных структур и текстур с рассмотренным ранее [4] равновесием Харди — Вайнберга, выражающим гомогенное перемешивание минеральных индивидов в горной породе (массивная текстура). На диаграмме видно, что тренды вкрапленных, пойкилитовых и цепочечных структур, начинаясь вблизи вершины $p_{бб}$ диаграммы, на значительном протяжении следуют вблизи линии равновесия. Явно отклоняются от нее ярко выраженные порфиrowые, пойкилитовые и цепочечные структуры, а также полосчатые и шлировые текстуры.

Возможно ли расширение метода на полиминеральные структуры? Принципиальных препятствий к этому нет. Проблема состоит в визуализации барицентрических диаграмм и поверхностей равновесия Харди — Вайнберга. Даже для трехминеральной горной породы это 2-мерная поверхность в 6-вершинном (5-мерном) симплексе. В этом случае более наглядно последовательное рассмотрение полиминеральной структуры в виде «минерал — матрица» для каждого из слагающих горную породу минералов и сравнение результатов на барицентрической диаграмме.



Расчет вероятностей бинарных межзерновых контактов — рутинная процедура даже для биминеральной горной породы. Мы изучаем возможность применения для этих целей линейного метода Розиваля в компьютерном варианте и с применением отечественного анализатора структуры МИУ-5.

Литература

1. Бельский В. З. Геометрико-вероятностные модели кристаллизации. Феноменологический подход. М.: Наука, 1980. 88 с.
2. Бескин С. М., Ларин В. Н., Марин Ю. Б. Редкометалльные гранитовые формации. Л.: Недра, 1979. 280 с.
3. Бродская Р. Л. Термодинамические (кинетические) критерии формирования и эволюции структуры минеральных агрегатов // Зап. ВМО. 1988. № 5. С. 623–633.
4. Войтеховский Ю. Л. Типизация неправильных пространственных разбиений // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2018. № 8. С. 46–50. doi: 10.19110/2221-1381-2018-8-46-50.
5. Левинсон-Лессинг Ф. Ю., Струве Э. А. Петрографический словарь. М.: Госгеолиздат, 1963. 448 с.
6. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография. М.: Гос. науч.-тех. изд. лит. по черной и цветной металлургии, 1958. 447 с.

References

1. Belenkiy V. Z. *Geometriko-veroyatnostnye modeli kristallizatsii. Fenomenologichesky podhod* (Geometric-probabilistic models of crystallization. Phenomenological approach). Moscow: Nauka, 1980, 88 pp.
2. Beskin S. M., Larin V. N., Marin Yu. B. *Redkometalnye granitovye formatsii* (Rare-metal granitic formations). Leningrad: Nedra, 1979, 280 pp.
3. Brodskaya R. L. *Termodinamicheskiye (kineticheskiye) kriterii formirovaniya i evolutsii struktury mineralnykh agregatov* (Thermodynamic (kinematic) criteria of formation and evolution of mineral aggregates structures). Proc. Rus. Mineral. Soc, 1988, No. 5, pp. 623-633.
4. Voytekhovskiy Yu. L. *Tipizatsiya nepravilnykh prostranstvennykh razbieniy* (Typization of irregular spatial tilings). Vestnik IG Komi SC UB RAS, 2018, No. 8, pp. 46–50. doi: 10.19110/2221-1381-2018-8-46-50.
5. Levinson-Lessing F. Yu., Struve E. A. *Petrograficheskiy slovar* (Petrographic dictionary). Moscow: Gosgeolizdat, 1963, 448 pp.
6. Saltykov S. A. *Stereometricheskaya metallografiya* (Stereometric metallography). Moscow: State Publ. House on Ferrous and Non-Ferrous Metallurgy, 1958, 447 pp.

Поступила в редакцию / Received 19.10.2020



НАУЧНОЕ НАСЛЕДИЕ Ю. А. ТКАЧЕВА • Yu. A. TKACHEV'S SCIENCE HERITAGE

Памяти ученого • In memory of scientist (1935–2020)

In his 86th year, a full member of the International Academy of Authors of Scientific Discoveries and Inventions, «Honorary Veteran of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences», Honored Scientist of the Komi Republic, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor Yuri Andreevich Tkachev passed away. He was well known in Russia and abroad for his research and fundamental work in the field of geostatistics, mathematical modeling of geological processes and phenomena, geological and economic assessment of mineral deposits, mining law.

Ушел из жизни Юрий Андреевич Ткачев — доктор геолого-минералогических наук, профессор, заслуженный деятель науки Республики Коми, выдающийся ученый, широко известный в России и за рубежом исследованиями и фундаментальными работами в области геостатистики, математического моделирования геологических процессов и явлений, геолого-экономической оценки месторождений полезных ископаемых, горного права.

Ю. А. Ткачев родился в 1935 г., экстерном, с серебряной медалью окончил среднюю школу № 1 г. Фрунзе. В 1956 г. закончил Фрунзенский политехнический институт и, получив диплом с отличием горного инженера-геолога по специальности «Геология и разведка месторождений полезных ископаемых», поступил на работу в Институт геологии АН Киргизской ССР на должность младшего научного сотрудника в лабораторию по изучению оруденения урана, германия и других элементов в угленосных отложениях и аллювиальных торфяниках. В 1965 г. защитил по этой теме кандидатскую диссертацию.

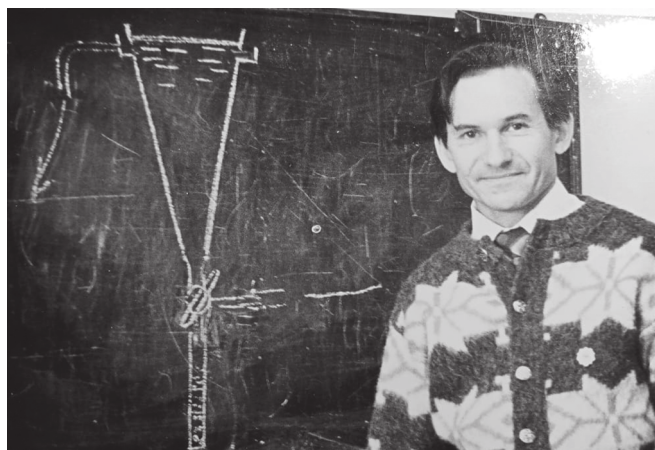
Используя статистические методы, Ю. А. Ткачев впервые получил формулу надежной обработки геологических проб при разведке месторождений и обосновал решение задачи надежного и максимально эконо-



мичного опробования (1960 г.). Сейчас этот метод рекомендуется органами государственного управления в сфере недропользования для повсеместного практического применения при исследовании руд и подсчете запасов. С 1965 по 1972 гг. Юрий Андреевич трудился во Всесоюзном научно-исследовательском институте синтеза минерального сырья (ВНИИ СИМС, г. Александров). В этот период он разработал уникальный метод подсчета запасов минерального сырья с гнездовым распределением полезного компонента, который оказался революционным в геолого-разведочной науке и практике.

В 1972 г. Ю. А. Ткачев приступил к работе в Институте геологии Коми НЦ УрО РАН, сначала в должности старшего, затем ведущего и главного научного сотрудника, заведующего лабораторией минерально-сырьевых ресурсов (1991—2007). Фундаментальным научным результатом этого периода стало решение давней проблемы выбора средневзвешенного, или арифметического, способа расчета геолого-разведочных параметров при подсчете запасов. Ю. А. Ткачев разработал необходимую для этого теорию и предложил метод оценки несмещенных средних по так называемым некомплектным данным. Это позволило опереться при подсчете запасов на комплекс геолого-геофизических данных, в том числе и на выработки с неполными данными. Компьютерный вариант метода был применен на многих залежах нефти в Тимано-Печорской провинции и стал основой докторской диссертации, защищенной в 1987 г. во ВНИГРИ (Санкт-Петербург), а выполненные разработки составили программный комплекс «ЗАПАС».

Профессор Ю. А. Ткачев является основателем и лидером оригинальной научной школы — математических методов в геологии. Юрий Андреевич сделал очень много для внедрения математических методов в геологию. К его высоким достижениям относятся: применение различных методов обработки геохимических данных (в первую очередь результатов полуко-



Ю. А. Ткачев — зав. лабораторией геоинформатики. 1978 г.
Yu. A. Tkachev — Head of the Geoinformatics Laboratory. 1978

личественного спектрального анализа); решение проблемы корреляции и регрессии в замкнутых системах применительно к петрографическим и минеральным системам, развитие теории парагенезиса; разработка



С женой Аллой Дмитриевной на даче. 2009 г.

With his wife Alla Dmitrievna in the countryside. 2009

универсальной методики преобразования закрытых (процентных) числовых систем в соответствующие им открытые, позволяющей решать проблему ложных корреляций в геохимии, петрохимии, минералогии, литологии и других разделах геологических наук и отраслях, где обсуждаются составы, выраженные в долях (процентах); формализация геологических явлений и объектов для последующей обработки машинными методами; разработка методов сегментного анализа аллювия применительно к седиментологическим, литологическим, археологическим задачам, а также для решения вопросов берегоукрепления, промышленного и гражданского строительства. Сегодня эти подходы развились в методы прогнозно-вероятностного геологического моделирования поисков месторождений полезных ископаемых, новую концепцию формирования угленосных толщ. Внедрение предложенного Ю. А. Ткачевым нового подхода математической обработки результатов вычислений и экспериментов позволит восстанавливать исходные открытые числовые системы данных.

Юрий Андреевич активно участвовал в законодательной деятельности Республики Коми и Российской Федерации. Его законопроекты «О недрах», «О собственности», поправки к законам «Об экологической экспертизе», «Об охране природы», «О науке и научно-технической политике» сыграли важную роль в создании правовых основ современного государственного управления. Его книга «Плата за недра» стала одной из наиболее цитируемых среди специалистов.

Ю. А. Ткачев является автором более двухсот семидесяти научных работ, в числе которых восемь монографий, три изобретения, компьютерные программы

на языке Турбо Паскаль — 7 для статистической обработки данных, десять новых учебных курсов.

За многолетний плодотворный труд Ю. А. Ткачев награжден медалями «За доблестный труд в ознаменование 100-летия со дня рождения В. И. Ленина», «Ветеран труда», «За заслуги в деле изобретательства», Почётным знаком «За безупречную службу Республике Коми», знаками «За заслуги в изучении недр РК», «Ветеран КНЦ», «90 лет РК», многочисленными почетными грамотами. В 2019 году Ю. А. Ткачеву присвоено звание «Почетный ветеран УрО РАН».

В 2020 году подготовлена в печать монография Ю. А. Ткачева «Открытые и закрытые (процентные) числовые системы: проблема ложной корреляции», посвящённая исследованиям в области геостатистики, математическому моделированию геологических процессов и явлений.

Юрий Андреевич Ткачев оставил добрую память в наших сердцах и выдающееся научное наследие, которое мы должны сохранить для геологии настоящего и будущего.



Список основных трудов Ю. А. Ткачева

1. Ткачев Ю. А., Гудков А. С., Коробейников П. Г., Брезгунов Н. И. Разведка и освоение гидротермальных месторождений горного хрусталя: Монография. М.: Недра, 1974. 264 с.
2. Ткачев Ю. А., Шеин А. А. Обработка проб полезных ископаемых. М.: Недра, 1987. 190 с.
3. Ткачев Ю. А. Плата за недра. СПб.: Наука, 1998. 168 с.
4. Ткачев Ю. А. Проблема процентных величин в минералогии, петрографии и геохимии. Сыктывкар: Геопринт, 1999. 27 с.
5. Ткачев Ю. А., Иванова Т. И. Спектральный анализ в геологии и геохимии: Монография. Екатеринбург: УрО РАН. 2003. 297 с.
6. Ткачев Ю. А., Разманова О. Ф., Амосова О. Е. Прогностические свойства закона Парето — Ципфа в геологии. Сыктывкар: Геопринт, 2006. (Отчетная серия, № 7 (39)). 29 с.
7. Ткачев Ю. А. Миграционно-дельтовая концепция накопления угленосных толщ. LAP LAMBERT Academic Publishing. 2016. 135 с.

Редакторы издательства:

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

Компьютерная верстка:

Р. А. Шуктомов

Свид. о рег. средства массовой информации ПИ № ФС77-75435 от 19.04.2019, выданное Роскомнадзором. Отпечатано: 30.11.2020. Формат бумаги 60×84 1/8. Печать RISO. Усл. п. л. 5,5. Тираж 140. Заказ 1146. Учредитель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук» (ФИЦ Коми НЦ УрО РАН). Редакция, издательство, типография: издательско-информационный отдел Института геологии имени академика Н. П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук» (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН). Адрес: 167982, Республика Коми, Сыктывкар, Первомайская, 54. Тел. : (8212) 24-51-60. Эл. почта: vestnik@geo.komisc.ru

На обложке использованы фото И. Астаховой, А. Перетягина, П. Безносова, Е. Кушмановой