

## РЕЛИКТЫ ПАЛЕОФЛОРЫ В УДАРНОРАСПЛАВЛЕННЫХ ПОРОДАХ КРАТЕРА ЭЛЬГЫГЫТГЫН НА ЧУКОТКЕ (РОССИЯ)

Е.П. Гуров<sup>1</sup>, В.В. Пермяков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Институт геологических наук НАН Украины, Киев, Украина, E-mail: yevgeniy.gurov@gmail.com  
Доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник.*

<sup>2</sup> *Институт геологических наук НАН Украины, Киев, Украина, E-mail: 0673866227@ukr.net  
Кандидат технических наук, старший научный сотрудник.*

Реликты палеофлоры установлены в ударнорасплавленных породах импактного кратера Эльгыгытгын на Чукотке. Кратер Эльгыгытгын диаметром 18 км образован 3,6 млн лет назад в толще вулканических пород Охотско-Чукотского вулканического пояса. Импактные породы в кратере сохранились в переотложенном виде в террасах кратерного озера. Они представлены стекловатыми бомбами, ударнорасплавленными породами и ударнометаморфизованными вулканитами мишени. Остатки ископаемой флоры установлены при электронномикроскопическом изучении ударнорасплавленных пород из террасовых отложений восточной, южной и северо-западной частей кратерного бассейна. Остатки флоры сохранились в газовых пузырях в стекловатой матрице пород. Они представлены плотными сплетениями растительных волокон, фрагментами клеточной ткани и некоторыми другими образованиями, частично сохраняющими морфологию исходных растительных частиц. Размеры отдельных частиц и их скоплений составляют от нескольких микрометров до первых сотен микрометров. Главными компонентами состава растительных остатков являются углерод (50-80 мас. %) и кислород (30-40 мас. %).

Впервые в мировой практике реликты палеофлоры в ударнорасплавленных породах были установлены П.Г. Шульцем и Р.С. Харрисом в 2005 г. в составе обломков импактитов, образующих семь локальных горизонтов в толще неогеновых осадочных отложений Аргентинской Пампы. Исходные импактные структуры – источники этих ударных расплавов – еще не установлены ни для одного из горизонтов. В 2007 г. отпечатки флоры были описаны Дж. Р. Осинским с соавторами в импактных стеклах Dakhleh в Египте, которые диагностированы как дальние выбросы из еще не установленной импактной структуры. Кратер Эльгыгытгын является первой импактной структурой на поверхности Земли, в которой обнаружены остатки ископаемой флоры. Полученные данные подтверждают роль ударных процессов в надежной консервации и длительном сохранении следов древней жизни на поверхности Земли и планет.

*Ключевые слова:* импактный кратер; ударнорасплавленная порода; растительные остатки; клеточная ткань.

## RELICS OF PALEOFLORA IN IMPACT MELT ROCKS OF THE EL'GYGYTGYN CRATER IN CHUKOTKA (RUSSIA)

Y.P. Gurov<sup>1</sup>, V.V. Permiakov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine, E-mail: yevgeniy.gurov@gmail.com  
Doctor of geological and mineralogical sciences, senior scientific worker.*

<sup>2</sup> *Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine, E-mail: 0673866227@ukr.net  
Candidate of technical sciences, senior scientific worker.*

Relics of paleoflora were discovered in impact melt rocks of the El'gygytgyn crater in Chukotka. The El'gygytgyn impact crater, 18 km in diameter and 3.6 Ma old, was formed in volcanic strata of the Ochotsk-Chukotka Volcanic Belt, north-eastern Russia. Impact rocks of the crater were preserved as redeposited in the terraces of a crater lake. Impactites of the El'gygytgyn crater are represented by glassy bombs, impact melt rocks, and shock-metamorphosed volcanic rocks of the crater target. Remnants of fossil flora were discovered by electron microscopy of impact melt rocks from the eastern, southern, and north-western lacustrine terraces of the crater basin. Floral relics occur within gas vesicles in glassy matrix of impact melt rocks in form of dense accumulations of plant fibers, cell tissue fragments, and some other types of floral fragments, partly preserving the morphology of the original plant particles. The size of individual particles and their clusters range from a few micrometers to the first hundreds of micrometers. Carbon (50-70 wt %) and oxygen (30-40 wt %) are the main components of the floral remnants composition.

For the first time relics of paleoflora in impact melt rocks were distinguished by Schultz and Harris in 2005 in impactite debris forming seven local horizons in the Neogene sedimentary strata of the Argentinian pampa. The source of the impact structures is still unknown. Floral prints were described in 2007 by Osinsky with coauthors in impact glasses of Dakhleh, Egypt. These impact glasses were diagnosed as long-range emissions from not yet distinguished impact structure. So, El'gygytgyn crater is the first impact structure on the Earth surface, in which floral remains in impact melt rocks were discovered. Our data confirm the role of impact process in reliable conservation and long-term preservation of traces of ancient life on the surface of the Earth and other planets.

*Key words:* impact crater; shock melted rock; floral residues; cell tissue.

## РЕЛИКТИ ПАЛЕОФЛОРИ В УДАРНОРОЗПЛАВЛЕНИХ ПОРОДАХ КРАТЕРА ЕЛЬГИГИТГИН НА ЧУКОТЦІ (РОСІЯ)

Є.П. Гуров<sup>1</sup>, В.В. Пермяков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна, E-mail: yevgeniy.gurov@gmail.com  
Доктор геолого-мінералогічних наук, старший науковий співробітник.

<sup>2</sup> Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна, E-mail: 0673866227@ukr.net  
Кандидат технічних наук, старший науковий співробітник.

Релікти палеофлори встановлені в ударнорозплавлених породах кратера Ельгігітгін на Чукотці. Імпактний кратер Ельгігітгін діаметром 18 км утворений 3,6 млн років тому в товщі вулканічних порід Охотсько-Чукотського вулканогенного поясу. Імпактні породи в кратері збереглися в перевідкладеному стані у терасах кратерного озера. Вони представлені склуватими бомбами, ударнорозплавленими породами та ударнометаморфізованими вулканітами мішені. Залишки викопної флори встановлені під час електронномікроскопічних досліджень ударнорозплавлених порід з відкладів озерних терас східної, південної та північно-західної частин кратерного басейну. Залишки флори знаходяться в газових пухирях у склуватій матриці порід. Вони складені скупченнями рослинних волокон, фрагментами клітинної тканини та деякими іншими утвореннями, що частково зберігають початкову морфологію рослинних фрагментів. Головними компонентами їх складу є вуглець (50-70 мас. %) та кисень (30-40 мас. %).

Вперше у світовій практиці релікти палеофлори в ударнорозплавлених породах були встановлені П.Г. Шульцем і Р.С. Харрісом у 2005 р. у складі уламків імпактитів, що утворюють сім локальних горизонтів у товщі неогенових осадових відкладів Аргентинської Пампи. Вихідні імпактні структури – джерела цих ударних розплавів – ще не встановлені. У 2007 р. відбитки флори були описані Дж.Р. Осинським з співавторами в імпактних стеклах Dakhleh в Єгипті, де вихідна імпактна структура до теперішнього часу також не виявлена. Кратер Ельгігітгін є першою імпактною структурою на поверхні Землі, в якій встановлені залишки викопної флори. Отримані дані підтверджують роль ударних процесів у надійній консервації та тривалому збереженні слідів стародавнього життя на поверхні Землі та планет.

*Ключові слова:* імпактний кратер; ударнорозплавлена порода; рослинні залишки; клітинна тканина.

### Введение

Впадина оз. Эльгыгытгын в виде глубокой депрессии, окруженной кольцеобразным валом, была открыта С.В. Обручевым в 1933 г. при аэрогеологических исследованиях неизученной в то время центральной части Чукотского полуострова. Предположение о вулканическом происхождении структуры этот исследователь обосновал ее сходством с кратерами на поверхности Луны, согласно существовавшим в то время представлениям об их вулканогенной природе [Обручев, 1957]. Позже изучение этой структуры проводил В.Ф. Белый [Белый, 1958], попытавшийся обосновать ее тектоническое происхождение. Впервые представления о воз-

можном метеоритном образовании впадины были высказаны И.А. Некрасовым и П.А. Раудонисом [Некрасов, Раудонис, 1963], которые, однако, не обнаружили признаков ударного метаморфизма в восьми шлифах пород с вала структуры и отказались от этой гипотезы. Тем не менее, данные этих авторов послужили основанием для включения впадины оз. Эльгыгытгын в списки возможных метеоритных кратеров [Зоткин, Цветков, 1970]. В 1976 г. американские ученые R.S. Dietz и J.F. McHone на основании изучения космических снимков этой структуры высказали предположение о том, что она представляет собой крупнейший на поверхности Земли молодой метеоритный кратер [Dietz,

McHone, 1976]. В развитие этих представлений была выдвинута гипотеза о возможной связи с этой структурой австрало-азиатских тектитов [Dietz, 1977].

В результате проведения экспедиционных работ в структуре в 1977 г. сотрудниками Института геологических наук АН УССР Е.П. Гуровым, А.А. Вальтером и А.И. Серебренниковым были получены доказательства ее метеоритного происхождения [Гуров и др., 1978; Gurov et al., 1979]. Особый интерес к изучению структуры был вызван тем, что кратер Эльгыгытгын является единственной импактной структурой на поверхности Земли, образованной в вулканогенных породах кислого состава. В течение 1978-1980 гг. экспедиционные работы в кратере были продолжены Е.П. Гуровым, Е.П. Гуровой, А.И. Серебренниковым, Р.Б. Ракицкой и В.И. Ефименко при поддержке начальника Чанунской КГРЭ В.И. Лаштабега и главного геофизика экспедиции В.А. Жукова. В ходе изучения структуры была составлена схематическая карта геологического строения кратера, определены строение и состав подвергшейся удару толщи вулканогенных пород, впервые в мировой практике изучены основные закономерности ударного метаморфизма кислых вулкаников, изучен состав ударнорасплавленных пород, определены масштабы распространения разломов вокруг импактной структуры [Гуров, Гурова, 1979, 1991; Гуров, Гожик, 2006; Gurov, Koeberl, 2004; Gurov et al., 2005, 2007]. Определение изотопного возраста импактитов кратера, равного  $(3,50 \pm 0,50)$  млн лет [Gurov et al., 1979], позволило опровергнуть предположение о кратере Эльгыгытгын как возможном источнике австрало-азиатских тектитов [Dietz, 1977].

В течение 1978-1979 гг. работы в кратере, включающие геофизические исследования, были проведены сотрудниками МГУ им. М.В. Ломоносова и ГЕОХИ им. В.И. Вернадского [Фельдман и др., 1981; Дабижа, Фельдман, 1982].

С конца 90-х годов XX в. кратер Эльгыгытгын является объектом интенсивных международных исследований, в которых принимали участие ученые из Венского Университета (Австрия), Института Луны и планет, Аляскинского и Мессачусетского университетов (США), Берлинского университета Гумбольдта и Института Альфреда Вегенера в Потсдаме (ФРГ), Брюссельского и Гентского Университетов (Бель-

гия), Северо-Восточного КНИИ РАН (г. Магадан) и некоторых других организаций. Важной вехой в изучении кратера явилось бурение в 2009 г. со льда оз. Эльгыгытгын скв. 5011-1 глубиной 513 м по программе International Continental Scientific Drilling Program, проведенное под руководством проф. Венского университета С. Koeberl [Koeberl et al., 2013]. Итогом исследований керн скважины явилась публикация материалов этих исследований в отдельном выпуске журнала "Meteoritics & Planetary Science", т. 48, № 7 [Meteoritics & Planetary Science, 2013], с вступительным посвящением Е.П. Гурову за его вклад в открытие и изучение этой структуры [Koeberl, 2013].

Несмотря на исчерпывающие доказательства метеоритного происхождения структуры, некоторые ученые из СВ КНИИ РАН продолжают отстаивать представления о вулканогенной или вулканогенно-тектонической природе кратера Эльгыгытгын [Beliy, 1998, 2010].

Остатки палеофлоры были обнаружены при электронномикроскопическом изучении расплавленных импактитов кратера Эльгыгытгын [Gurov et al., 2019]. Это открытие является третьим случаем установления реликтов флоры или ее отпечатков в ударнорасплавленных породах и импактных стеклах на поверхности Земли. Впервые реликты палеофлоры были установлены в 2005 г. в обломках ударнорасплавленных пород и стеккол, образующих семь локальных горизонтов в толще лессовых осадков Аргентинской Пампы [Schultz, Harris, 2005]. Частицы палеофлоры обнаружены в ударнорасплавленных породах трех горизонтов с возрастом  $(9,21 \pm 0,08)$  млн лет,  $(3,27 \pm 0,08)$  млн лет и 445 тыс. лет. Исходные импактные структуры – источники ударнорасплавленных пород – не установлены ни для одного из этих горизонтов [Harris, Schultz, 2007; Shultz et al., 2014]. Почти одновременно отпечатки флоры были описаны в импактных стеклах Dakhleh в Египте, которые предположительно рассматриваются как дальние выбросы еще не обнаруженной импактной структуры [Osinsky et al., 2007]. Открытие растительных остатков в импактитах кратера Эльгыгытгын является третьим случаем установления реликтов флоры или ее отпечатков в ударнорасплавленных породах и импактных стеклах на поверхности Земли, а кратер Эльгыгытгын является первой импактной структурой, в породах которой обнаружена палеофлора [Gurov et al., 2019a].

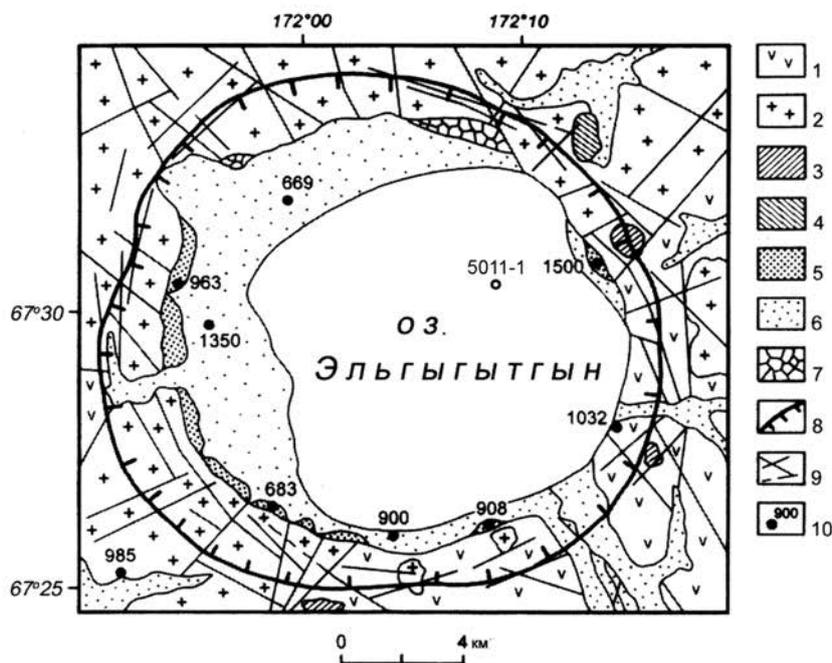
## Геологическое строение кратера Эльгыгытгын

Импактный кратер Эльгыгытгын расположен в центральной гористой части Чукотского полуострова. Кратер представлен округлой блюдцеобразной депрессией, окруженной приподнятым кольцевым валом диаметром по гребню 18 км и высотой до 200 м, представляющим структурное поднятие пород мишени. Дно депрессии диаметром около 14 км занято оз. Эльгыгытгын диаметром 12 км, окруженным комплексом озерных террас высотой до 80 м над уровнем озера (рис. 1) [Гуров, Гурова, 1991; Gurov et al., 2007]. Центральное поднятие диаметром около 2 км установлено по геофизическим данным под водами озера и толщей озерных осадков [Дабижа, Фельдман, 1982; Koeberl et al., 2013]. Уточненный возраст кратера по данным  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  метода составляет  $(3,58 \pm 0,04)$  млн лет [Layer, 2000].

Кратер Эльгыгытгын находится во внешней зоне позднемелового Охотско-Чукотского вулканического пояса, образования которого в этом регионе выделены в пыкарваамскую и коэвунь-

скую свиты [Белый, 1977; Фельдман и др., 1982], абсолютный возраст пород которых составляет от 89,3 до 83,2 млн лет [Layer, 2000]. Кратер образован в моноклинально залегающей толще вулканогенных пород с падением к востоку под углами от  $6^{\circ}$  до  $10^{\circ}$ . Разрез доступной наблюдениям части вулканогенной толщи мощностью около 650 м представлен (сверху вниз): игнимбритами, лавами и туфами риолитов – 450 м, туфами и лавами андезитов – 70 м, туфами риолитов и дацитов – более 100 м [Гуров, Гурова, 1991; Gurov, Koeberl, 2004]. Эти образования, относящиеся к пыкарваамской свите, слагают преобладающую центральную и северо-западную часть мишени кратера, тогда как андезитовые и дацитовые лавы и туфы коэвуньской свиты занимают его меньшую юго-восточную часть.

Ударнорасплавленные и ударнометаморфизованные породы на поверхности современного эрозионного среза кратера распространены в виде обломков и глыб в составе террас оз. Эльгыгытгын. Ударнорасплавленные породы представлены стекловатыми



**Рис. 1.** Схематическая геолого-петрографическая карта кратера Эльгыгытгын (по данным [Гуров, Гурова, 1991; Gurov, Koeberl, 2004] с изменениями). Кружком показано положение скв. 5011-1

1 – лавы и туфы дацитов; 2 – туфы и лавы липаритов; 3 – базальты; 4 – гранодиориты; 5 – отложения высоких террас; 6 – отложения низких террас; 7 – мегабрекчии; 8 – кратерный вал; 9 – разломы; 10 – точки скопления импактных пород и их номера

**Fig. 1.** Schematic geologic-petrographic map of the El'gygytgyn crater (modified after [Гуров, Гурова, 1991; Gurov, Koeberl, 2004]). Location of borehole 5011-1 is indicated by a circle

1 – dacite tuff and lava; 2 – liparite tuff and lava; 3 – basalts; 4 – granodiorites; 5 – high terrace deposits; 6 – low terrace deposits; 7 – megabreccia; 8 – crater rim; 9 – faults; 10 – main locations of impactites in terrace deposits and their numbers

бомбами аэродинамической формы и расплавленными импактитами. Стекловатые бомбы и обломки ударнометаморфизованных пород повсеместно распространены в составе озерных террас, а также образуют скопления в террасах мелких водотоков на внешних склонах вала кратера. Их источником служил покров выбросов зювитов, который в исходном залегании не сохранился [Гуров и др., 1978; Гуров, Гурова, 1991]. В отличие от этих типов пород, расплавленные импактиты образуют локальные скопления обломков и глыб в составе озерных террас внутри кратера, источником которых служили отдельные потоки ударного расплава, застывшего на его внутренних склонах [Гуров, Гурова, 1991; Gurov, Koeberl, 2004]. Подобная форма локализации ударнорасплавленных пород ранее не была известна в земных импактных структурах, но описана в лунных кратерах [Hawke, Head, 1978]. В кратере Эльгыгытгын параметры этих потоков неизвестны. В связи с тем, что размеры глыб ударнорасплавленных пород достигают 1 м, исходная мощность потоков составляла не менее 1 м. Обломки и глыбы импактитов в составе террасовых отложений не окатаны или слабо окатаны, что связано с их транспортировкой вниз по внутренним склонам кратера на короткие расстояния. Все типы импактных пород не подвержены выветриванию и гидротермальным изменениям [Гуров, Гурова, 1991; Gurov, Koeberl, 2004].

В то время как импактные породы в исходном залегании на поверхности не сохранились, распространение зювитов и импактных брекчий в центральной части кратера было установлено при бурении скв. 5011-1 в 2009 г., в которой эти породы были вскрыты под толщей озерных осадков в интервале от 316,8 м до забоя скважины на 517,0 м [Koeberl et al., 2013; Raschke et al., 2013].

#### Материал и методы исследования

Каменный материал для исследований был собран Е.П. Гуровым и Е.П. Гуровой в 1979-1980 гг. Для поисков и изучения растительных остатков были использованы 30 образцов расплавленных импактитов, из которых были изготовлены 80 шлифов для оптической микроскопии и 35 полированных препаратов для электронномикроскопических исследований. В шлифах изучено строение и структура ударнорасплавленных пород, состав микролитов и включений обломочного материала. Особое внимание было уделено исследованию газовых пузырей и поисков

в них остатков флоры. Изучение шлифов позволило отобрать образцы ударнорасплавленных пород и выделить их представительные участки для проведения электронномикроскопических исследований. Остатки палеофлоры установлены в образцах расплавленных импактитов из локальных скоплений в террасовых отложениях восточной, южной, северо-западной и северной частей кратера, которые представляют породы из различных потоков ударного расплава.

Электронномикроскопические исследования включали изучение строения и состава ударнометаморфизованных пород, условия локализации включений растительных остатков, их морфологию и состав. В связи с тем, что флористические остатки в этих породах сохранились внутри газовых пузырей, изучению их строения и условий сохранения в них остатков палеофлоры было уделено особое внимание. Исследования химического состава расплавленных импактитов были направлены на определение состава исходного расплава, захватившего и капсулировавшего остатки флоры. В связи с обилием включений обломков пород и минералов в расплавленных импактитах, состав свободных от включений участков матрицы принимался как состав исходного ударного расплава.

Исследования выполнены на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-6490LV INCA Energy+ со спектрометрической системой, укомплектованной дисперсионным (EDS) и волновым (WDS) спектрометрами. Исследования проведены в фазоконтрастном режиме отраженных электронов (BSEI).

#### Результаты

Расплавленные импактиты, содержащие растительные остатки, представлены породами массивной текстуры от серого до темно-серого и черного цвета (рис. 2, а, в). Матрица сложена блестящим на свежих сколах темно-серым или черным стеклом. Относительное содержание включений обломков пород и минералов непостоянно и составляет от 3-5 до 30-40% от объема пород. Характерной особенностью пород является высокая насыщенность газовыми пузырями, причем содержание пузырей в некоторых разностях импактитов достигает до 25-30%, в отдельных разностях – до 50% от их объема. К поверхности единичных обломков ударнорасплавленных пород в виде коры толщиной от 1 до 6 мм приварен тонкозернистый материал кирпично-крас-

ного цвета (рис. 2, б), который представляет собой рыхлый осадок поверхности субстрата, на который вылился поток ударного расплава. Кроме того, на срезах этого образца в стекле наблюдаются округлые закатанные частицы обожженной глины диаметром около 1 мм.

Особый интерес представляет обломок содержащей флору расплавленной осадочной породы, включенной в расплавленном импактите с восточного берега кратерного озера. Состоящая из стекла тонкозернистая порода на поперечном срезе сохраняет реликты слоистой структуры и содержит не заполненные каналы прямоугольного сечения, являющиеся вероятными трещинами усыхания осадка (рис. 2, г). Химический анализ образца показывает высокое содержание кремнезема, что свидетельствует о том, что исходная порода представляла собой тонкозернистый кварцевый песок или песчаник с глинистым цементом (табл. 1, анализ 5).

Химический состав ударнорасплавленных пород близко соответствует составу вулканогенных пород основания кратера, рассчитанному в соответствии с относительным распространением типов пород в мишени [Гуров, Гурова, 1991; Gurov, Koeberl, 2004; Gurov et al., 2005]. Состав матрицы содержащих палеофлору расплавленных импактитов, соответствующий

составу исходного ударного расплава, приведен в табл. 1.

Расплавные импактиты состоят из пузырчатого бесцветного или светло-коричневого стекла с кристаллитами гиперстена  $En_{(56-64)}Fs_{(33-41)}Wo_{(2-3)}$ , калийсодержащего олигоклаза и включениями обломков ударнометаморфизованных пород и минералов. Обломки минералов представлены диаплектовым кварцем, лешательеритом, полевыми шпатами и редкими зернами рудных и акцессорных минералов. Единичные обломочные зерна циркона содержат новообразования бадделеита и несут следы размягчения перед полным плавлением минерала. Для пород характерно высокое содержание газовых пузырей округлой или неправильной формы, размеры которых колеблются от первых микрометров до 5-8 мм в диаметре. Их форма изменяется от изометрической до неправильной и уплощенной. Внутренняя поверхность пузырей матовая. Участки поверхности часто покрыты кристаллитами полевых шпатов.

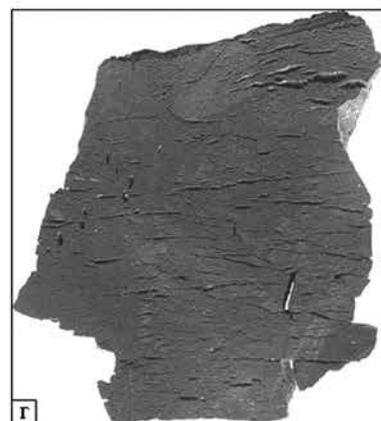
В составе некоторых пузырей наблюдаются отдельные частицы или скопления непрозрачного органического вещества, занимающего часть их внутреннего пространства (рис. 3, а, б). Отдельные пузыри полностью заполнены органическим материалом (рис. 3, г).



**Рис. 2.** Образцы содержащих растительные остатки ударнорасплавленных пород кратера Эльгыгытгын

а) Поверхность среза 9,0x7,8 см пузырчатой породы с включениями обломков минералов (обр. 1554); б) Поверхность того же образца с приваренной корой обожженной глины (светло-серая в верхней части фотографии); в) Поверхность среза ударнорасплавленной породы с включениями обломков пород и минералов площадью 10,0x6,5 см (обр. 918); г) Поверхность среза ударнорасплавленной осадочной породы площадью 5,5x4,2 см. Уплющенные пузыри подчеркивают слоистую структуру породы. Открытые сквозные каналы длиной до 5 см видны в правой нижней части фотографии (обр. 1032-3)

**Fig. 2.** Photographs of samples of impact melt rocks of the El'gygytgyr crater  
а) Cut surface 9,0x7.8 cm of vesicular melt rock with clasts of shocked minerals (sample 1554); б) Surface of the same sample with welded crust of burned sandy clay (light grey in upper part of the photograph); в) Cut surface 10,0x6.5 cm of impact melt rock with clasts of shocked volcanic rocks and minerals (sample E-918); г) Cut surface 5.5x4.2 cm of melted sedimentary rock. Strongly flattened vesicles undergo the layered texture of the rock. Open through channels to 5 cm long are visible in the bottom right corner of the photograph (sample E-1032-3)



**Таблица 1.** Химический состав (мас. %) стекловатой матрицы ударнорасплавленных пород кратера Эльгыгытгын

**Table 1.** Chemical composition (wt. %) of glassy matrix of impact melt rocks from the El'gygytgyn crater

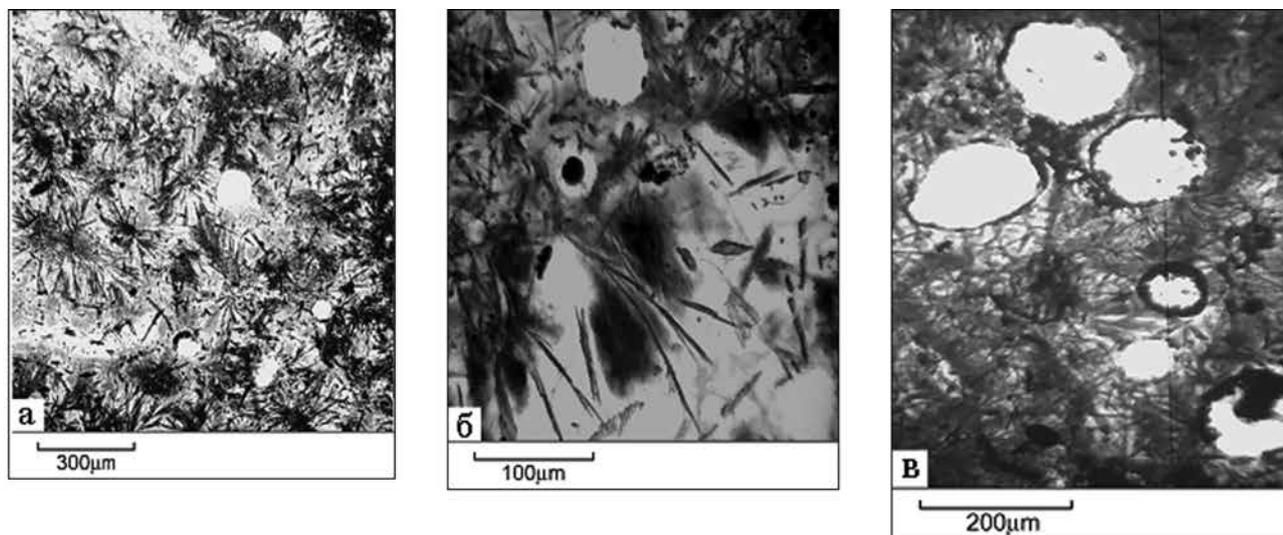
№ анализа	1	2	3	4	5
n	10	12	8	8	8
SiO <sub>2</sub>	63,25	64,20	60,53	65,57	90,23
TiO <sub>2</sub>	0,14	–	–	–	–
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,74	19,84	21,81	21,18	5,80
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	3,83	3,35	4,27	2,50	0,93
MnO	–	–	–	–	–
MgO	1,99	1,36	1,75	–	0,17
CaO	2,11	2,55	4,72	4,16	0,25
Na <sub>2</sub> O	3,24	3,83	3,97	3,47	0,66
K <sub>2</sub> O	5,22	4,81	2,56	2,97	1,16
Сумма	99,52	99,49	99,61	99,85	99,20

\*Общее железо как Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; n – число анализов.

1. Стекловатая матрица с микролитами гиперстена (обр. 918); 2. Стекловатая матрица (обр. 1032-1); 3. Стекловатая матрица (обр. 1554); 4. Стекловатая матрица (обр. 900); 5. Гомогенное стекло ударнорасплавленной осадочной породы (обр. 1032-3).

\*Total Fe as Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; n – number of analyses.

1. Glassy matrix with hypersthene microliths (sample 918); 2. Glassy matrix (sample 1032-1); 3. Glassy matrix (sample 1554); 4. Glassy matrix (sample 900); 5. Homogeneous glass, impact melted sedimentary rock (sample 1032-3).



**Рис. 3.** Микрофотографии шлифов ударнорасплавленных пород кратера Эльгыгытгын

а) Ударнорасплавленная порода с микролитами гиперстена и газовыми пузырями (обр. 900-11, без анализатора); б) Непрозрачное органическое вещество занимает центральную часть пузыря в центре изображения. Стекловатая матрица содержит длиннопризматические микролиты гиперстена и темные участки девитрификации (обр. 1554, без анализатора); в) Пузыри с растительными остатками в расплавленном импактите с микролитами гиперстена. Непрозрачное органическое вещество заполняет некоторые пузыри или сохраняется на их внутренней поверхности (обр. 918, без анализатора)

**Fig. 3.** Microphotographs of impact melt rocks of the El'gygytgyn crater

a) Glassy matrix melt rock with microliths of hypersthene and gas vesicles (sample E-900-11, parallel polars); б) Dark organic matter occupies the central part of vesicle near the centre of image. Glassy matrix contains long-prismatic microliths of hypersthene and dark areas of devitrification (sample E-1554, parallel polars); в) Vesicles with relics of organic matter in impact melt rock with microliths of hypersthene. Opaque organic matter partially fills some vesicles or preserves on their interface (sample 918, parallel polars)

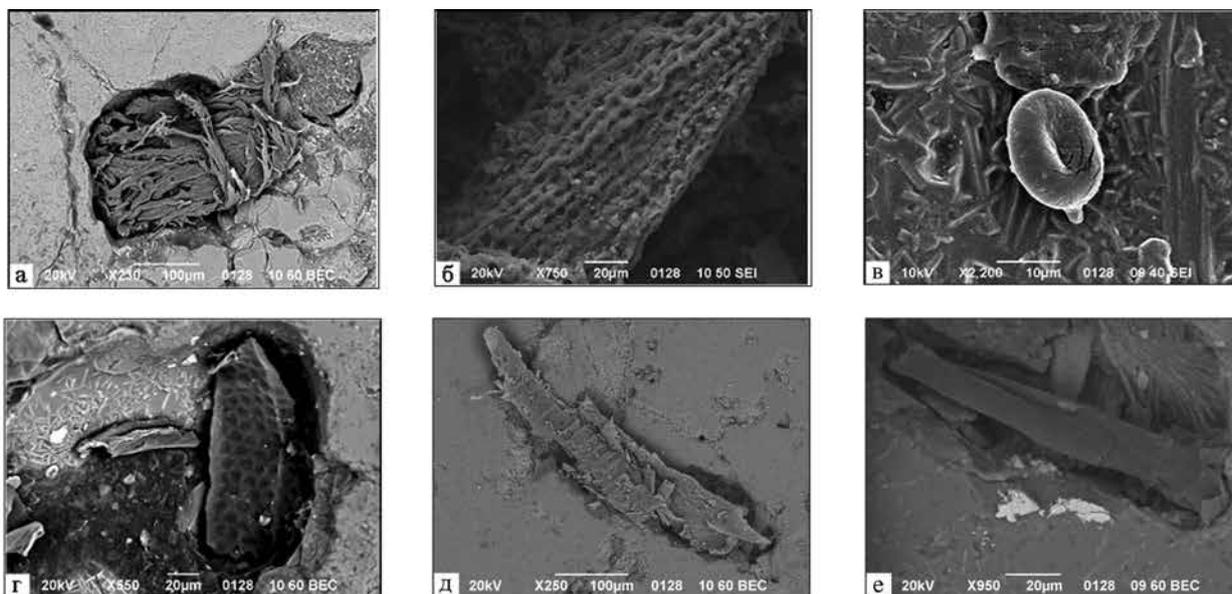
### Растительные остатки в ударнорасплавленных породах

Содержащие флору пузыри наиболее часто имеют округлую или овальную форму. Их размеры колеблются от 5-8 до 200-300 мкм. Преобладающая часть содержащих растительные остатки пузырей имеет гладкую внутреннюю поверхность. Остатки флоры наиболее часто представлены плотными беспорядочно скрученными агрегатами волокон травянистой растительности (рис. 4, а). Размеры подобных «клубков» растительных остатков изменяются от 10-15 до 100-200 мкм, а толщина волокон составляет от 2-4 до 10-15 мкм. В редких случаях остатки флоры представлены фрагментами клеточной ткани (рис. 4, б). В слабо заполненных растительными остатками вакуолях совместно находятся различные фрагменты растительности: изогнутые и трубчатые травянистые частицы и плотные частицы предположительно древесной клеточной ткани (рис. 4, в). Единичные объекты в виде овальных тел с гладкой поверхностью предварительно идентифицированы как вероятные споры плесневых грибов (устное сообщение Д.В. Гладуна) (рис. 4, г). Изредка в

породах наблюдаются частицы с высокой степенью сохранности морфологии исходных растительных объектов (рис. 4, д). На внутренней поверхности содержащей растительную частицу вакуоли были установлены выделения хромферрида  $Fe_7Cr_1$  (рис. 4, е) [Gurov et al., 2019b].

Особый интерес представляют остатки флоры в образце претерпевшей плавление осадочной породы, кратко охарактеризованной выше (рис. 2, в, г; табл. 1, анализ 5). В образце обнаружены растительные объекты сфероидальной и глобулярной формы, каждый из которых заключен в отдельном пузырьке. Диаметры этих глобул составляют от 12-15 до 30 мкм, наиболее крупная глобула имеет размеры 45x55 мкм. Поверхность некоторых глобул гладкая, под действием электронного луча на ней появляется система радиальных микротрещин (рис. 5, а, б). Поверхность отдельных глобул покрыта слабо выступающими пирамидальными выступами (рис. 5, в) или имеет черепитчатое строение (рис. 5, г).

Химический состав растительных остатков приведен в табл. 2 (анализы 1-4). Содержание углерода колеблется в широких пределах – от 30



**Рис. 4.** Микрофотографии в отраженных электронах растительных остатков в ударнорасплавленных породах кратера Эльгыгытгын

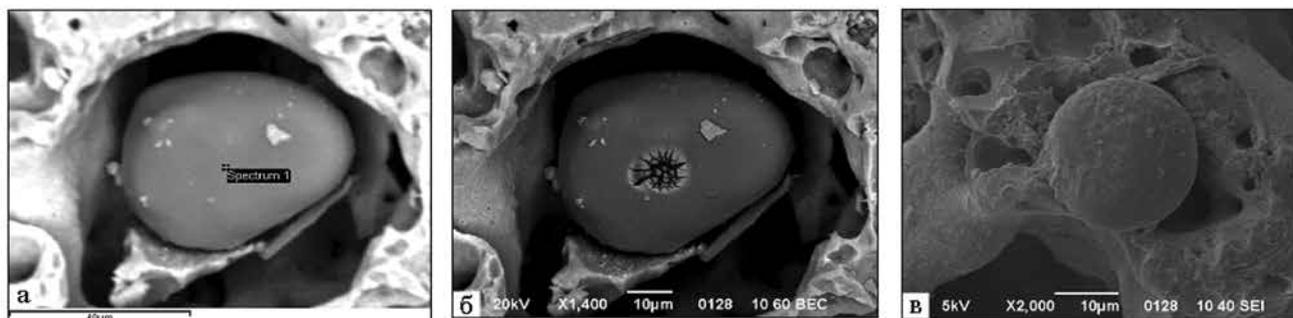
а) Сплетение растительных волокон заполняет пузырь в стекловатой матрице (обр. 918); б) Обрывок клеточной ткани (обр. 918); в) Вероятная спора и растительная частица в пузырьке (обр. 1032-2); г) Растительные частицы в пузырьке. Участок внутренней поверхности пузырька покрыт светлыми кристаллитами полевых шпатов (обр. 1032-2); д) Растительная частица членистого строения в газовом пузырьке (обр. 918); е) Агрегаты зерен хромферрида (светлые на переднем плане) на внутренней поверхности пузырька с растительной частицей (900-12)

**Fig. 4.** BSE images of floral remnants in impact melt rocks of the El'gygytgy crater

a) Plexus of plant fibers fills vesicle in a glassy matrix (sample 918); б) Scrap of cell tissue (sample 918); в) Probable spore and plant particle in vesicle (sample E-1032-2); г) Remains of floral particles in a vesicle. White feldspar crystallites cover parts of interface of a vesicle (sample E-1032-2); д) Segmented floral particle in a gas vesicle (sample 918); e) Aggregations of chromferide (light in the foreground) on the interface of a vesicle containing plant particle (sample 900-12)

до 80 мас. %, наиболее часто 50-65 мас. %, содержание кислорода составляет 25-35 мас. %, достигая 50 мас. %. По относительному содержанию этих элементов состав растительных частиц близок к составу лигнита. Элементы-примеси представлены силицием, алюминием и

кальцием. Химический состав глобул (табл. 2, анализы 5-8) характеризуется присутствием хлора в большей части проанализированных частиц. Согласно данным [Дембицкий, Толстикова, 2003], хлор является важным элементом в составе растительности.

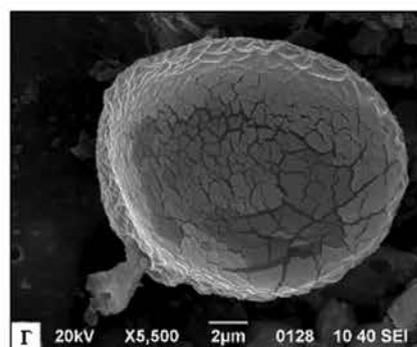


**Рис. 5.** Электронные микрофотографии глобулярных растительных частиц из ударнорасплавленной осадочной породы (обр. 1032-3)

а) Глобулярная частица яйцеобразной формы с гладкой поверхностью; б) Та же частица со следами воздействия электронного пучка; в) Глобула сферической формы с пирамидальными выступами на поверхности; г) Глобула овальной формы со следами воздействия электронного пучка. Трещиноватая поверхность внутренней зоны образовалась под внешней оболочкой черепитчатого строения, сохранившейся на боковой поверхности глобулы

**Fig. 5.** BSE images of globular floral particles in melted sedimentary rock (sample E-1032-3)

а) Egg-shaped globule with smooth surface; б) The same globule with the trace of impact by electron beam; в) Spherical globule with the surface covered with a mild pyramidal protrusions; г) Oval spheroid with traces of impact by electron beam. The cracked inner surface of globule appeared under a scaly external zone that was preserved at its edges



**Таблица 2.** Состав растительных частиц из ударнорасплавленных пород кратера Эльгыгытгын (данные микрозондового анализа)

**Table 2.** Composition of floral particles from impact melt rocks from the El'gygytgyyn crater (electron microprobe data)

№ анализа	1	2	3	4	5	6	7	8
C	51,64	55,96	62,49	72,11	44,63	52,71	63,59	81,45
O	46,47	37,28	36,03	27,82	50,99	39,74	26,65	14,80
Si	0,71	4,50	0,82	0,04	1,22	1,41	1,93	1,39
Al	0,63	1,31	0,31	0,03	0,73	1,01	–	0,28
Fe	–	–	–	–	1,13	1,37	–	–
Ca	–	0,95	0,35	–	–	–	–	–
Na	–	–	–	–	–	0,61	0,91	0,84
K	–	–	–	–	0,55	0,93	1,50	–
Cl	–	–	–	–	0,75	2,22	5,42	1,24
Сумма	99,45	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

1. Клеточная ткань (обр. 918-3-5); 2. Частица листа (обр. 1032-2-6); 3. Частица таблитчатой формы (обр. 1032-2-2); 4. Растительная частица (обр. 1032-3-14); 5-8. Частицы глобулярной формы: 5. Обр. 1032-3-13, 6. Обр. 1032-3-11, 7. Обр. 1032-3-7, 8. Обр. 1032-3-1.

1. Cellular tissue (sample 918-3-5); 2. Leaf particle (sample 1023-6); 3. Particle of tabular form (sample 1032-2-2); 4. Floral particle (sample 1032-14). 5-8 – globular particles: 5. Sample 1032-3-13, 6. Sample 1032-3-11, 7. Sample 1032-3-7, 8. Sample 1032-3-1.

### Обсуждение и выводы

Кратер Эльгыгытгын находится в центральной части Чукотского полуострова. Молодой возраст кратера определяет хорошую сохранность структуры в виде окруженной приподнятым валом блюдцеобразной депрессии [Гуров и др., 1978; Gurov et al., 2007]. Кратер образован в толще эффузивных пород Охотско-Чукотского вулканического пояса, представляя единственную импактную структуру на поверхности Земли с мишенью, сложенной вулканогенными породами кислого состава [Gurov et al., 1979; Гуров, Гурова, 1991].

Покров выбросов зювитов и брекчий полностью эродирован. На современной эрозионной поверхности расплавные импактиты и ударнометаморфизованные породы сохранились в переотложенном виде в террасовых отложениях кратерного озера.

Расплавные импактиты, содержащие растительные остатки, распространены в виде локальных скоплений глыб и обломков в террасах кратерного озера, где они представляют продукты разрушения отдельных потоков ударного расплава, застывших на внутренних склонах кратера. Расплавные импактиты сложены пузырьчатыми породами со стекловатой матрицей, содержащими многочисленные включения обломков пород и минералов.

Импактные расплавы кратера Эльгыгытгын, захватившие растительные остатки, характеризовались высокими температурами. Присутствие в их составе лешательерита, кварца с шариковыми (ballen) структурами и пластически деформированного циркона с микровключениями бадделейта позволяют оценить температуры ударного расплава выше 1700 °–1900 °C [El Goresy, 1964; Wittmann et al., 2006].

Остатки ископаемой флоры установлены в ударнорасплавленных породах из террасовых отложений, окружающих кратерное озеро. Остатки флоры сохранились в газовых пузырях в стекловатой матрице пород. Они представлены плотными сплетениями растительных волокон, фрагментами клеточной ткани и некоторыми другими образованиями. Хорошая сохранность растительных остатков в высокотемпературном ударном расплаве кратера Эльгыгытгын полностью согласуется с экспериментальными исследованиями Р.Н. Schultz и его соавторов [Schultz et al., 2014], установившими высокую степень сохранности морфоло-

гии и состава растительных остатков в силикатных расплавах при температурах выше 1500 °C.

Пузырчатые структуры ударнорасплавленных пород с остатками флоры свидетельствуют о предполагаемом выпадении масс ударного расплава на заболоченные участки субстрата с преобладающей травянистой растительностью. Образование газовых пузырей с растительными остатками происходило в результате мгновенного испарения воды из попавших в расплав растительных частиц с образованием окружающих их вакуолей. Важно отметить, что захват и капсулирование остатков флоры в ударнорасплавленных породах из Аргентинской Пампы также предположительно произошло при выпадении ударного расплава на болота [Schultz, Harris, 2005; Schultz et al., 2014], а захват органического вещества импактными стеклами Тасмании произошел благодаря образованию вероятного кратера Дарвин на территории, покрытой влажной лесной растительностью и болотами [Howard, 2008; Howard et al., 2013].

Сохранность морфологии и состава растительных остатков в расплавных импактатах и стеклах из Аргентинской Пампы позволила Р.Н. Schultz и его соавторам [Harris, Schultz, 2007; Shultz et al., 2014] предложить новую стратегию поисков следов возможной ранней жизни на Марсе в ударнорасплавленных породах на его поверхности. Мощные толщи осадков, отложенные из воздушной среды, охватывают обширные районы поверхности Марса, что позволяет сравнивать их с лессовыми отложениями Аргентинской Пампы со следами периодической метеоритной бомбардировки в виде горизонтов, содержащих обломки ударнорасплавленных пород [Schultz et al., 2014].

Особенную актуальность эти представления приобрели в результате исследования органического вещества в метеоритах марсианского происхождения: ALH84001 из Антарктиды и шерготтита Тиссинт (Tissint) падения 2007 г. в Марокко.

При детальном изучении марсианского метеорита ALH84001 в его составе было обнаружено присутствие сложных органических веществ и карбонатных глобулей предположительно биогенного происхождения [MacKay et al., 1996].

Метеорит Тиссинт до падения на земную поверхность испытал два разновозрастных

ударных события. Описанные в его составе сферические и пластинчатые частицы органического вещества с высоким содержанием углерода и примесью хлора являются возможными биомаркерами [Wallis et al., 2014]. Необходимо отметить, что хлор является важным элементом в составе земной растительности [Дембицкий, Толстиков, 2003], в связи с чем присутствие хлора в марсианской органике может служить дополнительным доводом в пользу ее биогенного, возможно, растительного происхождения.

Второй тип органики в метеорите Тиссинт представлен скоплениями керогеноподобного органического вещества в прожилках ударно-расплавленной породы. Изотопный состав углерода этих скоплений позволяет предполагать его биогенное происхождение [Lin et al., 2014]. Изучение органического вещества в марсианских метеоритах ALH84001 и Тиссинт служит поддержкой представлений о возможной сохранности следов древней жизни в ударно-расплавленных породах на поверхности Марса и их доставке метеоритами на Землю [Shultz et al., 2014].

Установление растительных остатков в импактитах кратера Эльгыгытгын является третьим случаем обнаружения реликтов флоры в расплавленных импактитах на поверхности Земли

после открытия растительных остатков в обломках ударнорасплавленных пород в Аргентине [Schultz, Harris, 2005; Schultz et al., 2014] и описания *отпечатков* флоры в стеклах Dakhleh в Египте [Osinski et al., 2007]. В обоих этих случаях до настоящего времени не известны импактные структуры – источники ударнорасплавленных пород, и не исследованы условия образования ударных расплавов с сохранившимися реликтами флоры. Таким образом, кратер Эльгыгытгын является первой достоверной импактной структурой на поверхности Земли, в которой установлены реликты палеофлоры [Gurov et al., 2019a]. Хорошая сохранность кратера определяет исключительные условия для всестороннего изучения процессов образования ударного расплава, а также условий захвата и сохранения в нем растительных остатков. Сохранность палеофлоры в ударнорасплавленных породах кратера Эльгыгытгын подтверждает роль импактных процессов в консервации и продолжительном сохранении следов древней жизни на поверхности Земли и планет.

Условия сохранения реликтов палеофлоры в ударнорасплавленных породах кратера Эльгыгытгын свидетельствуют о широких перспективах поисков и обнаружения следов древней жизни в породах земных импактных структур.

## Список литературы

**Белый В.Ф.** Схема тектоники и вулканизм южной части Чаун-Чукотки. *Геол. сб. Львов. геол. об-ва.* 1958. № 5/6. С. 93-97.

**Белый В.Ф.** Стратиграфия и строение Охотско-Чукотского вулканического пояса. Москва: Наука, 1977. 170 с.

**Гуров Е.П., Вальтер А.А., Гурова Е.П., Серебренников А.И.** Взрывной метеоритный кратер Эльгыгытгын на Чукотке. *Докл. АН СССР.* 1978. Т. 240, № 6. С. 1407–1410.

**Гуров Е.П., Гожик П.Ф.** Импактное кратерообразование в истории Земли. Киев, 2006. 216 с.

**Гуров Е.П., Гурова Е.П.** Стадии ударного метаморфизма вулканогенных пород кислого состава (на примере метеоритного кратера Эльгыгытгын, Чукотка). *Докл. АН СССР.* 1979. Т. 249, № 5. С. 1197-1201.

**Гуров Е.П., Гурова Е.П.** Геологическое строение и вещественный состав пород импактных структур. Киев: Наук. думка, 1991. 160 с.

**Дабижка А.И., Фельдман В.Т.** Геофизическая характеристика некоторых астроблем СССР. *Метеоритика.* 1982. Вып. 40. С. 91-101.

**Дембицкий В.М., Толстиков Г.А.** Природные галогенированные органические соединения. Новосибирск: Изд-во Сиб. отд-ния РАН, отд-ние «Гео», 2003. 366 с. ISBN 5-7692-0633-0.

**Зоткин И.Т., Цветков В.И.** Поиски метеоритных кратеров на Земле. *Астроном. вестн.* 1970. № 4. С. 55-65.

**Некрасов И.А., Раудонис П.А.** Метеоритные кратеры. *Природа.* 1963. № 1. С. 102-104.

**Обручев С.В.** По горам и тундрам Чукотки. Москва: Географгиз, 1957. 198 с.

**Фельдман В.И., Грановский Л.Б., Капусткина И.Г., Каротеева Н.Н., Сазонова Л.В., Дабижка А.И.** Метеоритный кратер Эльгыгытгын. *Импактиты:* Маракушев А.А. (ред.). Москва: Изд-во МГУ, 1981. С. 70-92.

- Belyi V.F.** Impactogenesis and volcanism of the El'gygytyn depression. *Journal of Petrology*. 1998. Vol. 6. P. 86-99.
- Belyi V.F.** Impactite generation in the El'gygytyn depression, Northeast Russia, as a volcanic phenomenon. 2. On the petrography and geochemistry of the impactites. *Journal of Volcanology and Seismology*. 2010. No 4. P. 149-163.
- Dietz R.S.** Elgygytyn crater, Siberia: probable source of Australasian tektite field (and besiadites from Popigai). *Meteoritics*. 1977. Vol. 12, No 2. P. 145-157.
- Dietz R.S., McHone J.F.** El'gygytyn: probable world largest meteorite crater. *Geology*. 1976. Vol. 4. P. 391-392.
- El Goresy A.** The opaque minerals in impact glasses. *Shock metamorphism of natural materials*. Short N.M., French B.M. (Eds.). Baltimore, Maryland: Mono Book Corp., 1968. P. 531-553.
- Gurov E.P., Koeberl C.** Shocked rocks and impact glasses from the El'gygytyn impact structure, Russia. *Meteoritics & Planetary Science*. 2004. Vol. 39. P. 1495-1508.
- Gurov E.P., Koeberl C., Reimold W.U., Brandstatter F., Amare K.** Shock metamorphism of siliceous volcanic rocks of the El'gygytyn impact crater (Chukotka, Russia). In: *Large meteorite impacts III*. Kenkmann T., Hörz F., Deutsch A. (Eds.). *Geological Society of America Special Paper 348*. 2005. P. 391-412.
- Gurov E.P., Koeberl C., Yamnichenko A.** El'gygytyn impact crater, Russia: Structure, tectonics, and Morphology. *Meteoritics & Planetary Science*. 2007. Vol. 42. P. 307-319.
- Gurov E.P., Permiarov V.V., Koeberl C.** Remnants of paleoflora in impact melt rocks of the El'gygytyn crater (Chukotka, Russia). *Meteoritics & Planetary Science*. 2019a. Doi: 10.1111/maps.13241.
- Gurov E.P., Permiakov V.V., Koeberl C.** Chromiferite found in impact melt rocks of the El'gygytyn crater, Chukotka, Russia. *50th Lunar and Planetary Science Conference (abstracts)*. 2019b. No 2132.
- Gurov E.P., Valter A.A., Gurova E.P., Kotlovskaya F.I.** El'gygytyn impact crater, Chukotka: shock metamorphism of volcanic rocks. *10th Lunar and Planetary Science Conference (abstracts)*. 1979. P. 479-481.
- Harris R.S., Schultz P.H.** Impact amber, popcorn, and pathology: The biology of impact melt breccias and implications for astrobiology. *38th Lunar and Planetary Science Conference (abstracts)*. 2007. No 2306.
- Hawke B.R., Head J.W.** Impact melt on lunar craters rims. *Impact and Explosion cratering*. Roddy D.J., Pepin R.O., Merrill R.B. (Eds.). New York: Pergamon Press, 1977. P. 815-841.
- Howard K.T.** Geochemistry of Darwin glass and target rocks from Darwin crater, Tasmania, Australia. *Meteoritics & Planetary Science*. 2008. Vol. 43. P. 473-496.
- Howard K.T., Bailey M.J., Berhanu D., Bland P.A., Cressley G., Howard L.E., Jeynes C., Matthewman R., Mortins Z., Shepton M.A., Stolojan V., Verchovsky S.** Biomass preservation in impact melt ejecta. *Nature Geoscience*. 2013. Vol. 6. P. 1018-1022.
- Koeberl C.** Dedication. The special issue on the El'gygytyn impact structure is dedicated to Evgeny (Eugene) Petrovich Gurov. *Meteoritics & Planetary Science*. 2013. Vol. 48. P. 1107.
- Koeberl C., Pittarello L., Reimold W.U., Raschke U., Brigham-Grette J., Melles M., Minyuk M.** El'gygytyn impact crater, Chukotka, Arctic Russia: Impact cratering aspects of the 2009 ICDP drilling project. *Meteoritics & Planetary Science*. 2013. Vol. 48. P. 1108-1129.
- Layer P.V.** <sup>40</sup>Argon/<sup>39</sup>Argon-age of the El'gygytyn event, Chukotka, Russia. *Meteoritics & Planetary Science*. 2000. Vol. 35. P. 591-599.
- Lin Y., El Goresi A., Hu S., Zhang J., Gillet P., Xu Y., Hao J., Miyahara M., Ouyang Z., Ohtani E., Xu L., Yang W., Feng L.** NanoSIMS analysis of organic carbon from the Tissint Martian meteorite: Evidence for the past existence of subsurface organic-bearing fluids on Mars. *Meteoritics & Planetary Science*. 2014. Vol. 49. P. 2201-2218.
- MacKay D.S., Gibson E.K. Jr., Thomas-Keptel K.L., Vali H., Romanel C.S., Clemett S.J., Chiller X.D., Malcheling C.R., Zare R.N.** Search for past life on Mars: possible relic biogenic activity in martian meteorite ALH84001. *Science*. 1996, Aug. 16: 273 (5277). P. 924-930.
- Meteoritics and Planetary Science*. 2013. Vol. 48. P. 1107-1358.
- Osinski G.R., Schwarcz H.P., Smith J.R., Kleindienst M.R., Hennemann M.A., Churcher C.S.** Evidence for a ~200-100 ka meteorite impact in the Western Desert of Egypt. *Earth and Planetary Science Letters*. 2007. Vol. 253. P. 378-388.
- Raschke U., Reimold W.U., Zaag P.T., Pittarello L., Koeberl C.** Lithostratigraphy of the impactite and bedrock of ICDP drill core D1c from the El'gygytyn impact crater, Russia. *Meteoritics & Planetary Science*. 2013. Vol. 48. P. 1143-1159.

**Schultz P.H., Harris R.S.** Impact amber: Plant materials captured in impact-generated glasses. *8th NASA Exobiology PI Symposium Program with Abstracts*. 2005. 94.

**Schultz P.H., Harris R.S., Clemett S.J., Thomas-Keptra K.L., Zárate M.** Preserved flora and organics in impact melt breccias. *Geology*. 2014. Vol. 42. P. 515–518.

**Wallis J., Wallis D.H., Wallis M.K., + Wickramasinghe C.** Molecular carbon as a biomarker in the meteorite Tissint. *EPSC2014 session TP4.1*. Portugal, September 2014.

**Wittmann A., Kenkmann T., Schmitt R.T., Stofler D.** Shock-metamorphosed zircon in terrestrial craters. *Meteoritics & Planetary Science*. 2006. Vol. 41. P. 433-454.

## References

**Belyi V.F.** (1958). Scheme of tectonics and volcanism of the southern part of Chaun-Chukotka. *Geologicheskiiy sbornik Lvovskogo geologicheskogo obshchestva*, No 5/6, p. 93-97 (in Russian).

**Belyi V.F.** (1977). Stratigraphy and structures of the Okhotsk-Chukotka volcanic belt. Moscow: Nauka Press, 170 p. (in Russian).

**Belyi V.F.** (1998). Impactogenesis and volcanism of the El'gygytyn depression. *Journal of Petrology*, vol. 6, p. 86–89 (in English).

**Belyi V.F.** (2010). Impactite generation in the El'gygytyn depression, Northeast Russia, as a volcanic phenomenon. 2. On the petrography and geochemistry of the impactites. *Journal of Volcanology & Seismology*, No 4, p. 149-163 (in English).

**Dabizha A.I., Feldman V.I.** (1982). Geophysical characteristics of some astroblemes of USSR. *Meteoritica*, vol. 40, p. 91-101 (in Russian).

**Dembitsky V.M., Tolstikov G.A.** (2003). Natural halogenated organic compounds. Novosibirsk: Publishing House of Siberian Branch RAS, branch "Geo", 366 p. ISBN 5-7692-0633-0 (in Russian).

**Dietz R.S.** (1977). Elgygytyn crater, Siberia: probable source of Australasian tektite field (and beudanticites from Popigai). *Meteoritics*, vol. 12, No 2, p. 145-157 (in English).

**Dietz R.S., McHone J.F.** (1976). El'gygytyn: probable world largest meteorite crater. *Geology*, vol. 4, p. 391–392 (in English).

**El Goresy A.** (1968). The opaque minerals in impact glasses. In: *Shock metamorphism of natural materials*. Short N.M., French B. M. (Eds.). Baltimore, Maryland: Mono Book Corp., p. 531-553 (in English).

**Feldman V.I., Granovsky L.B., Kapustkina I.G., Karoteeva N.N., Dabizha A.I.** (1981). Meteorite crater El'gygytyn. In: *Impactites*. Marakhushev A.A. (Ed.). Moscow: Moscow State University Press, p. 70-92 (in Russian).

**Gurov E.P., Gozhik P.F.** (2006). Impact cratering in the history of the Earth. Kiev: Publication of Institute of Geological Science, National Academy of Sciences of Ukraine, 216 p. (in Russian).

**Gurov E.P., Gurova E.P.** (1979). Stages of shock metamorphism of volcanic rocks of siliceous composition on example of the El'gygytyn crater (Chukotka). *Doklady Akademii Nauk USSR*, vol. 249, p. 1197-1201 (in Russian).

**Gurov E.P., Gurova E.P.** (1991). Geological structure and rock composition of impact structures. Kiev: Naukova Dumka, 160 p. (in Russian).

**Gurov E.P., Koeberl C.** (2004). Shocked rocks and impact glasses from the El'gygytyn impact structure, Russia. *Meteoritics & Planetary Science*, vol. 39, p. 1495-1508 (in English).

**Gurov E.P., Koeberl C., Reimold W.U., Brandstatter F., Amare K.** (2005). Shock metamorphism of siliceous volcanic rocks of the El'gygytyn impact crater (Chukotka, Russia). In: *Large meteorite impacts III*. Kenkmann T., Hörz F., Deutsch A. (Eds.). *Geological Society of America Special Paper*, vol. 348, p. 391-412 (in English).

**Gurov E.P., Koeberl C., Yamnichenko A.** (2007). El'gygytyn impact crater, Russia: Structure, tectonics, and Morphology. *Meteoritics & Planetary Science*, vol. 42, p. 307-319 (in English).

**Gurov E.P., Permiarov V.V., Koeberl C.** (2019a). Remnants of paleoflora in impact melt rocks of the El'gygytyn crater (Chukotka, Russia). *Meteoritics & Planetary Science*. doi: 10.1111/maps.13241 (in English).

**Gurov E.P., Permiakov V.V., Koeberl C.** (2019b). Chromferide found in impact melt rocks of the El'gygytyn crater, Chukotka, Russia. *50th Lunar and Planetary Science Conference (abstracts)*, No 2132 (in English).

**Gurov E.P., Valter A.A., Gurova E.P., Kotlovskaya F.I.** (1979). El'gygytyn impact crater, Chukotka: shock metamorphism of volcanic rocks. *10th Lunar and Planetary Science Conference (abstracts)*, p. 479–481 (in English).

**Gurov E.P., Valter A.A., Gurova E.P., Serebrennikov A.I.** (1978). Impact meteorite crater El'gygytyn in Chukotka. *Doklady Akademii Nauk USSR*, vol. 240, p. 1407-1410 (in Russian).

- Harris R.S., Schultz P.H.** (2007). Impact amber, popcorn, and pathology: The biology of impact melt breccias and implications for astrobiology. *38th Lunar and Planetary Science Conference (abstracts)*, No 2306 (in English).
- Hawke B.R., Head J.W.** (1977). Impact melt on lunar craters rims. In: *Impact and Explosion cratering*. Roddy D.J., Pepin R.O., Merrill R.B. (Eds.). New York: Pergamon Press, p. 815-841 (in English).
- Howard K.T.** (2008). Geochemistry of Darwin glass and target rocks from Darwin crater, Tasmania, Australia. *Meteoritics & Planetary Science*, vol. 43, p. 473–496 (in English).
- Howard K.T., Bailey M.J., Berhanu D., Bland P.A., Cressy G., Howard L.E., Jeynes C., Matthewman R., Mortins Z., Shepton M.A., Stolojan V., Verchovsky S.** (2013). Biomass preservation in impact melt ejecta. *Nature Geoscience*, vol. 6, p. 1018-1022 (in English).
- Koeberl C.** (2013). The special issue on the El'gygytyn impact structure is dedicated to Evgeny (Eugene) Gurov. *Meteoritics & Planetary Science*, vol. 48, p. 1107 (in English).
- Koeberl C., Pittarello L., Reimold W.U., Raschke U., Brigham-Grette J., Melles M., Minyuk M.** (2013). El'gygytyn impact crater, Chukotka, Arctic Russia: Impact cratering aspects of the 2009 ICDP drilling project. *Meteoritics & Planetary Science*, vol. 48, p. 1108-1129 (in English).
- Layer P.V.** (2000). 40Argon/39Argon-age of the El'gygytyn event, Chukotka, Russia. *Meteoritics & Planetary Science*, vol. 35, p. 591-599 (in English).
- Lin Y., El Goresi A., Hu S., Zhang J., Gillet P., Xu Y., Hao J., Miyahara M., Ouyang Z., Ohtani E., Xu L., Yang W., Feng L.** (2014). NanoSIMS analysis of organic carbon from the Tissint Martian meteorite: Evidence for the past existence of subsurface organic-bearing fluids on Mars. *Meteoritics & Planetary Science*, vol. 49, p. 2201-2218 (in English).
- MacKay D.S., Gibson E.K. Jr., Thomas-Kepra K.L., Vali H., Romanel C.S., Clemett S.J., Chiller X.D., Malcheling C.R., Zare R.N.** (1996). Search for past life on Mars: possible relic biogenic activity in martian meteorite ALH84001. *Science*, Ang. 16: 273 (5277), p. 924-930 (in English).
- Meteoritics and Planetary Science** (2013), vol. 48, No 7, p. 1107-1358 (in English).
- Nekrasov I.A., Raudonis P.A.** (1963). Meteorite craters. *Priroda*, No 1, p. 102-104 (in Russian).
- Obruchev S.V.** (1957). Across the tundra and mountains of Chukotka. Moscow: State Press of Geography, 198 p. (in Russian).
- Osinski G.R., Schwarcz H.P., Smith J.R., Kleindienst M.R., Hendemann M.A., Churcher C.S.** (2007). Evidence for a ~200–100 ka meteorite impact in the Western Desert of Egypt. *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 253, p. 378–388 (in English).
- Raschke U., Reimold W.U., Zaag P.T., Pittarello L., Koeberl C.** (2013). Lithostratigraphy of the impactite and bedrock of ICDP drill core D1c from the El'gygytyn impact crater, Russia. *Meteoritics & Planetary Science*, vol. 48, p. 1143-1159 (in English).
- Schultz P.H., Harris R.S.** (2005). Impact amber: Plant materials captured in impact-generated glasses. *8th NASA Exobiology PI Symposium Program with Abstracts*, 94 (in English).
- Schultz P.H., Harris R.S., Clemett S.J., Thomas-Kepra K.L., Zarate M.** (2014). Preserved flora and organics in impact melt breccias. *Geology*, vol. 42, p. 515–518 (in English).
- Wallis J., Wallis D.H., Wallis M.K., + Wickramasinghe C.** (2014). Molecular carbon as a biomarker in the meteorite Tissint. *EPSC2014 session TP4.1*. Portugal, September 2014 (in English).
- Wittmann A., Kenkmann T., Schmitt R.T., Stofler D.** (2006). Shock-metamorphosed zircon in terrestrial craters. *Meteoritics & Planetary Science*, vol. 41, p. 433-454 (in English).
- Zotkin I.T., Tsvetkov V.I.** (1970). Search of meteorite craters on the Earth. *Astronomicheskii Vestnik*, vol. 4, p. 55-65 (in Russian).

Статья поступила  
18.03.2019