

Петрофизические свойства пород и кольцевая морфология вероятной импактной структуры Ярва-Варака (Мончегорский рудный район Кольского региона)

В. Л. Ильченко*, Т. В. Каулина, Л. И. Нерович

*Геологический институт КНЦ РАН г. Апатиты, Мурманская обл., Россия;
e-mail: v.ilchenko@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2086-4722>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
27.01.2026;

получена
после доработки
13.02.2026;

принята
к публикации
16.02.2026

Ключевые слова:

ударный метаморфизм,
петрофизика,
упругая анизотропия,
астроблемы,
Мончегорский район

Изучена морфология и физические свойства (плотность, скорости продольных волн, упругая анизотропия) образцов горных пород, отобранных с поверхности на участке Ярва-Варака в границах предполагаемой астроблемы. Анализ морфологии позволяет определить структуру Ярва-Варака как многокольцевую структуру эллипсовидной формы с максимальным диаметром около 10 км. Кольцевая топография, хотя и не отражает первичную морфологию кратера, связана с избирательной эрозией, обусловленной концентрическим наклоном пластов пород в результате метеоритного удара. Наибольшие вариации физических свойств гнейсов и гранитоидов отмечаются между 2 и 3 кольцом структуры. В большинстве случаев отмечается прямая корреляция между плотностью, скоростью продольных волн и анизотропией. Установлены заметные площадные вариации петрофизических свойств гранитоидов и гнейсов, представляющих собой породы мишени. Наиболее информативным оказался показатель упругой анизотропии. Внутри кольцевой структуры гранитоиды и гнейсы обладают повышенной анизотропией, тогда как за пределами кольца они часто имеют низкую и среднюю степень анизотропии. Изучение петрофизических свойств астроблемы Ярва-Варака (возраст 2,5 млрд лет) дает полезную информацию, которую в дальнейшем можно будет использовать в процессе исследования древних метеоритных кратеров.

Для цитирования

Ильченко В. Л. и др. Петрофизические свойства пород и кольцевая морфология вероятной импактной структуры Ярва-Варака (Мончегорский рудный район Кольского региона). Вестник МГТУ. 2026. Т. 29, № 1. С. 5–15. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-1-5-15>.

Petrophysical properties of rocks and ring morphology of the probable impact Yarva-Varaka structure (Monchegorsk ore area of the Kola Region)

Vadim L. Ilchenko*, Tatiana V. Kaulina, Lyudmila I. Nerovich

*Geological Institute KSC RAS, Apatity, Murmansk region, Russia;
e-mail: v.ilchenko@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2086-4722>

Article info

Received
27.01.2026;

received
in revised form
13.02.2026;

accepted
16.02.2026

Key words:

shock metamorphism,
petrophysics,
elastic anisotropy,
astroblesmes,
Monchegorsk area

Abstract

The morphology and physical properties (density, longitudinal wave velocities, and elastic anisotropy) of rock samples collected from the surface of the Järva-Varaka site within the boundaries of the proposed astrobleme have been studied. Morphological analysis allows us to define the Järva-Varaka structure as a multi-ring elliptical structure with a maximum diameter of approximately 10 km. The ring topography, although not reflecting the primary crater morphology, is associated with selective erosion caused by the concentric tilting of rock strata as a result of the meteorite impact. The largest variations in the physical properties of gneisses and granitoids are observed between the 2nd and 3rd rings of the structure. In most cases, a direct correlation is observed between density, longitudinal wave velocity, and anisotropy. Significant areal variations in the petrophysical properties of granitoids and gneisses, which represent the target rocks, have been established. Elastic anisotropy proved to be the most informative parameter. Within the ring structure, granitoids and gneisses exhibit increased anisotropy, while outside the ring, they often exhibit low to moderate anisotropy. Studying the petrophysical properties of the 2.5 Ga Jarva-Varaka astrobleme provides useful information that can be used in future searches and studies of ancient meteorite craters.

For citation

Ilchenko, V. L. et al. 2026. Petrophysical properties of rocks and ring morphology of the probable impact Yarva-Varaka structure (Monchegorsk ore area of the Kola Region). *Vestnik of MSTU*, 29(1), pp. 5–15. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-1-5-15>.

Введение

Метеоритные бомбардировки в ранней истории Земли без сомнения вносили существенный вклад в формирование земной коры (*Macañtuc и др., 1980; Melosh, 1989*). К настоящему времени на Земле достоверно установлено 194 астроблемы (в том числе 21 на территории России)¹. Только пять из них палеопротерозойского возраста: Вредефорт (2023 ± 4 млн лет – *Gibson et al., 1997*) в Южной Африке; Садбери (1850 ± 3 млн лет – *Davis, 2008*) в Канаде; Яррабубба (2229 ± 5 млн лет – *McDonald et al., 2003; Erickson et al., 2020*) в Австралии; Дхала ($2,44\text{--}2,24$ млрд лет – *Li et al., 2018*) в Индии и Суавьярви ($\sim 2,4$ млрд лет – *Mashchak et al., 2012*) в Карелии. Кроме того, существуют предположения об импактном происхождении ряда кольцевых структур раннего докембрия, например Маниитсок в западной Гренландии (*Garde et al., 2012*), а также находки импактных сферул в верхнеархейских комплексах Южной Африки и Австралии (*Byerly et al., 2002; Lowe et al., 2014*).

По статистическим расчетам, учитывающим размеры кратеров и скорость эрозии, на Земле осталось еще не менее 90 неоткрытых кратеров, размером от 1 до 6 км и более 250 кратеров размером до 1 км (*Hergarten et al., 2015*). К сожалению, все это относится к кратерам не древнее палеозойского возраста. Обнаружение и подтверждение ранних земных импактных структур является серьезной проблемой, поскольку их следы могут быть стерты в результате последующих процессов метаморфизма, тектоники и эрозии (*French et al., 2010; Hergarten et al., 2015; Kenkmann, 2021*).

Метеоритные кратеры обычно связаны с различными геофизическими аномалиями (*French et al., 2010; Glikson et al., 2013*), при этом природа аномалий не всегда очевидна. Часть аномалий обусловлена структурными или тектоническими преобразованиями пород, часть связана с постударными гидротермальными процессами (*Pesonen, 2011; Mayr et al., 2008*). Гравитационные и магнитные аномалии также могут зависеть от петрографического состава пород. Изучение петрофизических свойств пород (плотности, пористости, упругой анизотропии и т. п.) на известных астроблемах дает важную информацию для интерпретации геофизических аномалий в целом (*Mayr et al., 2008* и ссылки там), а также может быть использовано при поиске и исследовании древних метеоритных кратеров (*French et al., 2010*).

Структура Ярва-Варака расположена на севере Мончегорского рудного района Кольского региона. Под структурой мы понимаем одноименный расслоенный массив и породы обрамления (рис. 1). Массив Ярва-Варака сложен гранофировыми гиперстеновыми диоритами, кварцевыми диоритами и гранофировыми норитами (*Nerovich et al., 2023*). Вмещающими породами являются гнейсы кольского метаморфического комплекса с многочисленными пластовыми телами гранитоидов (рис. 1). Внедрение интрузии Ярва-Варака происходило синхронно с завершением становления Мончеплутона. Считалось, что состав ее пород, судя по значительному обогащению кремнеземом, может быть обусловлен процессами контаминации основных расплавов вмещающими гнейсами (*Смолякин и др., 2004*). Однако небольшие размеры массива ($1,7 \times 2,2 \times 2$ км) вызывали сомнение в его способности расплавить достаточный объем вмещающих пород для образования 20 % гранофира (*Нерович и др., 2015; Nerovich et al., 2023*). Более того, геолого-геохимическое изучение пород массива показало его сходство с породами магматического комплекса импактной структуры Садбери (*Grieve, 1994; Naldrett, 2004*), и начиная с 2015 г. для массива Ярва-Варака предполагается импактное происхождение (*Нерович и др., 2015; Nerovich et al., 2023*). Проведенное термодинамическое моделирование процессов кристаллизации подтвердило, что без участия метеоритного удара, создавшего коровый расплав, в массиве Ярва-Варака могло образоваться только 3 % гранофира, а не наблюдаемые 20 % (*Каулина и др., 2025*).

За время изучения структуры Ярва-Варака в гранитоидах обрамления были обнаружены следующие признаки ударного метаморфизма: псевдотахилитовая брекчия, полосы смятия в биотите и клиноцизите, планарные структуры в кварце, диаплектовые стекла циркона, плагиоклаза и силлиманита, микроструктурные деформации в монаците (*Kaulina et al., 2021; Nerovich et al., 2023; Kaulina et al., 2023*).

Возраст пород массива составляет 2496 ± 9 млрд лет (U-Pb ID-TIMS по циркону и бадделеиту из кварцевых диоритов – *Смолякин и др., 2004*) и 2498 ± 6 млн лет (U-Pb SHRIMP-II по тем же минералам из пижонит-авгитовых диоритов – *Kaulina et al., 2021*). Возраст ударного метаморфизма, определенного по необластам (перекристаллизованным доменам) в деформированных кристаллах монацита составляет $2,55\text{--}2,52$ млрд лет, что подтверждает наше предположение, что массив Ярва-Варака образовался одновременно с метеоритным ударом (*Kaulina et al., 2023*). Возраст вмещающих глиноземистых гнейсов – $2,83$ млрд лет (*Смолякин и др., 2004*), субпластовых тел биотитовых гранитов – $2,7$ млрд лет (*Kaulina et al., 2023*).

Согласно (*Объяснительная записка..., 2007*) массив Ярва-Варака находится внутри кольцевого разлома; выделяются и более мелкие кольцевые структуры, хорошо различимые на аэрофотоснимках (рис. 1).

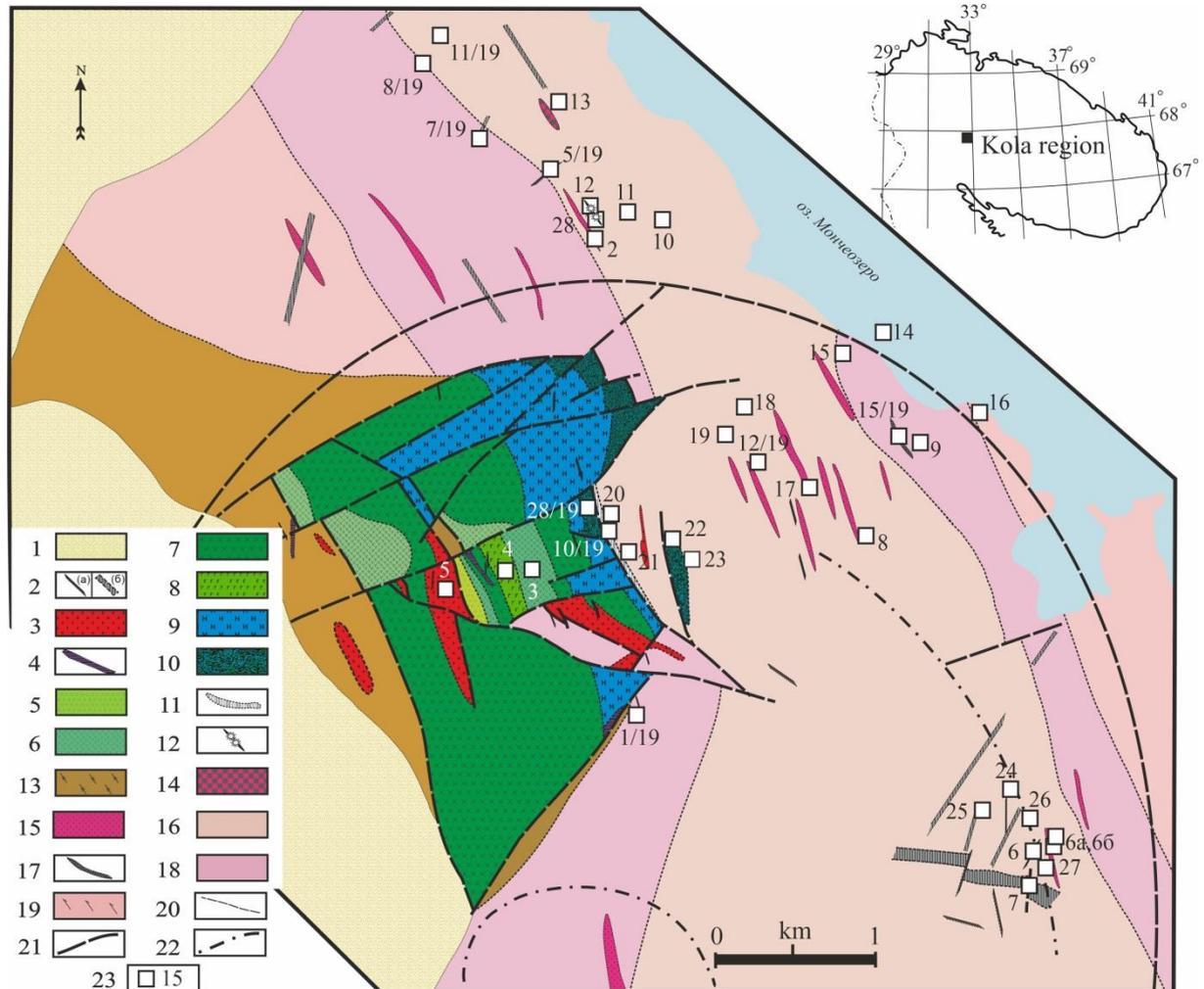
Данная работа посвящена изучению петрофизических свойств пород структуры Ярва-Варака, отобранных на разном расстоянии от предполагаемого центра кольцевой структуры (рис. 2), поскольку

¹ Earth Impact Database. 2024. URL: <http://www.unb.ca/passc/ImpactDatabase/index.html>.

признаки ударного воздействия могут отражаться в пространственных вариациях плотности и упругой анизотропии пород (Pesonen, 2011; Mayr et al., 2008).

Материалы и методы

В процессе полевых работ на структуре Ярва-Варака было установлено, что выходы коренных пород, благоприятные для регулярного (прямыми профилями с равным шагом) отбора образцов, встречаются здесь довольно редко. Поэтому образцы отбирались везде, где для этого были условия (рис. 1, 2).



1 – четвертичные отложения; 2–11 – Палеопротерозой: 2 – дайки долеритов; 3 – микроклиновые граниты, неравномерно гнейсовидные и катаклазированные; 4–10 – породы массива Ярва-Варака: 4 – дайки пироксен-плагиоклазовых порфиритов; 5 – гранофировые гранодиориты; 6 – гранофировые кварцевые диориты; 7 – гранофировые гиперстеновые диориты; 8 – гранофировые пижонит-авгитовые диориты; 9 – гранофировые нориты; 10 – диориты зоны контакта; 11 – зона брекчирования гранито-гнейсового состава; 12 – псевдотахилитовая брекчия; 13–19 – Архей: 13 – эпидот-биотитовые, биотит-амфиболовые диорито-гнейсы; 14 – пегматоидные лейкоплагиограниты; 15 – биотитовые граниты субпластовых тел, неравномерно гнейсовидные; 16–19 – архейские образования кольского метаморфического комплекса: 16 – силлиманит-биотитовые, силлиманит-гранат-биотитовые гнейсы с кианитом и ставролитом; 17 – амфибол-магнетитовые кварциты; 18 – биотитовые, гранат-биотитовые с силлиманитом и без, амфибол-биотитовые, эпидот-биотитовые гнейсы, амфиболиты и амфибол-магнетитовые кварциты; 19 – биотитовые гнейсы с подчиненными амфибол-биотитовыми гнейсами с редкими телами амфиболитов; 20 – границы распространения пород; 21 – разрывные нарушения; 22 – кольцевые структуры по аэрофотоснимкам; 23 – точки отбора образцов.

Рис. 1. Геологическая карта-схема участка Ярва-Варака (Nerovich et al., 2023 с упрощениями) с точками отбора образцов
Fig. 1. Geological map-scheme of the Järva-Varaka structure (Nerovich et al., 2023 with simplifications) with sampling points

Было отобрано 38 образцов из пород массива Ярва-Варака и вмещающих гранитоидов, для которых определены плотность, скорости распространения продольных волн и индекс упругой анизотропии (рис. 1, 2, таблица). Методика петрофизических измерений подробно описана в работе (Ильченко и др., 2022). Петрография пород изучена в шлифах и аншлифах.

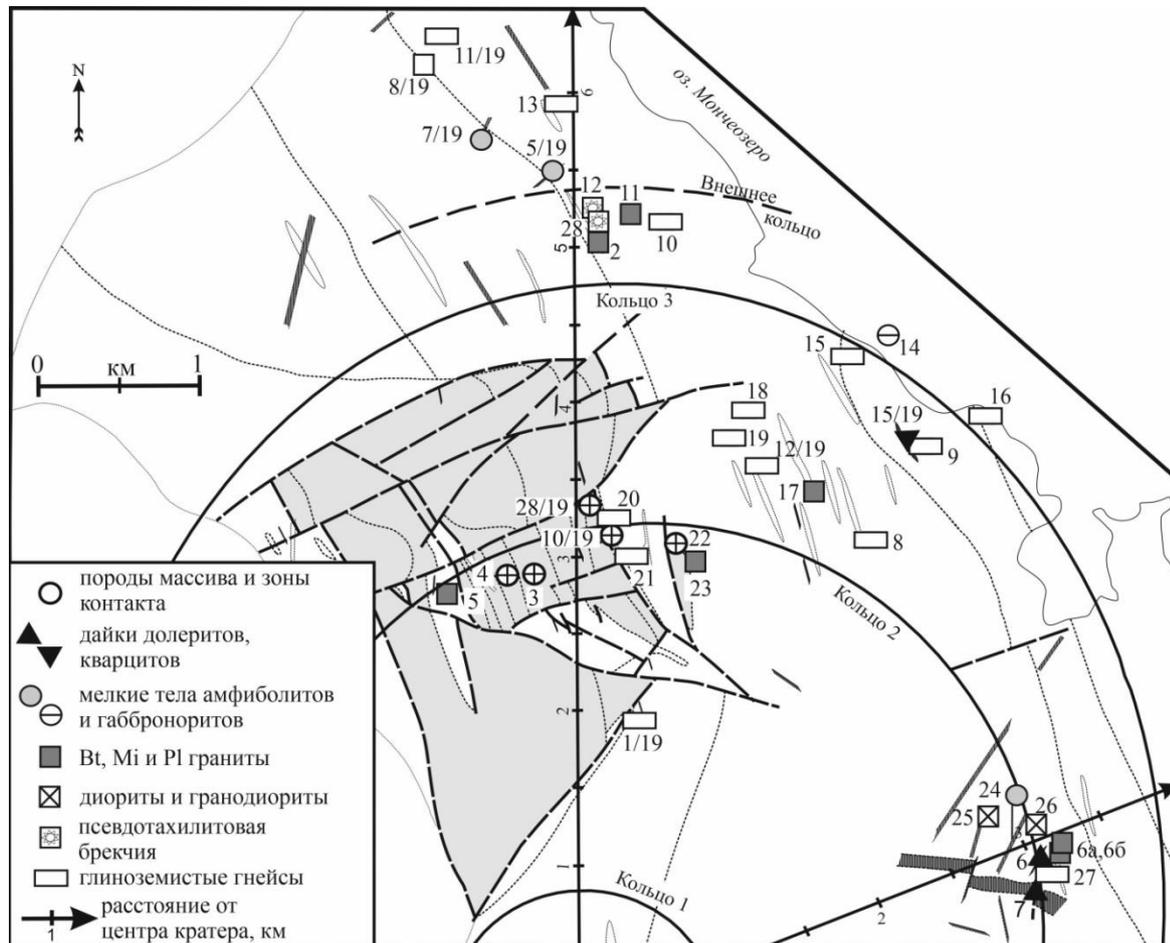


Рис. 2. Схема кольцевой структуры Ярва-Варака с точками отбора образцов из разных типов пород на разном расстоянии от предполагаемого центра структуры
 Fig. 2. The scheme of the Jarva-Varaka ring structure with sampling points for different rock types at different distances from the presumed crater centre

Таблица. Физические свойства образцов пород структуры Ярва-Варака
 Table. Physical properties of rock samples from the Jarva-Varaka structure

Номер образца	Горная порода	Плотность ρ , г/см ³	Скорость продольных волн в трех направлениях (км/с): V_1, V_2, V_3	Средняя скорость $V_{ср}$, км/с	Показатель A , %
Породы массива и зоны контакта					
3	Диорит	2,87	3,84; 4,01; 3,96	3,94	3,13
4	Гранодиорит	2,76	4,00; 3,85; 3,88	3,91	2,87
10/19	Милонит с линзами силлиманит-сланцев	2,91	4,47; 4,63; 4,69	4,60	3,50
22	Гибридная порода	2,93	3,58; 3,82; 3,62	3,67	4,96
28/19	Гибридная порода	2,77	4,66; 4,57; 4,65	4,63	1,51
Дайки долеритов, кварцитов, мелкие тела амфиболитов и габброноритов					
6	Габбро-долерит мелкозернистый (дайка)	3,09	3,55; 4,07; 3,82	3,81	9,65
7	Долерит средне-мелкозернистый (дайка)	3,11	3,90; 4,22; 3,96	4,03	5,97
5/19	Эпидотовый амфиболит средне-мелкозернистый (дайка)	3,03	4,84; 4,84; 4,64	4,77	3,43

7/19	Эпидотовый/эпидотсодержащий амфиболит мелкозернистый (дайка)	2,98	4,20; 4,05; 4,05	4,10	2,99
14	Габбронорит средне-крупнозернистый	2,94	4,68; 4,36; 4,82	4,62	7,22
15/19	Амфибол-магнетитовый кварцит (дайка)	2,99	4,69; 4,46; 4,88	4,68	6,35
24	Амфиболит, среднезернистый	2,85	3,61; 3,50; 3,50	3,54	2,54
Псевдотахилитовая брекчия					
12	Псевдотахилитовая брекчия	2,87	3,80; 3,56; 3,63	3,66	4,77
28	Псевдотахилитовая брекчия	2,70	3,38; 3,34; 3,51	3,41	3,69
Субпластовые тела гранитоидов					
2	Биотитовый гранит (участками гнейсовидный), мелкозернистый	2,77	3,98; 3,75; 4,05	3,93	5,65
5	Микроклиновый гранит	2,65	3,80; 3,88; 3,96	3,88	2,92
6а	Биотитовый гранит (участками гнейсовидный), мелкозернистый	2,77	4,09; 3,79; 3,49	3,79	11,2
6б	Биотитовый аляскит пегматоидный	2,62	3,65; 3,65; 3,40	3,57	5,72
8/19	Лейкократовый гранит	2,67	4,67; 4,79; 4,51	4,66	4,26
11	Лейкоплагиогранит пегматоидный	2,66	4,02; 3,65; 3,53	3,73	9,68
17	Биотитовый гранит (участками гнейсовидный), мелко-среднезернистый	2,73	4,02; 3,88; 4,15	4,02	4,75
23	Биотитовый гранит (участками гнейсовидный), средне-мелкозернистый	2,69	4,18; 4,44; 3,78	4,13	11,4
25	Диорит биотит-амфиболовый (местами гнейсовидный), мелко-среднезернистый	2,83	4,07; 3,87; 4,20	4,05	5,81
26	Гранодиорит мусковит-биотитовый (местами гнейсовидный), с/з	2,78	3,72; 4,24; 4,02	3,93	9,80
Гнейсы					
1/19	Биотитовый гнейс мезократовый мелкозернистый	2,70	4,20; 3,88; 3,65	3,91	9,99
8	Биотитовый гнейс мигматизированный, мелкозернистый	2,71	3,66; 3,76; 3,63	3,68	2,62
9	Эпидот-биотитовый гнейс, мелкозернистый	2,72	3,66; 3,51; 3,45	3,54	4,32
10	Биотитовый гнейс мигматизированный, мелкозернистый	2,62	3,28; 3,32; 3,57	3,39	6,56
11/19	Биотитовый гнейс, мелкозернистый	2,68	4,30; 4,68; 4,48	4,49	5,99
12/19	Силлиманит-биотитовый гнейс средне-мелкозернистый	2,69	4,04; 4,47; 3,98	4,16	9,09
13	Биотитовый гнейс, мелкозернистый	2,75	3,90; 3,90; 4,01	3,94	2,28
15	Биотитовый гнейс, средне-мелкозернистый	2,74	4,30; 3,86; 3,71	3,96	11,0
16	Биотитовый гнейс мигматизированный, мелкозернистый	2,70	4,62; 3,78; 3,34	3,91	23,52
18	Биотитовый гнейс, мелко-среднезернистый	2,87	3,91; 4,00; 4,12	4,01	3,72
19	Биотитовый гнейс мигматизированный, мелкозернистый	2,71	4,63; 4,27; 4,00	4,30	10,4
20	Биотитовый гнейс мигматизированный, м-с/з из зоны брекчирования	2,77	4,24; 3,76; 3,70	3,90	10,7
21	Биотитовый гнейс, мелкозернистый	2,68	4,40; 4,29; 4,18	4,29	3,63
27	Гранат-биотитовый гнейс, мелкозернистый	2,66	3,84; 4,06; 3,83	3,91	4,70

Результаты и обсуждение

По кольцевому разлому и двум внутренним кольцам, построенным по аэрофотоснимкам (рис. 1), можно реконструировать кольцевую структуру эллипсоидной формы с максимальным диаметром кольца около 7,8 км (рис. 2 – кольцо 3), центр структуры расположен чуть ниже южного края схемы. Расположение точек отбора проб показывает, что среднее внутреннее кольцо (кольцо 2) представляет собой поднятие и является, вероятно, результатом избирательной эрозии. Для древних кратеров кольцевая топография не всегда совпадает с первозданной морфологией кратера, но тем не менее избирательная эрозия связана именно с концентрическим наклоном пластов пород в результате метеоритного удара (*Kenkmann, 2021*). Импактные породы, заполняющие кратер, должны были быть удалены эрозией за период существования кратера (*Kenkmann, 2021*), поэтому и признаки шокового метаморфизма в структуре Ярва-Варака обнаружены, в основном, в минералах (*Kaulina et al., 2021; 2023; Nerovich et al., 2023*). Учитывая, что псевдотахилитовая брекчия и микроструктуры деформации в монаците обнаружены на расстоянии 5,5 км от центра кольцевой

структуры (рис. 2 – образцы 2, 12, 28), скорее всего, реальный ее диаметр составляет около 10 км (внешнее кольцо на рис. 2).

Результаты измерения физических свойств пород представлены в таблице и на рис. 3.

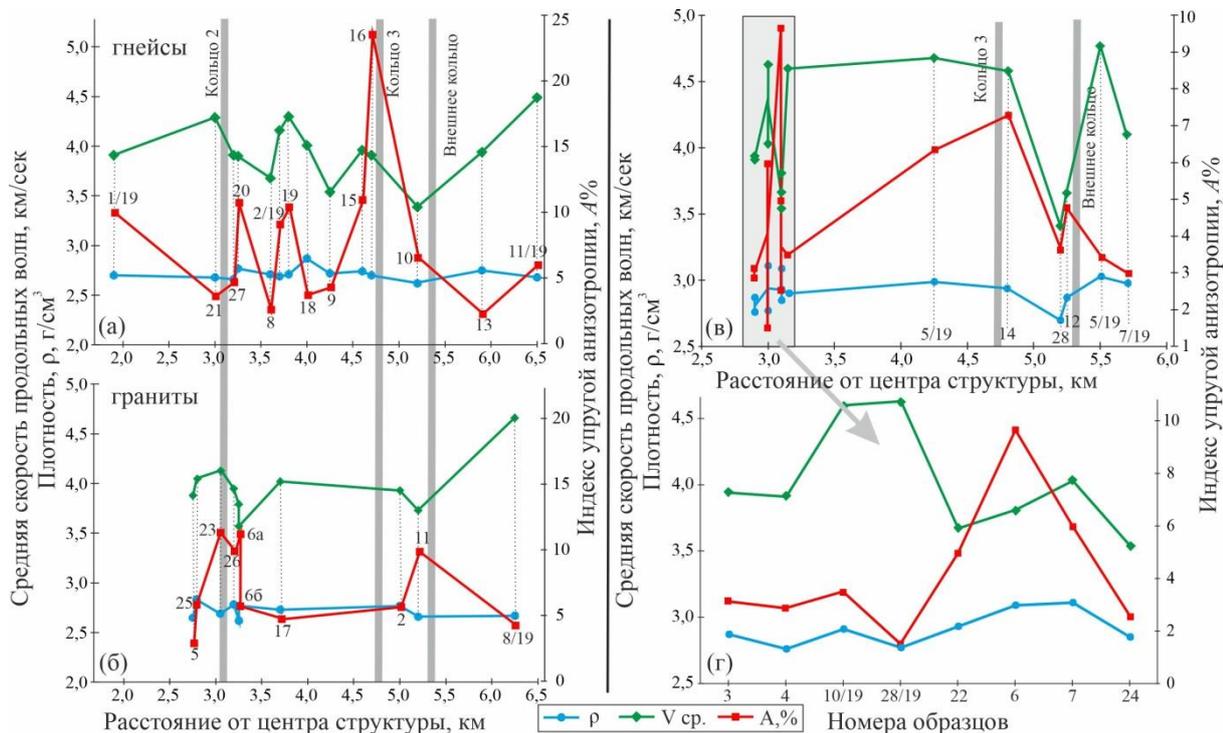


Рис. 3. Физические свойства пород структуры Ярва-Варака, отобранных на разном расстоянии от предполагаемого центра структуры: *a* – гнейсы; *б* – граниты; *в, г* – породы основного состава

Fig. 3. Physical properties of the Jarva-Varaka structure rocks sampled at different distances from the supposed center of the structure: *a* – gneisses; *б* – granites; *в, г* – basic rocks

Основной интерес представляют физические свойства вмещающих гнейсов и гранитоидов, поскольку именно они являлись породами мишени, которые подверглись ударному метаморфизму. Вариации их физических свойств могут в той или иной степени отражать наложенный шоковый метаморфизм, хотя и имевший место 2500 млн лет назад. Изучение физических свойств пород из 17 импактных структур (*Pesonen, 2011*) показали четкие тенденции изменения плотности пород и скорости упругих волн: 1) плотность увеличивается от зювитов к брекчиям, псевдотахилитам, трещиноватым породам мишени (гнейсам) и далее к нетрещиноватым породам мишени; 2) скорость ультразвуковых волн в основном определяется пористостью пород с отрицательной корреляцией. При этом плотность пород по-разному коррелирует с пористостью, т. е. и со скоростью упругих волн. Существенный вклад вносит структура и текстура пород, трещиноватость, минеральный состав и распределение зерен по размерам (*Mayr et al., 2008* и ссылки там).

Плотность гнейсов варьирует от 2,62 до 2,87 г/см³ (табл.). Наибольшие вариации плотности отмечаются между кольцами 2 и 3 (рис. 3, *a*). Здесь же наблюдаются наибольшие вариации в скорости продольных волн и упругой анизотропии. В большинстве случаев отмечается прямая корреляция между плотностью, скоростью продольных волн и анизотропией. За пределами внешнего кольца параметры меняются произвольно. Перед кольцом 2 скорость продольных волн и анизотропия находятся в противофазе и не зависят от плотности пород. Наибольшие значения упругой анизотропии 10,7; 10,4 и 23,5 % получены для образцов 20, 19 и 16, соответственно, представленных мигматизированными разновидностями гнейсов. Мигматизация обычно понижает анизотропию пород в связи с залечиванием трещин (*Ильченко и др., 2022*). В данном случае мигматизация, которая произошла 2,7 млрд лет назад, т. е. до метеоритного удара, вероятно, сыграла обратную роль, приведя к неоднородности образцов с их дроблением и повышением анизотропии под влиянием ударного метаморфизма.

Плотность гранитоидов варьирует от 2,62 до 2,83 г/см³, наиболее высокую плотность имеют гранодиоритовые разновидности (табл.). Упругая анизотропия пород ниже, чем у гнейсов, и не выходит за пределы 10 %. Повышения анизотропии встречаются в образцах около колец 2 и 3. Скорость продольных волн практически у всех образцов меняется пропорционально плотности. Упругая анизотропия обратно пропорциональна скорости в пределах всей структуры (рис. 3, *б*).

Породы массива, вероятно, образовались вместе с метеоритным ударом, который создал необходимый объем разогретого/расплавленного корового материала. Внедрение основного расплава, ассимилировавшего расплавленные вмещающие гранитоиды (породы мишени) создало гранофировые породы массива Ярва-Варака. Дайки долеритов и мелкие интрузии основных пород образовались позднее этого события. В эту же группу мы отнесли пробы псевдотахилитов как образовавшихся при плавлении пород мишени. Плотность этой группы пород выше, чем у гнейсов и гранитоидов, и составляет 2,76–3,11 г/см³ (табл.). Практически во всех образцах скорость упругих волн коррелирует с плотностью пород и упругой анизотропией (рис 3, в, з). В целом, кроме двух образцов, анизотропия пород низкая – до 6 %.

По площади структуры плотность гнейсов и гранитоидов меняется произвольно, независимо от нахождения пород в пределах или за пределами колец (рис. 4, а). Характерного увеличения плотности по мере удаления от центра кратера, как это описано для других импактных структур (Mayr et al., 2008; Pesonen, 2011), где плотность пород мишени возрастает к периферии с менее сильным шоквым метаморфизмом, в нашем случае не наблюдается. Вероятно, это связано как с разнообразием состава гнейсов и гранитоидов, так и с древним возрастом импактной структуры, где следы ударного метаморфизма слабо сохранились.

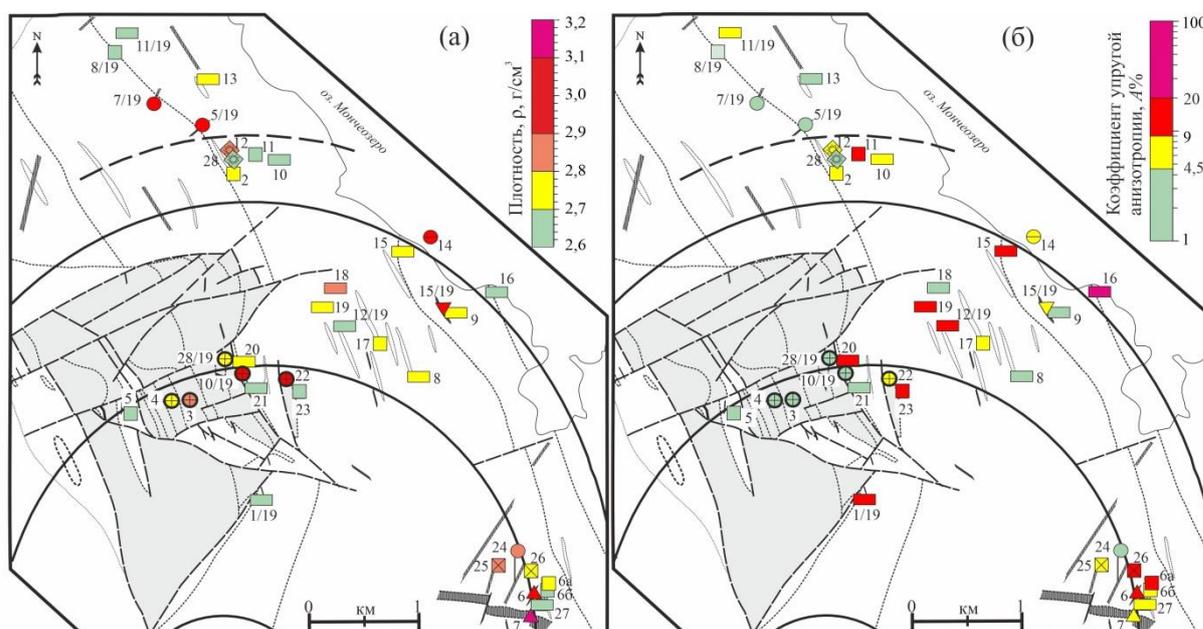


Рис. 4. Вариации физических свойств пород структуры Ярва-Варака по площади:
а – плотность пород; б – индекс упругой анизотропии

Fig. 4. Aerial variations in the physical properties of the Jarva-Varaka structure rocks:
а – rock density; б – elastic anisotropy index

Величина упругой анизотропии более информативна. В целом в пределах кольцевой структуры (рис. 4, б) гнейсы и гранитоиды обрамления сильноанизотропны ($A = 9–24\%$) в отличие от пород массива ($<4,5\%$), которые не были подвержены ударному метаморфизму. Тем не менее несколько образцов гнейсов слабоанизотропны (8, 9, 18, 21), что может быть связано с их мелкозернистой структурой и большей гомогенностью. За пределами кольца (северный край карты) породы демонстрируют низкую и среднюю степень анизотропии ($<9\%$ – рис. 4, б).

В целом же, петрофизические исследования структуры Ярва-Варака осложняются плохой обнаженностью района и неоднородностью гнейсов и гранитоидов, которые подвергались ударному метаморфизму, что затрудняет сравнение свойств пород по площади. Рассмотренные данные по гнейсам и гранитам позволяют сказать, что физические свойства гнейсов в большей степени отражают морфологию структуры Ярва-Варака.

Заключение

Структура Ярва-Варака представляет собой многокольцевую импактную структуру размером около 10 км. Современная кольцевая морфология, вероятнее всего, является результатом избирательной эрозии в результате изменения физических свойств пород при импактном метаморфизме. Современное положение колец не совпадает с первичными границами кратера, но повторяет первичную конфигурацию и является отражением именно метеоритного удара. Сравнение данных по гнейсам и гранитам позволяют сказать, что физические свойства гнейсов в большей степени отражают морфологию структуры Ярва-Варака.

Вариации физических свойств гнейсов и гранитоидов, являющихся породами мишени, могут в той или иной степени отражать наложенный шоковый метаморфизм, хотя и имевший место 2500 млн лет назад. Наибольшие вариации физических свойств гнейсов и гранитоидов отмечаются между 2-м и 3-м кольцами структуры. В большинстве случаев отмечается прямая корреляция между плотностью, скоростью и анизотропией.

Наибольшие значения упругой анизотропии 11–23 % получены для мигматизированных разновидностей гнейсов. Мигматизация обычно понижает анизотропию пород в связи с залечиванием трещин. В данном случае мигматизация, вероятно, привела к неоднородности образцов и повышению анизотропии в результате ударного метаморфизма.

В целом, в пределах кольцевой структуры гнейсы и гранитоиды в большинстве своем демонстрируют высокую степень анизотропии (в отличие от пород массива и базитовых даек, которые не были подвержены ударному метаморфизму). За пределами внешнего кольца породы слабоанизотропны.

Изучение петрофизических свойств астроблемы Ярва-Варака, возраст которой 2,5 млрд лет, дает полезную информацию, которую в дальнейшем можно будет использовать в процессе исследования древних метеоритных кратеров.

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы НИР ГИ КНЦ РАН FMEZ-2024-0006 "Геология, геохимия и тектоника докембрийских комплексов Кольского региона как основа металлогенического прогноза северо-запада арктической зоны Российской Федерации".

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Ильченко В. Л., Афанасьева Е. Н., Каулина Т. В., Лялина Л. И. [и др.]. Лицевское рудопроявление урана (Арктическая зона Фенноскандинавского щита): новые результаты петрофизических и геохимических исследований // Записки Горного института. 2022. Т. 255. С. 393–404. DOI: <https://doi.org/10.31897/rmi.2022.44>. EDN: GXUGYU.
- Каулина Т. В., Анисимов Р. Л., Кунаккузин Е. Л., Балтыбаев Ш. К. [и др.]. Механизм образования гранофировых пород массива Ярва-Варака (Мончегорский рудный район, Кольский полуостров): Sm-Nd и Rb-Sr системы и термодинамическое моделирование // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2025. № 22. С. 331–339. DOI: <https://doi.org/10.31241/fns.2025.22.045>. EDN: QJWPLP.
- Масайтис В. Л., Данилин А. Н., Машак М. С., Райхлин А. И. [и др.]. Геология астроблем. Л. : Недра, 1980. 231 с.
- Нерович Л. И., Баянова Т. Б., Кунаккузин Е. Л., Базай А. В. [и др.]. Новые результаты геолого-петрографического и геохимического изучения расслоенного массива Ярва-Варака, Мончегорский рудный район // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2015. № 12. С. 141–146. EDN: WWMPBH.
- Объяснительная записка к Геологической карте Мурманской области. Масштаб 1:200000. Лист Q-36-III, IV / ред. Ремизова А. М. Апатиты, 2007. 121 с.
- Смолькин В. Ф., Федотов Ж. А., Нерадовский Ю. Н., Баянова Т. Б. [и др.]. Расслоенные интрузии Мончегорского рудного района: петрология, оруденение, изотопия, глубинное строение. Апатиты : Изд-во КНЦ РАН, 2004. 177 с.
- Byerly G. R., Lowe D. R., Wooden J. L., Xie X. An Archaean impact layer from the Pilbara and Kaapvaal cratons // *Science*. 2002. Vol. 297. P. 1325–1327. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1073934>.
- Davis D. W. Sub-million-year age resolution of Precambrian igneous events by thermal extraction–thermal ionization mass spectrometer Pb dating of zircon: Application to crystallization of the Sudbury impact melt sheet // *Geology*. 2008. Vol. 36, Iss. 5. P. 383–386. DOI: <https://doi.org/10.1130/g24502a.1>.
- Erickson T. M., Kirkland C. L., Timms N. E., Cavosie A. J. [et al.]. Precise radiometric age establishes Yarrabubba, Western Australia, as Earth's oldest recognized meteorite impact structure // *Nature Communications*. 2020. Vol. 11. Article number: 300. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13985-7>.
- French B. M., Koeberl C. The convincing identification of terrestrial meteorite impact structures: What works, what doesn't, and why // *Earth-Science Reviews*. 2010. Vol. 98, Iss. 1–2. P. 123–170. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.10.009>.
- Garde A. A., McDonald I., Dyck B., Keulen N. Searching for giant, ancient impact structures on Earth: The Mesoarchaean Maniitsoq structure, West Greenland // *Earth and Planetary Science Letters*. 2012. Vol. 337–338. P. 197–210. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.04.026>.

- Gibson R. L., Armstrong R. A., Reimold W. U. The age and thermal evolution of the Vredefort impact structure: A single-grain U-Pb zircon study // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1997. Vol. 61, Iss. 7. P. 1531–1540. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(97\)00013-6](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(97)00013-6).
- Glikson A. Y., Uysal I. T., FitzGerald J. D., Saygin E. Geophysical anomalies and quartz microstructures, Eastern Warburton Basin, North-east South Australia: Tectonic or impact shock metamorphic origin? // *Tectonophysics*. 2013. Vol. 589. P. 57–76. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.12.036>.
- Grieve R. A. F. An impact model for the Sudbury structure // *Proceedings of the Sudbury-Noril'sk Symposium: Ontario Geological Survey Special Volume*. 1994. Vol. 5. P. 119–32.
- Hergarten S., Kenkmann T. The number of impact craters on Earth: Any room for further discoveries? // *Earth and Planetary Science Letters*. 2015. Vol. 425. P. 187–192. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.06.009>.
- Kaulina T. V., Shilovskikh V. V., Nerovich L. I., Savchenko E. E. [et al.]. Microstructural deformation and the age of monazite-(Ce) from diatellite granite in the Jarva-Varaka structure (Kola Region, Russia) // *Minerals*. 2023. Vol. 13, Iss. 10. Article number: 1325. DOI: <https://doi.org/10.3390/min13101325>.
- Kaulina T. V., Nerovich L. I., Ilchenko V. L., Lialina L. M. [et al.]. Astroblems in the Early Earth history: Precambrian impact structures of the Kola-Karelian region (East Baltic Shield) // *Geological and Geo-Environmental Processes on Earth / eds.: A. K. Shandilya, V. K. Singh, S. C. Bhatt, C. S. Dubey*. Springer Natural Hazards. Springer, Singapore, 2021. P. 25–37. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-16-4122-0_3.
- Kenkmann T. The terrestrial impact crater record: A statistical analysis of morphologies, structures, ages, lithologies, and more // *Meteoritics & Planetary Science*. 2021. Vol. 56, N 5. P. 1024–1070. DOI: <https://doi.org/10.1111/maps.13657>.
- Li S.-S., Keerthy S., Santosh M., Singh S. P. [et al.]. Anatomy of impactites and shocked zircon grains from Dhala reveals Paleoproterozoic meteorite impact in the Archean basement rocks of Central India // *Gondwana Research*. 2018. Vol. 54. P. 81–101. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gr.2017.10.006>.
- Lowe D. R., Byerly G. R., Kyte F. T. Recently discovered 3.42–3.23 Ga impact layers, Barberton Belt, South Africa: 3.8 Ga detrital zircons, Archean impact history, and tectonic implications // *Geology*. 2014. Vol. 42, Iss. 9. P. 747–750. DOI: <https://doi.org/10.1130/G35743.1>.
- Mashchak M. S., Naumov M. V. The Suavjärvi impact structure, NW Russia // *Meteoritics & Planetary Science*. 2012. Vol. 47, Iss. 10. P. 1644–1658. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2012.01428.x>.
- Mayr S. I., Wittmann A., Burkhardt H., Popov Y. [et al.]. Integrated interpretation of physical properties of rocks of the borehole Yaxcopoil-1 (Chicxulub impact structure) // *Journal of Geophysical Research*. 2008. Vol. 113, Iss. B7. Article number: B07201. DOI: <https://doi.org/10.1029/2007jb005420>.
- McDonald F. A., Burring J. A., Cina C. E. Yarrabubba – A large, deeply eroded impact structure in the Yilgarn Craton, Western Australia // *Earth and Planetary Science Letters*. 2003. Vol. 213, Iss. 3–4. P. 235–247. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(03\)00322-4](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(03)00322-4).
- Melosh H. J. *Impact cratering: A geological process*. New York: Oxford University Press, 1989. 245 p.
- Naldrett A. J. *Magmatic sulfide deposits: Geology, geochemistry, and exploration*. Springer, 2004. 727 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-08444-1>.
- Nerovich L. I., Kaulina T. V., Bayanova T. B., Ilchenko V. L. [et al.]. Granophyre norites and diorites of the Jarva-Varaka massif (Monchegorsk ore area, Kola Region, Russia): Geology, petrography, geochemistry, geochronology and origin // *Geochemistry International*. 2023. Vol. 61, N 6. P. 572–592. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0016702923060071>.
- Pesonen L. J. Petrophysical properties of impact rocks – The key to understanding geophysical anomalies of meteorite impact structures // *American Geophysical Union, Fall Meeting 2011, abstract id. P34A-06*.

References

- Ilchenko, V. L., Afanasieva, E. N., Kaulina, T. V., Lyalina, L. M. et al. 2022. Litsa uranium ore occurrence (Arctic zone of the Fennoscandian Shield): New results of petrophysical and geochemical studies. *Journal of Mining Institute*, 255, pp. 393–404. DOI: <https://doi.org/10.31897/pmi.2022.44>. EDN: GXUGYU. (In Russ.)
- Kaulina, T. V., Anisimov, R. L., Kunakkuzin, E. L., Baltybaev, Sh. K. et al. 2025. Mechanism of granophyre rocks formation of the Järva-Varaka massif (Monchegorsk ore region, Kola Peninsula): Sm-Nd and Rb-Sr systems and thermodynamic modeling. *Proceedings of the Fersman Scientific Session of the GI KSC RAS*, 22, pp. 331–339. DOI: <https://doi.org/10.31241/fns.2025.22.045>. EDN: QJWPLP. (In Russ.)
- Masaitis, V. L., Danilin, A. N., Maschak, M. S., Raikhlin, A. I. et al. 1980. *Geology of astroblemes*. Leningrad. (In Russ.)
- Nerovich, L. I., Bayanova, T. B., Kunakkuzin, E. L., Bazai, A. V. et al. 2015. New results of geological-petrographic and geochemical study of the layered Yarva-Varaka massif, Monchegorsk ore region. *Proceedings of the Fersman Scientific Session of the GI KSC RAS*, 12, pp. 141–146. EDN: WWMPBH. (In Russ.)
- Explanatory note to the Geological map of the Murmansk region. 2007. Scale 1:200000. Sheet Q-36-III, IV / ed. Remizova A. M. Apatity. (In Russ.)

- Smolkin, V. F., Fedotov, Zh. A., Neradovsky, Yu. N., Bayanova, T. B. et al. 2004. Layered intrusions of the Monchegorsk ore region: Petrology, mineralization, isotopy, deep structure. Apatity. (In Russ.)
- Byerly, G. R., Lowe, D. R., Wooden, J. L., Xie, X. 2002. An Archaean impact layer from the Pilbara and Kaapvaal cratons. *Science*, 297, pp. 1325–1327. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1073934>.
- Davis, D. W. 2008. Sub-million-year age resolution of Precambrian igneous events by thermal extraction–thermal ionization mass spectrometer Pb dating of zircon: Application to crystallization of the Sudbury impact melt sheet. *Geology*, 36(5), pp. 383–386. DOI: <https://doi.org/10.1130/g24502a.1>.
- Erickson, T. M., Kirkland, C. L., Timms, N. E., Cavosie, A. J. et al. 2010. Precise radiometric age establishes Yarrabubba, Western Australia, as Earth's oldest recognized meteorite impact structure. *Nature Communications*, 11. Article number: 300. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13985-7>.
- French, B. M., Koeberl, C. 2010. The convincing identification of terrestrial meteorite impact structures: What works, what doesn't, and why. *Earth-Science Reviews*, 98(1–2), pp. 123–170. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.10.009>.
- Garde, A. A., McDonald, I., Dyck, B., Keulen, N. 2012. Searching for giant, ancient impact structures on Earth: The Mesoarchaean Maniitsoq structure, West Greenland. *Earth and Planetary Science Letters*, 337–338, pp. 197–210. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.04.026>.
- Gibson, R. L., Armstrong, R. A., Reimold, W. U. 1997. The age and thermal evolution of the Vredefort impact structure: A single-grain U-Pb zircon study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(7), pp. 1531–1540. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(97\)00013-6](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(97)00013-6).
- Glikson, A. Y., Uysal, I. T., FitzGerald, J. D., Saygin, E. 2013. Geophysical anomalies and quartz microstructures, Eastern Warburton Basin, North-east South Australia: Tectonic or impact shock metamorphic origin? *Tectonophysics*, 589, pp. 57–76. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.12.036>.
- Grieve, R. A. F. 1994. An impact model for the Sudbury structure. *Proceedings of the Sudbury-Noril'sk Symposium: Ontario Geological Survey Special Volume*, 5, pp. 119–32.
- Hergarten, S., Kenkmann, T. 2015. The number of impact craters on Earth: Any room for further discoveries? *Earth and Planetary Science Letters*, 425, pp. 187–192. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.06.009>.
- Kaulina, T. V., Shilovskikh, V. V., Nerovich, L. I., Savchenko, E. E. et al. 2023. Microstructural deformation and the age of monazite-(Ce) from diatexite granite in the Jarva-Varaka structure (Kola Region, Russia). *Minerals*, 13(10). Article number: 1325. DOI: <https://doi.org/10.3390/min13101325>.
- Kaulina, T. V., Nerovich, L. I., Ilchenko, V. L., Lialina, L. M. et al. 2021. Astroblems in the Early Earth history: Precambrian impact structures of the Kola-Karelian region (East Baltic Shield). In *Geological and Geo-Environmental Processes on Earth*. Eds.: A. K. Shandilya, V. K. Singh, S. C. Bhatt, C. S. Dubey. Springer Natural Hazards. Springer, Singapore, pp. 25–37. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-16-4122-0_3.
- Kenkmann, T. 2021. The terrestrial impact crater record: A statistical analysis of morphologies, structures, ages, lithologies, and more. *Meteoritics & Planetary Science*, 56(5), pp. 1024–1070. DOI: <https://doi.org/10.1111/maps.13657>.
- Li, S.-S., Keerthy, S., Santosh, M., Singh, S. P. et al. 2018. Anatomy of impactites and shocked zircon grains from Dhala reveals Paleoproterozoic meteorite impact in the Archean basement rocks of Central India. *Gondwana Research*, 54, pp. 81–101. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gr.2017.10.006>.
- Lowe, D. R., Byerly, G. R., Kyte, F. T. 2014. Recently discovered 3.42–3.23 Ga impact layers, Barberton Belt, South Africa: 3.8 Ga detrital zircons, Archean impact history, and tectonic implications. *Geology*, 42(9), pp. 747–750. DOI: <https://doi.org/10.1130/G35743.1>.
- Mashchak, M. S., Naumov, M. V. 2012. The Suavjärvi impact structure, NW Russia. *Meteoritics & Planetary Science*, 47(10), pp. 1644–1658. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2012.01428.x>.
- Mayr, S. I., Wittmann, A., Burkhardt, H., Popov, Y. et al. 2008. Integrated interpretation of physical properties of rocks of the borehole Yaxcopoil-1 (Chicxulub impact structure). *Journal of Geophysical Research*, 113(B7). Article number: B07201. DOI: <https://doi.org/10.1029/2007jb005420>.
- McDonald, F. A., Bunring, J. A., Cina, C. E. 2003. Yarrabubba – A large, deeply eroded impact structure in the Yilgarn Craton, Western Australia. *Earth and Planetary Science Letters*, 213(3–4), pp. 235–247. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(03\)00322-4](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(03)00322-4).
- Melosh, H. J. 1989. Impact cratering: A geological process. New York, Oxford University Press.
- Naldrett, A. J. 2004. Magmatic sulfide deposits: Geology, geochemistry, and exploration. Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-08444-1>.
- Nerovich, L. I., Kaulina, T. V., Bayanova, T. B., Ilchenko, V. L. et al. 2023. Granophyre norites and diorites of the Jarva-Varaka massif (Monchegorsk ore area, Kola Region, Russia): Geology, petrography, geochemistry, geochronology and origin. *Geochemistry International*, 61(6), pp. 572–592. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0016702923060071>.
- Pesonen, L. J. 2011. Petrophysical properties of impact rocks – The key to understanding geophysical anomalies of meteorite impact structures. American Geophysical Union, Fall Meeting 2011, abstract id. P34A-06.

Сведения об авторах

Ильченко Вадим Леонидович – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209;
Геологический институт КНЦ РАН, канд. геол.-минерал. наук, ст. науч. сотрудник;
e-mail: v.ilchenko@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2086-4722>

Vadim L. Ilchenko – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209;
Geological Institute KSC RAS, Cand. Sci. (Geology & Miner.), Senior Researcher;
e-mail: v.ilchenko@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2086-4722>

Каулина Татьяна Владимировна – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209;
Геологический институт КНЦ РАН, д-р геол.-минерал. наук, гл. науч. сотрудник;
e-mail: t.kaulina@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6530-2187>

Tatiana V. Kaulina – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209;
Geological Institute KSC RAS, Dr Sci. (Geology & Miner.), Chief Researcher;
e-mail: t.kaulina@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6530-2187>

Нерович Людмила Ивановна – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209;
Геологический институт КНЦ РАН, канд. геол.-минерал. наук, ст. науч. сотрудник;
e-mail: l.nerovich@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6821-1941>

Lyudmila I. Nerovich – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209;
Geological Institute KSC RAS, Cand. Sci. (Geology & Miner.), Senior Researcher;
e-mail: l.nerovich@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6821-1941>