

## Морфоструктурные особенности гранатов прибрежно-морских россыпей, определяющие технологию их переработки

### Morphostructure of garnets from coastal-marine placers as a key feature for determining their processing technology

Левченко Е. Н., Соленикова Е. О.

Levchenko E. N., Solenikova E. O.

Один из самых востребованных абразивных материалов на настоящее время – природный гранатовый песок. Интерес к нему существенно усилился после распада СССР, так как многие промышленно значимые геологические объекты остались в бывших союзных республиках. В России разведано много коренных месторождений технического гранатового сырья, однако практически все эти объекты не представляют промышленного интереса по экономическим причинам. В настоящее время береговая зона Белого моря считается перспективной на обнаружение промышленно значимых россыпей и россыпе-проявлений гранатовых песков. Область применения гранатового песка весьма широка – это гидроабразивная резка, очистка различных поверхностей и удаление коррозионных дефектов, свободная шлифовка стекла и фарфора и производство шлифпорошков. За 2021 г. объём государственных закупок гранатового песка в натуральном выражении вырос на 16,3 %, а объём коммерческих – на 64,2 % по сравнению с аналогичным периодом предыдущего года. Для изучения состава минеральной группы граната использован комплекс методов исследования, в том числе прецизионных (рентгеноспектральный и электронная микроскопия), определяющих технологию получения промышленных концентратов.

Освоение новых проявлений прибрежных гранатосодержащих песков в Архангельской области может обеспечить страну высоколиквидным, стратегическим сырьём.

Ключевые слова: гранатовый песок, минеральный состав, морфоструктурные особенности, технологические свойства, абразивные материалы.

One of the most popular abrasive materials at the moment is natural garnet sand. Interest in it increased significantly after the collapse of the USSR, as many industrially significant geological objects were preserved within the borders of the former Soviet republics. Many primary deposits of raw garnet materials have been explored in Russia, but almost all of them are not of industrial interest for economic reasons. Currently, the coastal zone of the White Sea is considered prospective for the discovery of industrially significant placers and placer occurrences of garnet sand. The range of application of garnet sand is very wide – it is waterjet cutting, cleaning of various surfaces and removal of corrosion defects, free grinding of glass and porcelain and the production of grinding powders. In 2021, the volume of government purchases of garnet sand in physical terms increased by 16.3 %, and the volume of commercial purchases increased by 64.2 % compared to the same period of the previous year. Based on the study of the composition of the garnet mineral group, we used a set of research methods, including precision (X-ray spectral and electron microscopy) in order to determine the technology of obtaining industrial concentrates.

The development of new occurrences of coastal garnet-containing sand in the Arkhangelsk region can provide the country with highly liquid, strategic raw materials.

Keywords: garnet sand, mineral composition, morphostructure, technological properties, abrasive materials.

Для цитирования: Левченко Е. Н., Соленикова Е. О. Морфоструктурные особенности гранатов прибрежно-морских россыпей, определяющие технологию их переработки. Руды и металлы. 2022. № 1. С. 94–105. DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10005.

For citation: Levchenko E. N., Solenikova E. O. Morphostructure of garnets from coastal-marine placers as a key feature for determining their processing technology. Ores and metals, 2022, № 1, pp. 94–105. DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10005.



*Введение.* Промышленный интерес к абразивным материалам, особенно к гранатовым пескам, обозначился практически сразу после распада СССР, когда основные сырьевые источники оказались за пределами России.

Береговая зона Белого моря считается перспективной для обнаружения россыпных месторождений абразивных гранатовых песков. Сведения о присутствии естественных гранатовых концентратов (ЕГК) в современных отложениях на этой территории приводятся в различных отчётах, составленных по результатам геологических исследований как на шельфе, так и на прилегающей суше. Все геологические образования береговой зоны (за исключением морены, представленной глинами и суглинками), которые могут рассматриваться в качестве перспективных, выходят на дневную поверхность.

Государственным балансом учтены и помещены в распределённый фонд запасы граната в «беломорских» пляжевых песках на участках Солзенский, Никольский, Товский, Инецкий Приморской площади (Архангельская область).

Гранат широко используется как абразивный материал. В настоящее время добывается более 1,5 млн т этого минерала, прежде всего из россыпных месторождений прибрежно-морского генезиса. Гранатовый абразив используется во многих отраслях. Основные области применения – очистка поверхностей оборудования, сооружений и материалов струйными агрегатами; очистка сточных и питьевых вод, вина, масел, нефтепродуктов от механических примесей; гидроабразивная резка различных материалов под большим давлением (4000 атм) с помощью воды и гранатового абразивного песка без нагрева и с минимальной толщиной распила до 1 мм при толщине материала до 120 мм. Среди прочих областей применения – традиционные абразивы, щадящие абразивы и пасты для шлифовки и полировки точной оптики, зеркал, кожи, бумаги, ценных пород дерева; инертный наполнитель, композит при работе с керамикой. Весьма перспективна возможность употреблять гранатовый концентрат как про-

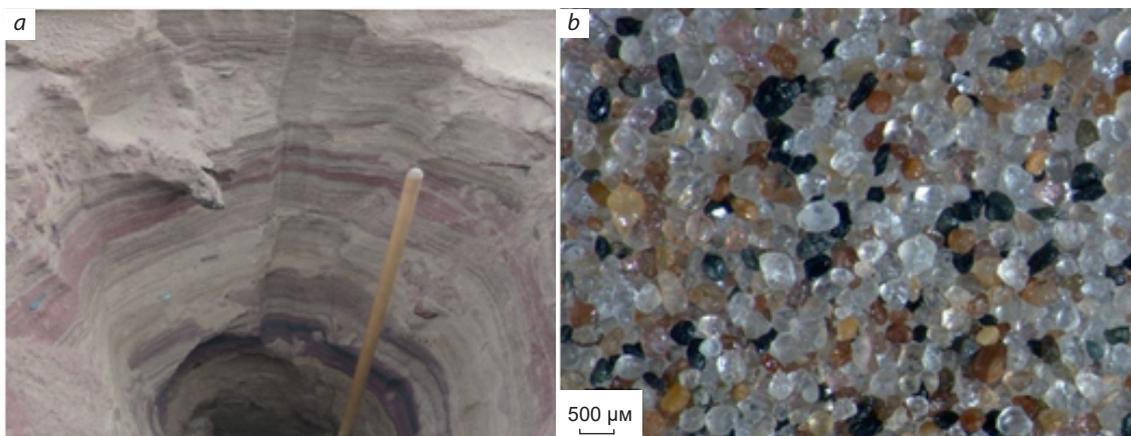
пант для повышения нефтеотдачи пластов в нефтедобывающей промышленности. Россия – важный потребитель гранатового абразива, в стране работает более 1000 установок гидроабразивной резки, однако весь гранат закупается за рубежом (Австралия, Индия, ЮАР, Китай).

*Объект исследования.* Изучались пробы из гранатовых россыпей, расположенных на участке побережья недалеко от Архангельска (участки Мегра, Северная Майда, Южная Майда и Кедовский Вороновской площади). По результатам исследований определён минеральный состав россыпей, минеральный состав гранатов, а также состав некоторых включений в гранатах.

*Методы и методики.* В ходе работ был проведён ситовой, гравитационно-магнитный, химический (атомно-эмиссионный с индуктивно-связанной плазмой), оптико-минералогический, микрорентгеноспектральный анализы и анализ методом электронной микроскопии. Ситовый анализ проб, отобранных в Архангельской области, проводился на анализаторе Retsch AS 200. Оптико-минералогический анализ – на стереоскопическом микроскопе МБС-10 и поляризационном микроскопе Leitz Laborlux 12 Pol в минералогической лаборатории Аналитического центра ИМГРЭ по утверждённым методикам НСОММИ [4, 8]. Микрорентгеноспектральный анализ проводился на микроанализаторе Jeol JXA-8100, оснащённом тремя кристалл-дифракционными и энергодисперсионными спектрометрами (аналитик И. М. Куликова). Анализы методом электронной микроскопии выполнены на сканирующем электронном микроскопе JSM-5610 производства Jeol.

*Результаты исследования и их обсуждение.* По генезису и условиям формирования россыпи абразивного граната с попутной титановой (ильменитовой) минерализацией береговой зоны Белого моря относятся к современному прибрежно-морскому типу.

Пески полезной толщи связаны с морскими пляжевыми отложениями ( $m^2H^{2-3}$ ). Россыпепроявления гранатовых песков представлены линзовидными пластообразными тела-



**Рис. 1. «Беломорские» пляжевые пески, Архангельская область:**

*a* – типовой разрез полезной толщи в шурфе; *b* – гранатовый песок, исходная проба

**Fig. 1. White Sea beach sand, Arkhangelsk Region:**

*a* – a typical cross-section of the useful stratum in the pit; *b* – garnet sand, the original sample

ми. Полезная толща в разрезе представляет собой слой, в котором чередуются прослои, обогащённые гранатом (ЕГК) со слабообогатёнными и «пустыми» прослоями, сложенными в основном кварцевыми песками. Мощность и число как обогащённых, так и пустых прослоев сильно варьируется. Мощность ЕГК колеблется от первых миллиметров до 20–30 см (рис. 1, *a*). Такой характер строения не позволяет производить селективную отработку гранатовых прослоев. В обогащённых гранатом прослоях отмечаются повышенные концентрации минералов тяжёлой фракции, которые часто образуют прослойки чёрного цвета мощностью до 1–2 см.

По гранулометрическому составу пески полезной толщи преимущественно мелкозернистые хорошо сортированные, реже – среднезернистые, иногда содержат прослои разнозернистых песков с гравием (до 10 %).

По минеральному составу гранатосодержащие пески полимиктовые, существенно кварцевые (рис. 1, *b*). Преобладают кварц, пироксены, гранаты, амфиболы, в меньшем количестве присутствуют ильменит, полевые шпаты, магнетит (титаномагнетит), обломки горных пород и др.

Гранатовые пески, отобранные в Архангельской области, имеют средний минеральный состав: кварц – 58,9 % (в том числе 9,25 % – ожелезнённый), гранат – 10,8 %, амфибол – 2,63 %, пироксен – 0,46 %, ильменит – 0,96 %, полевой шпат – 6,5 %, магнетит (титаномагнетит) – 1,94 %, обломки горных пород – 2,7 %. Высокие содержания граната характерны для участков природного обогащения и формирования ЕГК. Как правило, это ограниченные мысами песчаные бухты, в которых созданы все условия для аккумуляции материала.

В ходе проведения оптико-минералогического анализа были изучены морфоструктурные особенности зёрен гранатов.

Гранат представлен во всех пробах минеральными разновидностями – минералами промежуточного состава с общей формулой  $(\text{Mg,Fe}^{2+},\text{Mn})_3(\text{Al,Cr,Fe}^{3+})_2[\text{SiO}_4]_3$ .

Изученные гранаты различной окраски – от розовато-красной, оранжево-красной до насыщенной красно-сиреневой. Большая часть изученных гранатов представляет собой угловатые обломки с острыми сколами. В пробах были встречены и хорошо окатанные зёрна.

Для определения минерального состава гранатов был выполнен рентгеноспектральный

**Табл. 1. Химический состав изученных гранатов, мас. %**

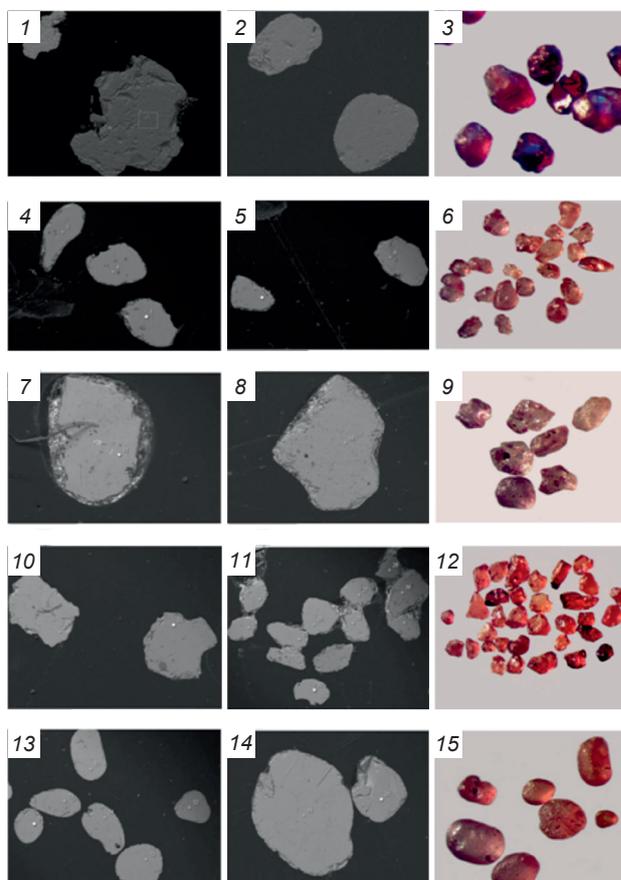
Table 1. Chemical composition of the studied garnets, wt. %

	Содержание элементов в пересчёте на оксиды					
	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	FeO
min	0,89	15,59	0,60	0,00	0,08	11,65
max	20,92	25,91	21,11	0,06	16,66	35,37
среднее	10,93	22,58	10,86	0,03	0,75	23,51

микроанализ, а также анализ методом спектральной электронной микроскопии (СЭМ) (табл. 1).

Принято считать, что цвет граната напрямую зависит от его химического и, как результат, минального состава. Чтобы решить вопрос, возможна ли предварительная дифференциация разновидности минерала в пределах группы по внешним параметрам, были изучены гранаты разного цвета, выделены и исследованы пять монофракций. В составе каждой монофракции зёрна граната были близки по цвету и его насыщенности, а также морфоструктурным особенностям. Цвет и форма изучались оптико-минералогическим методом, химический состав – методом СЭМ (рис. 2). Все результаты СЭМ пересчитывались на четыре минала и сравнивались (табл. 2).

Гранат *монофракции 1* отличается насыщенной густой окраской ярко-малинового цвета. Практически не наблюдается кайм перекристаллизации и замещения. По результатам СЭМ, во всех зёрнах преобладает альмандиновый состав (см. табл. 2, точки 3, 4, 9, 10). Содержание альмандинового минала в зёрнах граната 60,49–78,12 мол. % за исключением анализа в точке 6, где содержание альмандина составляет 48,7 мол. %, спессартина – 41,92 мол. %. Такое высокое содержание марганца, безусловно, требует более детального исследования и может указывать на иные условия кристаллизации и ещё один источник сноса в россыпи. При этом внешние параметры граната – цвет, форма, степень ока-



**Рис. 2. Монофракции граната:**

1–3 – монофракция 1 (густо-окрашенный малиновый альмандин); 4–6 – монофракция 2 (полупрозрачный розовато-сиреневатый альмандин); 7–9 – монофракция 3 (полупрозрачный розовато-малиновый альмандин); 10–12 – монофракция 4 (яркий красный и красно-оранжевый альмандин); 13–15 – монофракция 5 (окатанные зёрна альмандина); фото 1, 2, 4, 5, 7, 8, 10, 11, 13, 14 – СЭМ, 3, 6, 9, 12, 15 – фото со стереомикроскопа МБС-10, камера Levenhuk

**Fig. 2. Garnet monofractions:**

1–3 – monofraction 1 (deeply colored crimson almandine); 4–6 – monofraction 2 (translucent pinkish-lilac almandine); 7–9 – monofraction 3 (translucent pinkish crimson almandine); 10–12, monofraction 4 (bright red and red-orange almandine); 13–15 – monofraction 5 (rounded almandine grains); photo 1, 2, 4, 5, 7, 8, 10, 11, 13, 14 – SEM, 3, 6, 9, 12, 15 – photo from MBS-10 stereo microscope, Levenhuk camera

**Табл. 2. Химический состав зёрен граната (к рис. 2)**

Table 2. Chemical composition of garnet grains (to Fig. 2)

№ рисунок	№ точки	MgO	CaO	FeO	MnO	Преобладающий минерал
2 (1–2)	3	0,89	12,36	28,7	0,98	альмандин
	4	0,92	12,3	28,42	1,11	альмандин
	9	2,75	3,13	31,86	0	альмандин
	10	0,37	9,41	27,48	0,83	альмандин
2 (4–5)	3	9,04	3,51	23,55	0,61	альмандин
	4	6,58	3,41	29,02	0,64	альмандин
	5	6,32	0,99	33,59	0,6	альмандин
	9	3,62	1,01	29,51	0,85	альмандин
	10	7,38	0,7	28,02	0,45	альмандин
2 (7–8)	11	1,77	5,62	21,51	6,59	альмандин
	12	9,81	0,8	17,85	0,34	альмандин-пироп
	13	6,14	4,69	29,97	1,08	альмандин
	14	7,65	2,6	28,5	0,91	альмандин
	15	5,92	3,39	26,26	0,68	альмандин
	16	4,84	5,02	26,03	0,55	альмандин
	19	5,26	3,49	30,51	0,89	альмандин
	20	6,47	7,00	26,24	0,97	альмандин
2 (10–11)	21	2,00	5,26	32,44	1,51	альмандин
	22	10,46	7,00	22,27	0,49	альмандин-пироп-гроссуляр
	23	3,93	8,27	22,34	1,61	альмандин
	24	2,13	10,15	22,34	0,91	альмандин
	25	4,15	3,61	29,37	1,05	альмандин
	26	4,9	0,83	33,05	1,42	альмандин
	27	0,83	8,71	22,57	2,15	альмандин
	28	1,23	11,73	27,21	1,49	альмандин
	31	1,52	7,74	19,77	0,62	альмандин
	32	0	12,53	25,58	1,87	альмандин
2 (13–14)	33	2,95	1,59	32,5	3,89	альмандин
	34	7,97	1,23	29,61	0,47	альмандин

танности, степень кавернозности и прочие – едины для всех зёрен монофракции. Несмотря на разброс содержаний марганца от 0 до 16,66 %, все изученные гранаты можно отнести к альмандину. Содержание оксида

магния невелико и максимально достигает 6,25 мас. %, что соответствует 24,51 мол. % пиропового минерала в данной точке.

В монофракцию 2 были отобраны зёрна граната нежно-розового цвета от тёплого до

холодного оттенка с высокой степенью прозрачности. Степень окатанности зёрен различная, от средней до высокой. По поверхности зёрен наблюдаются каймы, которые могут говорить об изменениях, произошедших в породе ещё до попадания минерала в россыпь. Некоторые зёрна граната содержат минеральные включения, преимущественно кварцевые. По результатам СЭМ, все эти зёрна являются альмандином (табл. 2, точки 3, 4, 5, 9, 10). Стоит отметить, что доля пиропового минала в них выше, чем в ярко-малиновых зёрнах монофракции 1. Содержание пироба здесь (точка 3) максимально достигает 35,99 мол. %, альмандинового минала в зёрнах – 52,56–77,40 мол. %.

Зёрна в монофракции 3 (см. рис. 2) по своим внешним признакам аналогичны зёрнам из монофракции 2. Цвет граната – розовато-малиновый, оттенок холодный. Наблюдаются каймы по краю зерна и мелкие включения в зерне. Поверхность более окатанных зёрен кавернозная, в некоторых кавернах наблюдается чёрный минерал, вероятно, магнетит. По результатам СЭМ, изученные зёрна являются альмандином. Максимальное значение пиропового минала составляет 30,99 мол. %, что также превышает максимальное содержание пироба в густоокрашенных малиновых зёрнах монофракции 1. Содержание альмандинового минала в зёрнах граната данной монофракции составляет 60,05–74,29 мол. %.

В монофракцию 4 выделены зёрна с ярко-красной, красно-оранжевой, оранжево-красноватой окрасками. Они имеют среднюю и невысокую степени окатанности, чаще представляют собой угловатые обломки. У некоторых зёрен просматриваются элементы кристаллографических очертаний, наблюдается небольшое количество минеральных включений. Основным критерий отбора – яркий насыщенный цвет, существенно отличающийся от цвета зёрен предыдущих монофракций. На некоторых зёрнах видны участки развития кайм, но они не покрывают зерно полностью. Также хорошо заметны минеральные включения. По результатам СЭМ, эти зёрна – альмандин с существенной долей гроссуляра (до

**Табл. 3. Химический состав микровключений в гранатах, мас. %**

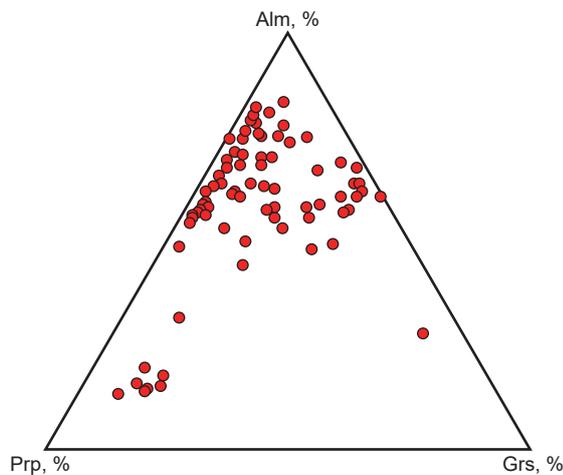
Table 3. Chemical composition of microinclusions in garnet, wt. %

№ точки	Метод	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	MnO	FeO
2 (рис. 4, e)	СЭМ		99,25			0,76
2 (рис. 4, f)	СЭМ					84,13
11 (рис. 4, d)	РСМА	21,19	57,35	6,61	0,02	0,26

32,76 мол. %). Такой гранат характерен для метаморфических горных пород. Содержание альмандинового минала в гранатах монофракции 4 составляет 53,70–74,61 мол. % за исключением точки 22, где доля альмандина составляет 44,17 мол. %, а доля пиропового минала – 37,02 мол. %, что превышает содержание пироба во всех предыдущих монофракциях. При снижении доли альмандина наблюдается увеличение доли гроссуляра.

В монофракцию 5 попали зёрна разной окраски. Некоторые имели более малиновый оттенок, другие более красный. Основным общим признаком зёрен в данной монофракции – степень окатанности. На снимках СЭМ заметно, что некоторые зёрна имеют элементы кайм. Поверхность зёрен кавернозная, в ямках и кавернах наблюдается чёрный минерал, вероятно, магнетит. По результатам СЭМ, все зёрна в данной монофракции можно отнести к альмандину (табл. 3). Доля альмандина в гранатах монофракции 5 – 54,95–71,2 мол. %. В точке 12 получено заметное содержание пиропового минала (47,66 мол. %), содержание альмандина здесь ниже – 48,61 мол. %.

В результате исследования были изучены гранаты различного цвета, размера и разной степени окатанности. Но все они в большинстве своём отвечали альмандину с тем или иным содержанием прочих миналов (рис. 3). В пробах, отобранных в Архангельской области другими исследователями, были изучены гранаты с высоким содержанием пиропового минала до 72 мол. % [6].



**Рис. 3. Диаграмма составов граната в координатах основных минералов альмандин – гроссуляр – пироп (almandin – grossularia – pyrope)**

Fig. 3. Diagram of the composition of garnet in the coordinates of the main end members almandine – grossular – pyrope

Таким образом, на примерах показано, что диагностировать разновидность граната в пределах группы по внешним параметрам (цвет, морфоструктурные особенности) без применения точных методов исследования (РСМА или СЭМ) не представляется возможным.

Выявлено, что гранат в россыпях сохраняет свои морфоструктурные особенности, которые были присущи ему в коренных источниках. По форме, составу и объёму включений в гранате можно сделать предположение о том, в каких условиях происходила кристаллизация минерала и в каких породах он мог образоваться.

При оптико-минералогическом [4, 8] изучении зёрен граната из проб, отобранных в Архангельской области, обнаружены мелкие включения прочих минералов (рис. 4). В ходе анализа выявлены включения рутила (см. рис. 4, *a, b*) и циркона (см. рис. 4, *b*). На рис. 4, *c* при увеличении заметны мелкие включения кварца, рутила, газовой-жидкие включения. Данные микрорентгеноспектрального анализа (см. рис. 4, *d*) и анализа методом электрон-

ной микроскопии (см. рис. 4, *d, e*) показывают, что мелкими включениями могут быть кварц, гематит/магнетит, анортит.

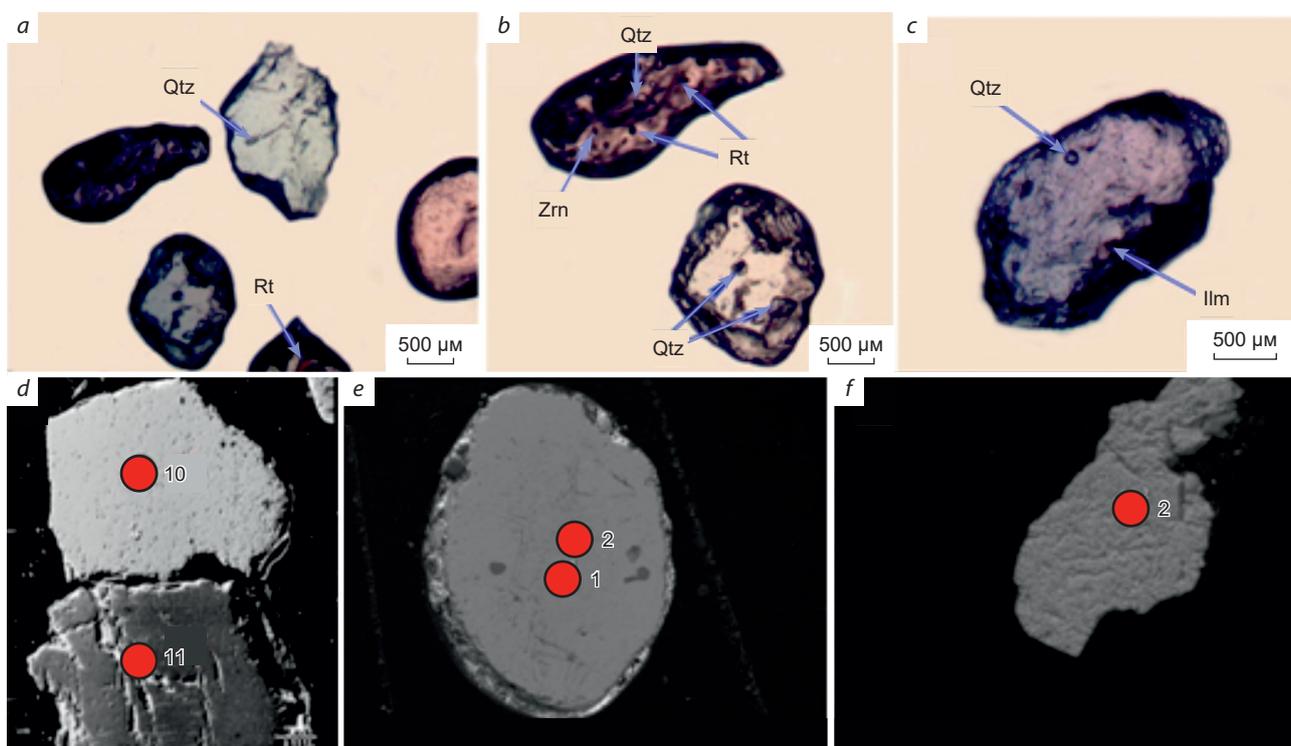
Анализ методами рентгеноспектрального микроанализа и электронной микроскопии (см. табл. 3) позволил получить сведения о составе мелких включений в гранате, что не представляется возможным при оптико-минералогическом анализе.

Результат в точке анализа 2 (см. рис. 4, *f*) соответствует кварцу с минимальной примесью железа. Результат в точке 2 (см. рис. 4, *e*) отвечает гематиту или магнетиту, в точке 11 (см. рис. 4, *d*) – расчётной формуле  $[\text{Ca}_{0,355}\text{Fe}^{2+}_{0,011}]_{0,4}(\text{Al}_{1,253}\text{Si}_{2,877})_{4,1}\text{O}_8$  (плагноклаз анортит с примесью железа; классическая формула анортита –  $\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$ ).

Среди интересных находок, отобранных в россыпях Архангельской области, стоит отметить обломки и зёрна алмазов (рис. 5). Ввиду мелкого размера зёрен (менее 70 мкм) диагностика была затруднена, минерал диагностирован по голубоватой люминесценции в ультрафиолетовом луче (см. рис. 5, *a*).

Для анализа руд, отличающихся полиминеральным составом (наличием граната, пироксена и других минералов нескольких видов), присутствием труднодиагностируемых методами оптической микроскопии минералов, наличием тесно ассоциирующих минеральных фаз и тонкодисперсных агрегатов, а также материала тонких классов крупности, дополнительно использован рентгенографический количественный фазовый анализ, показавший, что минералы группы амфиболов представлены в основном роговой обманкой, а эгирин преобладает в группе пироксенов.

Различия в физических свойствах минералов лежат в основе их разделения в технологических процессах. Поэтому свойства, используемые в технологических процессах, часто объединяют под названием технологические [9]. Основа выбора схемы разделительного процесса – контрастность свойств основных рудных, сопутствующих и породообразующих минералов. К числу наиболее важных технологических свойств минералов относятся: гравитационные (плотность), маг-

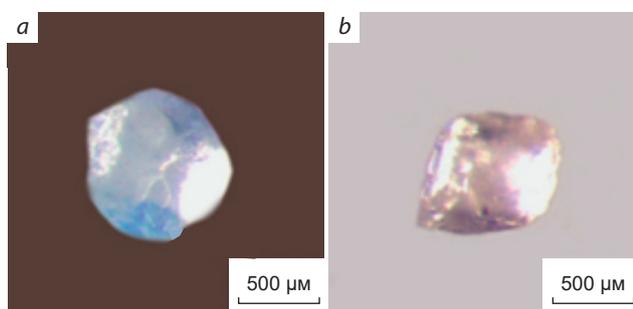


**Рис. 4. Включения в минеральных зёрнах граната. Фото *a–c* с поляризационного микроскопа Leitz Laborlux 12 Pol, камера Levenhuk, *d–f* – BSE зёрен граната:**

Qtz – кварц; Rt – рутил; Zrn – циркон; Ilm – ильменит; приведены в соответствии с [14]; *d* – включение анортита; *e* – включение кварца, *f* – включение гематита или магнетита

**Fig. 4. Mineral inclusions in garnet. Photos *a–c* from a Leitz Laborlux 12 Pol polarizing microscope, Levenhuk camera, *d–f* – BSE garnet grains:**

Qtz – quartz; Rt – rutile; Zrn – zircon; Ilm – ilmenite; given in accordance with [14]; *d* – inclusion of anorthite; *e* – inclusion of quartz, *f* – inclusion of hematite or magnetite



**Рис. 5. Люминесценция (*a*) алмаза в ультрафиолетовом луче; *b* – алмаз**

**Fig. 5. Luminescence (*a*) of diamond in ultraviolet; *b* – diamond**

нитные (магнитная восприимчивость), электрические (электропроводность, диэлектрическая проницаемость), механические (твёрдость, хрупкость, пластичность). Контрастность физических свойств рудных и нерудных минералов может быть осложнена присутствием различных типов рудных сростков с близкими свойствами, в то время как различные рудные минералы одного и того же полезного компонента могут иметь различные свойства (табл. 4).

На основании данных оптико-минералогического анализа тяжёлой фракции, полученной в результате гравитационно-магнит-

**Табл. 4. Основные физические свойства минералов, слагающих гранатосодержащие руды**

Table 4. Main physical properties of minerals comprising garnet-bearing ores

Минерал	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Твёрдость по шкале Мооса	Удельная магнитная восприимчивость, 10 <sup>-6</sup> м <sup>3</sup> /кг	Диэлектрическая проницаемость
Гранат пироп-альмандинового ряда	3,5–4,3	7,0–7,5	80–150	10,5–12,3
Кианит	3,56–3,67	4,5–7	0,06–0,9	5,7–8,8
Кварц	2,5–2,8	7,0	-0,46	4,4–6
Плагиоклаз	2,54–2,6	6–6,5		5,3–7,4
Магнетит	4,8–5,2	5,5–6,0	1,5–1,02	
Ильменит	4,6–4,8	5,0–6,0	15–900	33,7–81
Рутил	4,2–4,4	6,0–6,5	0,1–4,8	30–170
Роговая обманка	2,9–3,5	5,5–6,0	10–127	4,9–11,2
Эгирин	3,0–3,6	5,0–7,0	48,0–54,0	9,3–10,0

ного анализа, в сильномагнитную фракцию (Mgt) выделяется магнетит, титаномагнетит и частично ильменит; в среднемагнитную фракцию I – основная часть ильменита и оставшийся магнетит. В доминирующей для проб слабомагнитной фракции II концентрируются гранат и основная часть минералов группы амфиболов и пироксенов; в немагнитной фракции III, составляющей незначительную долю от фракции тяжёлых минералов, сконцентрированы остатки минералов группы амфиболов и пироксенов, рутил, циркон, кианит. В лёгкой фракции гравитационного анализа концентрируются кварц, полевые шпаты, гидроксиды железа, минералы группы слюд.

При проведении анализа, распределяющего рудные минералы по классам крупности, были учтены все основные минералы, влияющие на обогащение гранатовых песков. Полученные данные показывают, что распределение рудных минералов по классам крупности проб значительно отличается. Общей тенденцией является концентрация как граната, так и минералов группы амфиболов и пироксенов

в одних классах крупности. Основная часть их сосредоточена в двух классах крупности – -0,5+0,25 мм и -0,25+0,14 мм. Определение валового содержания основного компонента в характерных (по данным минералогического анализа) фракциях и количественный анализ фракций позволяют с достаточной объективностью прогнозировать технологические схемы и ожидаемые показатели основного и доводочного циклов обогащения, ожидаемое качество получаемых конечных продуктов.

С учётом распределения содержаний наиболее распространённых минералов по продуктам гравитационно-магнитного фракционирования песков [7] выполнен расчёт прогнозных технологических показателей переработки исходных руд (табл. 5).

Учитывая полученные результаты, а также данные, приведённые в публикациях по аналогичному минеральному сырью [1–3, 5, 10–13], оценка обогатимости гранатовых песков на исследуемом материале позволяет однозначно рекомендовать магнитно-электрическую схему их переработки.

**Табл. 5. Результаты прогнозной оценки обогатимости гранатосодержащих песков**

Table 5. Results of the predictive modelling of the garnet-containing sand enrichment

Наименование продуктов	Выход от исходных песков, %	Содержание, %			Извлечение, %		
		Grт	Hbl + Px	Qtz +Kfs	Grт	Hbl + Px	Qtz + Kfs
Концентрат 1 (80 Mesh)	3,95	95,9	3,0	1,12	35,06	3,83	0,05
Концентрат 2 (20–40 Mesh)	5,21	95,0	4,0	1,0	45,81	6,73	0,06
Песок на отсыпку (хвосты)	90,84	2,28	3,05	94,68	19,13	89,45	99,89
Исходные пески	100,00	10,80	3,09	86,11	100,00	100,00	100,00

Примечание. Grт – гранат; Hbl – роговая обманка; Px – пироксен; Qtz – кварц; Kfs – КФС

*Заключение.* Таким образом, установлено:

- основная масса проб представлена обломками пород, кварцем и полевыми шпатами. Типичные минералы тяжёлой фракции проб – ильменит, магнетит, гранаты, а также амфиболы и пироксены, остальные встречаются эпизодически;
- гранат представлен во всех пробах минеральными разновидностями – минералами промежуточного состава с общей формулой  $(Mg, Fe^{2+}, Mn)_3(Al, Cr, Fe^{3+})_2[SiO_4]_3$ ;
- в зёрнах граната выявлены включения прочих минералов – гематита или магнетита, кварца, плагиоклаза, ильменита, рутила, циркона;
- состав, форма, объём включений могут говорить об условиях кристаллизации минерала в породе и, возможно, могут оказывать влияние на технологические свойства граната;
- по цвету и морфоструктурным особенностям граната нельзя делать выводы о его

разновидности в пределах группы, необходимо применять точные методы исследования – РСМА, СЭМ;

- по предварительному прогнозу, из гранатовых песков с содержанием граната в исходном 10 % можно получить гранатовые концентраты в соответствии с ТУ 3988-002-76245879-2011 с получением марок 50 и 80 Mesh.

Осложняющие факторы – большое количество ожелезнённого кварца (до 13,86 %), существенные содержания амфиболов и пироксенов, что важно, близких по отношению к гранатам физических свойств.

Анализ полученных данных о россыпепроявлениях технического граната позволяет предполагать наличие в Архангельской области новых месторождений. Данные объекты могут полностью обеспечить ценным стратегическим сырьём предприятия Российской Федерации и быть конкурентными на международном рынке.

## Список литературы

1. Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н., Похиленко Н. П. Морфология и морфогенез индикаторных минералов кимберлитов. – Новосибирск : СО РАН, филиал «Гео», 2001. – 276 с.
2. Бельшиев А. К., Мясникова Н. Ф., Ковердяев О. Н., Тарасов А. Н. Разработка технологии обогащения гранатосодержащего сырья // Обогащение полезных ископаемых. – 2002. – № 4. – С. 150–156.

3. Власова Э. А., Хмельков А. М. Морфогенетические особенности гранатов из россыпи Дьюкунах, Якутская алмазоносная провинция // Руды и металлы. – 2021. – № 1. – С. 106–112.
4. Голиусова И. В. Оптико-минералогический анализ шлиховых и дробленых проб // Методические рекомендации НСОММИ № 162. – М. : ВИМС, 2014.
5. Думов А. В. Обогащение гранатовых россыпей Белого моря // Обогащение руд. – 2018. – № 3. – С. 21–25.
6. Еременко Д. В., Еременко А. В., Бондаренко С. В. Использование пиропов для оценки перспектив алмазоносности трубки 746-Б Архангельской алмазоносной провинции // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2015. – № 3. – С. 59–64.
7. Левченко Е. Н. Прогнозирование технологических свойств титан-циркониевых россыпей России. – М. : ИМГРЭ, 2007. – 199 с.
8. Левченко Е. Н., Ожогина Е. Г. Оптико-минералогический анализ гранатсодержащего сырья // Методические рекомендации НСОММИ № 201. – М. : ВИМС, 2020. – 24 с.
9. Левченко Е. Н., Соленикова Е. О. Особенности минерального состава гранатсодержащих россыпей побережья Белого моря, определяющие технологию их переработки // Разведка и охрана недр. – 2021. – № 10. – С. 69–75.
10. Мельникова В. А. Особенности технологической оценки гранатового сырья : магистерская диссертация. – СПб. : Институт наук о Земле, 2016. – 77 с.
11. Петров С. В., Казанов О. В., Гончаров С. В., Бакаев Г. Ф., Бороздин А. П., Пославский С. В., Пестриков А. А., Кондратьев В. А., Шелухина Ю. С. Россыпной технический гранат – новый вид минерального сырья Мурманской области // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. – 2019. – С. 466–472.
12. Скорынин И. А., Яковлева О. С., Ханин Д. А., Анискин Л. П. Новые данные о гранатах из россыпей близ горы Солдатка, Усть-Камчатского района (Камчатский край) // Уральская минералогическая школа – 2019. Материалы Всероссийской научной конференции. – № 25. – С. 158–159.
13. Щипцов В. В., Бубнова Т. П., Скамницкая Л. С., Гаранжа А. В., Ручёв А. М. Гранатовые руды Карелии. – Петрозаводск : КНЦ РАН, 2009. – 208 с.
14. Kretz R. Symbols for rock-forming minerals // American Mineralogist. – 1983. – Vol. 68. – P. 277–279.

## References

1. Afanas'ev V. P., Zinchuk N. N., Pokhilenko N. P. Morfologiya i morfogenez indikatornykh mineralov kimberlitov [Morphology and morphogenesis of kimberlite indicator minerals], Novosibirsk, SO RAN, Geo Publ., 2001, 276 p.
2. Belyshev A. K., Myasnikova N. F., Koverdyaev O. N., Tarasov A. N. Razrabotka tekhnologii obogashcheniya granatsoderzhashchego syr'ya [Development of technology for enrichment of garnet-containing raw materials], *Obogashchenie poleznykh iskopayemykh* [Enrichment of minerals], 2002, No 4, pp. 150–156. (In Russ.).
3. Vlasova E. A., Khmel'kov A. M. Morfogeneticheskie osobennosti granatov iz rossypi D'yukunakh, Yakutskaya almazonosnaya provintsia [Morphogenetic Features of Garnets from the Dyukunakh Placer, Yakutsk Diamond Province], *Rudy i metally* [Ores and Metals], 2021, No 1, pp. 106–112. (In Russ.).
4. Goliusova I. V. Optiko-mineralogicheskii analiz shlikhovykh i droblenykh prob [Optical-mineralogical analysis of concentrate and crushed samples], *Metodicheskie rekomendatsii NSOMMI No 162* [Methodological recommendations of NCSMOM No 162], Moscow, VIMS Publ., 2014.
5. Dumov A. V. Obogashchenie granatovykh rossypei Belogo morya [Enrichment of garnet places of the White Sea], *Obogashchenie rud* [Enrichment of Ores], 2018, No 3, pp. 21–25. (In Russ.).
6. Eremenko D. V., Eremenko A. V., Bondarenko S. V. Ispol'zovanie piropov dlya otsenki perspektiv almazonosnosti trubki 746-B Arkhangel'skoi almazonosnoi provintsii [Use of pyrope to determine the prospects of diatrema 746-B of Arkhangelsk diamond-bearing province], *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya* [Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology], 2015, No 3, pp. 59–64. (In Russ.).



7. Levchenko E. N. Prognozirovaniye tekhnologicheskikh svoystv titan-tsirkonievyykh rossypei Rossii [Forecasting technological properties of titanium-zirconium placers of Russia], Moscow, IMGRE Publ., 2007, 199 p.
8. Levchenko E. N., Ozhogina E. G. Optiko-mineralogicheskii analiz granatsoderzhashchego syr'ya [Optical-mineralogical analysis of garnet-containing raw materials], *Metodicheskie rekomendatsii NSOMMI No 201* [Methodical recommendations NCSMOM No 201], Moscow, VIMS Publ., 2020, 24 p.
9. Levchenko E. N., Solenikova E. O. Osobennosti mineral'nogo sostava granatsoderzhashchikh rossypei poberezh'ya Belogo morya, opredelyayushchie tekhnologiyu ikh pererabotki [Features of the mineral composition of garnet-containing placers of the coast of the White Sea, which determine the technology of their processing], *Razvedka i okhrana nedr* [Prospect and protection of mineral resources], 2021, No 10, pp. 69–75. (In Russ.).
10. Mel'nikova V. A. Osobennosti tekhnologicheskoi otsenki granatovogo syr'ya : magisterskaya dissertatsiya [Features of the technological assessment of garnet raw materials: master's dissertation], St. Petersburg, Institut nauk o Zemle Publ., 2016, 77 p.
11. Petrov S. V., Kazanov O. V., Goncharov S. V., Bakayev G. F., Borozdin A. P., Poslavskii S. V., Pestrikov A. A., Kondratyuk V. A., Shelukhina Yu. S. Rossypnoi tekhnicheskii granat – novyi vid mineral'nogo syr'ya Murmanskoi oblasti [Placer technical garnet – a new kind of mineral raw materials of the Murmansk region], *Trudy Fersmanovskoi nauchnoi sessii GI KNTs RAN* [Proceedings of the Fersman scientific session GI KSC RAS], 2019, pp. 466–472. (In Russ.).
12. Skorynin I. A., Yakovleva O. S., Khanin D. A., Anikin L. P. Novye dannye o granatakh iz rossypei bliz gory Soldatka, Ust'-Kamchatskogo raiona (Kamchatskii krai) [New data on garnets of placers near the mountain Soldatka, Ust-Kamchatka district (Kamchatka Krai)], *Ural'skaya mineralogicheskaya shkola – 2019. Materialy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii* [Ural Mineralogical School – 2019. Materials of the All-Russian Scientific Conference], No 25, pp. 158–159. (In Russ.).
13. Shchiptsov V. V., Bubnova T. P., Skamnitckaya L. S., Garanja A. V., Ruchiev A. M. Granatovye rudy Karelii [Garnet ores of Karelia], Petrozavodsk, KNTs RAN Publ., 2009, 208 p.
14. Kretz R. Symbols for rock-forming minerals, *American Mineralogist*, 1983, V. 68, pp. 277–279.

## Авторы

### Левченко Елена Николаевна

доктор геолого-минералогических наук  
заместитель генерального директора  
lev\_imgre@rambler.ru

### Соленикова Елена Олеговна

заведующая лабораторией  
минералогических исследований  
minlab.imgre@yandex.ru

ФГБУ «Институт минералогии, геохимии  
и кристаллохимии редких элементов»,  
г. Москва, Россия

## Authors

### Elena N. Levchenko

DrSc  
Deputy General Director  
lev\_imgre@rambler.ru

### Elena O. Solenikova

Head of the Laboratory  
of Mineralogical Research  
minlab.imgre@yandex.ru

Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystal Chemistry  
of Rare Elements (FSBI «IMGRE»),  
Moscow, Russia