

Научная статья

УДК 548.517

DOI: 10.31084/2619-0087/2022-1-3

К МЕХАНИЗМУ НАНОМЕТРИИ МИНЕРАЛОВ

Т. Т. Казанцева

*Институт геологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН,
450077, г. Уфа, ул. К. Маркса, 16/2, tt.kazantseva@gmail.com*

В наше время проявление значительного интереса к природным минеральным индивидам нанометрических размеров стало естественным и необходимым. Получила развитие и новая отрасль геологической науки — наноминералогия. Анализ накопленных по этой проблеме данных позволил говорить о двух способах образования природных кристаллов наноразмерности: а) кристаллизационном и б) деформационном. **Первый из них, кристаллизационный** — это естественное зарождение кристаллизации любого минерального индивида в свойственный ему начальный период. Высказываются убеждения в том, что наноразмеры имеют все кристаллические частицы — зародыши, и все минералы начинали свое развитие с нанокристаллов. Появление индивидов такого размера свойственно и начальным стадиям раскристаллизации вулканических стекол. Наноразмерные величины характерны, например, для опалов. **Второй способ — деформационный**, когда развитие геологического вещества обуславливается особенностями тектонической эволюции, его геодинамикой.

Ключевые слова: минералы, нанокристаллы, стадии, кристаллизация, деформация, зародыши, периоды, фазы развития, научные проблемы, минералогия, концепции

Благодарности: Публикация выполнена по государственной программе «Фундаментальные исследования. Эволюция палеогеодинамики Урала и прилегающих территорий на основе изучения состава, строения и палеомагнетизма их вещественно-структурных комплексов». Код (шифр) научной темы FMRS-2022–0013.

Original article

ON THE MECHANISM OF MINERAL NANOMETRY

T. T. Kazantseva

*Institute of Geology, Ufa Federal Research Center of RAS, 16/2, K. Marx St., Ufa, 450077, Russia,
tt.kazantseva@gmail.com*

In our time, the manifestation of significant interest in natural mineral individuals of nanometric dimensions has become natural and necessary. A new branch of geological science, nanomineralogy, has also been developed. An analysis of the data accumulated on this problem made it possible to speak of two ways for the formation of natural nanosized crystals: a) crystallization and b) deformation. The first of them, crystallization, is the natural origin of the crystallization of any mineral individual in its characteristic initial period. Convictions are expressed that all crystalline particles — germs — have nanosizes, and all minerals began their development from nanocrystals. The appearance of individuals of this size is also characteristic of the initial stages of recrystallization of volcanic glasses. Nanoscale

Для цитирования: Т. Т. Казанцева К механизму нанометрии минералов // Геологический вестник. 2022. № 1. С. 32–38. DOI: 10.31084/2619-0087/2022-1-3

For citation: T. T. Kazantseva. (2022) On the mechanism of mineral nanometry. *Geologicheskii vestnik*. 2022. No. 1. P. 32–38. DOI: 10.31084/2619-0087/2022-1-3

© Т. Т. Казанцева, 2022

values are characteristic, for example, of opals. The second way is deformational, when the development of geological matter is determined by the peculiarities of tectonic evolution, its geodynamics.

Keywords: minerals, nanocrystals, stages, crystallization, deformation, nuclei, periods, phases of development, scientific problems, mineralogy, concepts

Acknowledgments: The publication was made under the state program “Basic Research. Evolution of the paleogeodynamics of the Urals and adjacent territories based on the study of the composition, structure and paleomagnetism of their material-structural complexes. The code (cipher) of the scientific topic is FMRS-2022–0013.

В первом, кристаллизационном способе образования нанокристаллов, обосновываются убеждения в том, что нано размеры имеют все кристаллические частицы — зародыши, и все минералы начинали свое развитие с нанокристаллов. А появление индивидов такого размера свойственны даже начальным стадиям кристаллизации вулканических стекол. Известно, что нано значения нередко наблюдаются и в опалах.

А. М. Асхабов [2004], известный отечественный специалист в области научных проблем минералогии, предложил концепцию нанокристаллообразования, смысл которой сводится к существованию кватеронной фазы, когда вначале появляются кластеры. Структурирование минерального вещества до наночастиц происходит либо в процессе фазового перехода из жидкого или газообразного состояния в твердое, либо при последовательном уменьшении размеров до наноуровня.

В. В. Адушкин, С. Н. Андреев, С. И. Попель [2004] рассматривали кавитационный механизм формирования наноминералов, особенно в рудных телах, считая его «достаточно распространенным и важным физическим эффектом в процессах формирования нано- и микрочастиц в рудных месторождениях» (с. 364). Этот механизм предлагал Э. М. Галимов более тридцати лет назад, предсказав возможность синтеза алмазов кавитационным путем, а позже подтвердив это экспериментально [Галимов и др., 2004]. Суть его сводится к тому, что при быстром подъеме флюида из мантии к поверхности Земли по трещине переменного сечения происходит падение давления там, где трещина расширяется, в результате чего флюид расслаивается на жидкую и газовую фазу. Вторая из них существует в виде пузырьков. В тех же местах, где трещина становится значительно уже, давление вновь восстанавливается и происходит схлопывание пузырьков, вследствие чего выделяется энергия, вполне достаточная, например, для образования алмазов. Сжатие кавитационных пузырьков приводит к возрастанию давления в сотни килобар и температуры порядка десятков тысяч градусов, возникают сверхзвуковые кумулятивные микроструи

и ударные волны [Маргулис И. М., Маргулис М. А., 2000]. Как считают Л. Г. Филимонова с соавторами [2004] наночастицы муассанита и сопутствующие ему рудные минералы такой же размерности в рассеянной «многометальной» минерализации Дукатского рудного района на Северо-Востоке России сформировались этим способом.

Второй способ — деформационный, скорее всего, является естественным типом, без сомнения тектоническим по происхождению. Это объяснимо высокими плотностями избыточной свободной энергии и преобладанием участков выхода объёмных дефектов на поверхность (вакансии, дислокации и др.) [Вернон, 1980]. И даже при слабом упругом деформировании горных пород, равном 10^{-9} , что на несколько порядков меньше, чем при тектоно-сейсмической активации пород, формируются активные центры с величинами избыточной свободной энергии, превышающей на десятки и даже сотни кДж×моль⁻¹ ее фоновые значения. Тектонический путь рассмотрим на примере эволюции кластитов динамометаморфогенных структур — производных деформаций в условиях тектонических напряжений тангенциального сжатия. В специальной геологической литературе они давно известны как продукты низкотемпературного динамометаморфизма, однонаправленного давления (стресса). В зависимости от величины воздействующих тектонических напряжений мы расположили их в виде динамометаморфогенного ряда. Этот ряд начинается будинажем, к которому мы отнесли и довольно часто встречающиеся тектонические шаровые образования, впервые описанные нами в различных структурных зонах Южного Урала. Нарастает ряд брекчиями трения и катаклазитами, затем милонитами и филлонитами (милонит-филлитами). Как конечный продукт такого ряда мы рассматривали породы нанокристаллической структуры [Казанцева, 2008].

Отличительной особенностью минеральных нанокристаллов является малая кристаллографичность их форм, отсутствие плоских граней, прямолинейных ребер и вершин. Они агрегируются без слияния. Вероятно, сказанное следует из из-

вестного положения о том, что хороший контакт двух твердых поверхностей ведет к уменьшению значения поверхностной энергии примерно в 3 раза по сравнению с ее величинами для свободной поверхности [Мартин, Доэрта, 1978]. В то же время на стыках трех и четырех зерен значения поверхностной энергии возрастают в несколько раз. Кроме того, в наноминералах проявляются особые механические, оптические, магнитные и другие свойства. Часто они зависят от среды, в которой находятся. Так, свойства наночастиц золота в вакууме, на воздухе значительно отличаются от тех, что заключены в сульфидах.

Будинажем принято называть раздавливание, развальцевание либо разлинзование пластов горных пород с низкой пластичностью, за счет которых образуются жесткие блоки и линзы — будины, связанные между собой перешейками и слоями пластичного материала. Это широко распространенное явление в зонах тектонических нарушений, возникающее при однонаправленном действии тектонических сил. Выделяют несколько разновидностей будинажа, отвечающих последовательным стадиям усложнения геодинамических условий. *Эмбриональный* будинаж характеризуется неполным разрывом жестких пластов. Будины его соединены шейками или разделены небольшими трещинами, но не изолированы друг от друга. *Блоковый* будинаж, когда будины представлены отдельными блоками, часто остроугольной формы. *Нормальный* будинаж, будины в котором значительно разобщены и имеют бочонкообразную форму. *Линзовый* будинаж с будинами линзовидного облика, иногда растащенными на значительное расстояние друг от друга. К конечному виду мы отнесли *шаровый* будинаж, описанный нами ранее как тектонические шаровые образования [Казанцева, Камалетдинов, 1977].

Направленное давление способствует образованию и *брекчий трения*, локализованных преимущественно в зонах тектонических нарушений довольно жестких пород, при малом количестве пластичного материала, либо его полном отсутствии. Потому, брекчии трения состоят из обломков пород обычно угловатой формы, сцементированных также обломками пород и минералов, значительно меньшей размерности.

Катаклиз — следующий тип деформационных структур динамометаморфизма. Он возникает также при низкой температуре и влиянии более масштабного направленного тектонического давления. Его производными являются катаклазиты.

Минералы в них ведут себя как хрупкие тела. От брекчий трения они отличаются большей раздробленностью первичного материала и повышенной деформированностью внутреннего строения минералов, иногда наличием мелкогранулированной полиминеральной связующей массы (цемента). В зависимости от состава пород, за счет которых катаклазиты возникли, различают их виды, соответствующие названиям изначальных пород.

Кластической структурой динамометаморфогенного ряда обладают и *милониты*. Они возникают при еще более интенсивном одностороннем давлении также в зонах тектонических нарушений. Это тонко перетертая порода, микроскопическая брекчия с отчетливо выраженной сланцеватостью (текстурой тектонического течения), измолотый, мелко раздробленный цемент которой бывает частично раскристаллизован. Данная порода весьма плотная. Развитию её способствуют неоднократные и разнонаправленные движения по поверхностям надвигов и сдвигов. При крайней степени развальцевания возникают ультрамилониты — полосчатые породы афанитового облика, напоминающие *фельзиты*. Милониты от катаклазитов отличаются большей степенью дробления и развитием сланцеватости, хотя обломки вторых довольно часто приобретают груболинзовидную, удлиненную в одном направлении форму. Еще более тонко измолотые породы, чем милониты, с полной либо частичной перекристаллизацией отдельных минералов, ростом пластинок либо чешуек слюды и хлорита, с образованием агрегатов мелких зерен кварца и кальцита, называют *филлонитами*. Их именуют филлит-милонитами или листоватыми милонитами. Характерной особенностью структуры филлонитов под микроскопом является отчетливо выраженная сланцеватость, образующая множество самостоятельных линзочек, каждая из которых имеет свой собственный узор. Потому пластинчатые минералы в филлонитах сосредоточены либо в реликтовой сланцеватости, либо располагаются поперек неё.

В зонах развития тектонических нарушений, преимущественно в жестких породах, обнаруживаются и образования микронной размерности. Они известны в виде узких полосок и небольших линзочек и в милонитах, имеют скрытокристаллический, стекловатый облик и поэтому ранее истолковывались как частично переплавленный тонкораздробленный материал. Это псевдотахилиты (в отличие от тахилитов — вулканического стекла базальтового состава). Рентгенометрический анализ позволил обнаружить в них криптокри-

сталлическую структуру измельченного материала основной породы, без следов переплавления. Ю. Ир. Половинкина [1966] описала штуфы чарнокита, в которых по трещинкам (местами пересекающими породу так густо, что образуются участки брекчий), идущим в направлении сжатия и истирания породы, развиты рассматриваемые образования. По сути дела природные нанокристаллические структуры — это следствие деформирования жестких, не пластичных геологических тел в зонах высокой локализации больших тектонических напряжений сжатия.

В плане изложенного намечаются некоторые закономерности эволюции динамометаморфогенного ряда. Они таковы. При возрастании направленного тектонического давления в зонах разрывных нарушений последовательно увеличивается степень дробления жестких пород, сланцеватости и полосчатости — пластичных. В первых все меньше становится размер обломков, но выше плотность и твердость породы. Во-вторых — проявляется и последовательно возрастает пластическое течение вещества.

Структуры динамометаморфогенного ряда следует относить к тектонитам. При развитии тех типов метаморфизма, в которых одностороннее давление не проявляется (метасоматизм, контактовый метаморфизм и пр.) тектониты не возникают.

Считается, что при одновременном воздействии одностороннего и гидростатического давлений возникает динамотермальный метаморфизм и, что избыточность первого по отношению ко второму приводит к повышению температуры. Так возникают пластические деформации. Но еще Кулон высказывал убеждение, что пластические деформации являются следствием развития сдвига, а позже Сен-Венан считал, что в сложном напряженном состоянии деформированное тело приобретает пластическое состояние, когда в нем касательное напряжение достигает некоторого предельного значения (предел текучести по сдвигу). Пластическая деформация сопровождается выделением тепла и закономерной ориентацией зерен. Горные породы нередко текут (кливаж течения), образуя причудливые складки. Среди текстур динамотермального метаморфизма наиболее типичны сланцеватые и полосчатые. Но сланцеватость, как уже было отмечено, возникает уже в милонитах, и даже в некоторых видах катаклизитов и без дополнительного проявления термального режима, только под влиянием деформаций и перекристаллизации. Последнее является залогом того, что термальный

режим может быть производным и согласованным с постепенным увеличением сланцеватости и пластичности. В этом случае не требуется дополнительно гидростатического давления, либо погружения толщ на значительную глубину.

Итак, природные породные системы при приложении направленного тектонического давления ведут себя в соответствии с их литологическим составом, структурными особенностями и физическими характеристиками. Преимущественно пластичные породы (аргиллиты и алевролиты, а также тонкозернистые песчаники) преобразовываются в сланцеватые и тонкополосчатые образования, с хорошо выраженной слоистостью (переменяемость хрупких и пластичных разновидностей), последовательно подвергаются будинажу, катаклазу, милонитизации. Массивные породы, хрупкие, дают начало тектоническим брекчиям с различной размерностью кластического материала (от весьма грубых до микроскопических) без повышения температуры. Именно в этом типе пород конечным продуктом динамометаморфогенного ряда в условиях весьма интенсивных направленных тектонических давлений могут формироваться и нанокристаллы.

Что же касается искусственного способа получения нанокристаллов, то ему продолжает уделяться всё больше внимания. Вероятно, в основе его лежит открытие начала прошлого века. Уже тогда было известно, что при деформации твердых тел на плоскостях скольжения возникают слои, обладающие подвижностью. Они ведут себя подобно жидкости. Появилась концепция «третьего тела», которое представляет собой приповерхностные слои двух исходных, подверженных трению. Такая новообразованная пленка, существуя очень короткое время, затвердевает и становится весьма прочной. Теоретические и экспериментальные исследования в области сверхпластичности материалов, направленные на изучение наноструктур, удивительным образом согласуются и с теми знаниями процессов динамометаморфизма, деформационных структур природной геологической среды, о которых мы сказали выше. В подтверждение этого сошлемся на некоторые положения, приведенные в трудах Международной научной конференции, посвященной 15-летию Института проблем сверхпластичности металлов РАН. По сути рассматриваемой проблемы в плане тектонических представлений на процессы сверхпластичного минералообразования, следует помнить важнейшее участие выдающегося башкирского ученого,

основателя и директора Института проблем сверхпластичности металлов Российской Академии наук, академика АН РБ и первого её Президента **Оскара Акрамовича Кайбышева**.

Мы давно и многократно излагали свои представления о мегациклическом характере формирования земной коры. При этом каждый мегацикл представлялся двумя стадиями: стадия растяжения или рифтогенно-спрединговая, и стадия сжатия, или геосинклинальная в теории геосинклиналей, субдукции, аккреции и коллизии — в новой глобальной тектонике, тектонического взаимодействия гетерогенных кор — в шарьяжно-надвиговой теории. В соответствии с нашими представлениями, стадия растяжения начинается континентальным рифтогенезом, постепенно преобразующимся в океанический. Заложение рифтов связано с разрывом сплошности толщ, деструкцией континентальной коры. Океанический рифтогенез сопровождается формированием коры, состоящей из гипербазитов, габброидов и пелагических кремней. Их развитие обладает циклическостью и эволюционной направленностью. Смена стадий обуславливается изменением знака тектонических напряжений. Из чего следует, что стадия — это геотектонический период с геодинамическими условиями одного знака, в течение которого формируется земная кора (океаническая — в стадию растяжения, а континентальная — в стадию сжатия) (табл. 1).

В стадию сжатия наращивается новый сегмент континентальной коры. Это происходит за счет тектонического взаимодействия двух разнородных кор ранее образованного континента и сопредельного ему океана. Накапливались осадочно-вулканогенные формации с эволюционной направленностью состава и строения. Потому стадию сжатия мы и назвали стадией тектонического взаимодействия

гетерогенных кор или шарьяжно-надвиговой теории формирования земной коры. Процессы здесь также протекают циклично. При этом каждая стадия представлена одним или несколькими тектоническими циклами.

Тектонический цикл рифтогенно-спрединговой стадии является результатом нового импульса растяжения. Геологического взаимодействия гетерогенных кор — обусловлен очередным надвиганием блока океанической коры на континентальную [Казанцева, 2016].

Из сказанного следует, что формирование структуры ультрамелкозернистых материалов (нанокристаллических, со средним размером зерен около 10 нм, и субмикроструктурных, со средним размером зерен около 100 нм) приводит как к существенному изменению физических (механических, тепловых, электрических, магнитных, диффузионных) свойств, так и к фазовым переходам. Поведение субмикроструктурного материала во многом обусловлено большой объемной долей границ зерен, что лежит в основе низкотемпературной сверхпластичности. Здесь действуют три микромеханизма: зернограничное проскальзывание, внутризерновое дислокационное скольжение и диффузионная ползучесть. Основным механизмом сверхпластической деформации — зернограничное проскальзывание. Наиболее существенное измельчение микроструктуры до размеров, близких к нанокристаллам, получено в результате интенсивной деформации при комнатной температуре на наковальне Бриджмена. Формирование нанокристаллической структуры осуществляется в несколько стадий. На начальной стадии деформации формируется ячеистая структура. Также развиваются полосы грубого скольжения сначала в одном ($e = 2.5$), а с увеличением степени дефор-

Таблица 1 Ранговые подразделения геологического вещества, их соответствие уровням тектонической периодизации и геотектоническому режиму

Table 1 Rank divisions of geological matter, their correspondence to the levels of tectonic periodization and geotectonic regime

Ранги геологического вещества	Уровни тектонической периодизации	Режим
Минерал порода		Термодинамический
<i>Формация</i> <i>Формационная серия</i> <i>Формационный ряд</i> <i>Комплекс формационных рядов</i> <i>Сегмент земной коры</i>	<i>Геотектоническая фаза</i> <i>Геотектонический этап</i> <i>Геотектонический цикл</i> <i>Геотектоническая стадия</i> <i>Цикл Вильсона</i>	<i>Геодинамический региональный</i> <i>Глобальный геодинамический</i>

мации ($e = 3.5$) в двух направлениях. При степени деформации $e = 4.5-5.5$ происходит трансформация ячеек в зерна со средним размером 30–40 нм [Современное состояние..., 2000, с. 242–243]. При этом уровень твердости нанокристаллов увеличивается в 2 раза по сравнению с исходным состоянием.

Как видим, геодинамический механизм, а также стадийность формирования природных деформационных макроструктур динамометаморфизма и наноструктур, получаемых искусственно в результате интенсивной деформации, вполне сопоставимы.

Сказанное позволяет надеяться, что вещественные геологические тела (минералы, породы) могут быть шире вовлечены в сферу нанотехнологии.

Мы неоднократно обращали внимание на тот факт, что структурная составляющая любой вещественной геологической системы позволяет расшифровывать геодинамические условия ее формирования. Показали, что это в полной мере относится и к рудным телам [Казанцева, Казанцев, 2006]. Продукты динамометаморфизма, широко развитые во многих рудодобывающих карьерах, также содержат ценную информацию о процессе рудообразования, хорошо согласующуюся с открытием пятидесятих годов прошлого столетия Д. Н. Гаркунова и И. В. Крагельского эффекта избирательного атомарного переноса, когда из взаимодействующих веществ в контактную пленку переходят те или иные химические элементы в чистом виде. В первых их опытах это была медь из бронзы. Родились представления о механохимических процессах в земной коре и рождении новых минеральных залежей в зонах разломов. Такая залежь, как считают Н. Б. Хахаев и Л. Д. Цветков (1995) обнаружена в разрезе Кольской сверхглубокой скважины на глубине 9500–9700 м, где присутствуют концентрации самородного золота, серебра и других металлов. В свете активного участия динамометаморфизма в процессе рудообразования актуальны также исследования начала двадцать первого века О. А. Кайбышева, а также С. Н. Фаизовой и А. В. Корневой [2000], показавших, что активация диффузионных потоков усиливается под влиянием механизмов деформирования. По их данным, в результате зернограничного проскальзывания происходит перераспределение химических элементов, в частности, в сплаве Zn и Al в сплаве Zn-22%Al, при котором первый, являясь более активным по сравнению со вторым, концентрируется вдоль поверхностей деформационных зон.

Список литературы:

- Адушкин В. В., Андреев С. Н., Попель С. И.* Кавитационный механизм формирования нано- и микрочастиц минералов в рудных месторождениях // Геология рудных месторождений. — 2004. — Т. 46. — № 5. — С. 363–370.
- Асхабов А. М.* Кластерная (кватеронная) самоорганизация вещества на образование кристаллических и некристаллических материалов // Записки всероссийского минералогического общества. — Ч. СXXXIII. — № 4. — 2004. — С. 108–123.
- Вернон Р. Х.* Метаморфические процессы. — М.: Наука, 1980. — 227 с.
- Галимов Э. М., Кудин А. М., Скоробогатский А. С.* Экспериментальное подтверждение синтеза алмаза в процессе кавитации // Докл. РАН, 2004. — Т. 395. — № 2. — С. 187–191.
- Кайбышев О. А.* Современное состояние теории и практики сверхпластичности материалов // Труды международной научной конференции посвященной 15-летию Института проблем сверхпластичности металлов РАН. — Уфа: Гилем. — 2000. — 245 с.
- Казанцева Т. Т.* О геодинамическом принципе эволюции геовещества в шарьяжно-надвиговой теории формирования земной коры // Известия Уфимского научного центра РАН. — 2016. — № 3. — С. 82–89.
- Казанцева Т. Т.* От будин — к нанокристаллам // Вестник АН РБ. — 2008. — Т. 13. — № 4. — С. 11–18.
- Казанцева Т. Т., Камалетдинов М. А.* Тектонические шары в породах Южного Урала // Геологическое строение и нефтеносность Башкирии. — Уфа: БФАН СССР, 1977. — С. 46–49.
- Казанцева Т. Т., Казанцев Ю. В.* Рудообразование в структурном аспекте // Вестник АН РБ. — Уфа: Гилем, 2006. — Т. 11. — № 3. — С. 11–23.
- Мартин Дж., Доэрта Р. М.* Стабильность микроструктуры металлических систем. — Атомиздат, 1978. — 280 с.
- Маргулис И. М., Маргулис М. А.* Динамика одиночного кавитационного пузырька // Журн. физической химии. — 2000. — Т. 74. — № 3. — С. 263–287.
- Половинкина Ю. Ир.* Структуры и текстуры метаморфических пород. Т. II. Метаморфические породы. — М.: Недра, 1966. — 272 с.
- Фаизова С. Н., Корнева А. В.* Взаимовлияние механизмов деформации при сверхпластичном течении сплава Zn-22%Al // Труды международной конференции «Современное состояние теории и практики сверхпластичности материалов» посвященной 15-летию Института проблем сверхпластичности металлов РАН. — Уфа: Гилем, 2000. — С. 151–156.
- Филимонова Л. Г., Трубкин Н. В., Бортников Н. С.* Наночастицы муассанита из рассеянной минерализации Дукатского рудного района (Северо-Восток России) // Докл. РАН. — 2004. — Т. 394. — № 4. — С. 540–543.

References:

- Adushkin V. V., Andreev S. N., Popel S. I.* Kavitatsionnyi mekhanizm formirovaniya nano- i mikrochastits mineralov v rudnykh mestorozhdeniyakh [Cavitation mechanism of formation of nano- and microparticles of minerals in ore deposits] // *Geology of ore deposits*. 2004. Vol. 46. No. 5. P. 363–370.
- Askhabov A. M.* Klasternaya (kvataronnaya) samoorganizatsiya veshchestva na obrazovanie kristallicheskikh i nekrystallicheskikh materialov [Cluster (quaternary) self-organization of matter for the formation of crystalline and non-crystalline materials] // *Notes of the All-Russian Mineralogical Society*. Ch. CXXXIII. No. 4. 2004. P. 108–123.
- Vernon R. H.* Metamorficheskie protsessy [Metamorphic processes]. M.: Nauka, 1980. 227 p.
- Galimov E. M., Kudin A. M., Skorobogatsky A. S.* Eksperimental'noe podtverzhdienie sinteza almaza v protsesse kavitatsii [Experimental confirmation of diamond synthesis during cavitation] // *Dokl. RAS*, 2004. Vol. 395. No. 2. P. 187–191.
- Kaibyshev O. A.* Sovremennoe sostoyanie teorii i praktiki sverkhplastichnosti materialov [The current state of the theory and practice of superplasticity of materials] // *Proceedings of the international scientific conference dedicated to the 15th anniversary of the Institute of Problems of Superplasticity of Metals of the Russian Academy of Sciences*. Ufa: Gilem. 2000. 245 p.
- Kazantseva T. T.* O geodinamicheskom printsipe evolyutsii geoveshchestva v shar'yazhno-nadvigovoi teorii formirovaniya zemnoi kory [On the geodynamic principle of the evolution of geo-matter in the thrust-thrust theory of the formation of the Earth's crust] // *Izvestiya Ufa Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2016. No. 3. P. 82–89.
- Kazantseva T. T.* Ot budin — k nanokristallam [From budin to nanocrystals] // *Bulletin of the Academy of Sciences of the Republic of Belarus*. 2008. Vol. 13. No. 4. P. 11–18.
- Kazantseva T. T., Kamaletdinov M. A.* Tektonicheskie shary v porodakh Yuzhnogo Urala [Tectonic balls in rocks of the Southern Urals] // *Geological structure and oil content of Bashkiria*. Ufa: BFAN USSR, 1977. P. 46–49.
- Kazantseva T. T., Kazantsev Yu. V.* Rudoobrazovanie v strukturnom aspekte [Ore formation in a structural aspect] // *Bulletin of the Academy of Sciences of the Republic of Belarus*. Ufa: Gilem, 2006. Vol. 11. No. 3. P. 11–23.
- Martin J., Doerta R. M.* Stabil'nost' mikrostrukturnykh metallicheskikh sistem [Stability of the microstructure of metal systems]. Atomizdat, 1978. 280 p.
- Margulis I. M., Margulis M. A.* Dinamika odinichnogo kavitatsionnogo puzyr'ka [Dynamics of a single cavitation bubble] // *Journal of Physical Chemistry*. 2000. Vol. 74. No. 3. P. 263–287.
- Polovinkina Yu. Ir.* Struktury i tekstury metamorficheskikh porod [Structures and textures of metamorphic rocks]. Vol. II. Metamorphic rocks. M.: Nedra, 1966. 272 p.
- Faizova S. N., Korneva A. V.* Vzaimovliyaniye mekhanizmov deformatsii pri sverkhplastichnom techenii splava Zn-22%Al [Mutual influence of deformation mechanisms during the superplastic flow of the Zn-22%Al alloy] // *Proceedings of the international conference "Current state of the theory and practice of superplasticity of materials" dedicated to the 15th anniversary of the Institute of Problems of Superplasticity of Metals of the Russian Academy of Sciences*. Ufa: Gilem, 2000. P. 151–156.
- Filimonova L. G., Trubkin N. V., Bortnikov N. S.* Nanochastitsy muassanita iz rasseyannoi mineralizatsii Dukatskogo rudnogo raiona (Severo-Vostok Rossii) [Moissanite nanoparticles from scattered mineralization of the Dukatsky ore region (North-East of Russia)] // *Dokl. RAS*. 2004. Vol. 394. No. 4. P. 540–543.

Сведения об авторе:

Казанцева Тамара Тимофеевна, доктор геолого-минералогических наук, академик АН РБ, главный научный сотрудник Института геологии УФИЦ РАН, Россия, 450006, г. Уфа, ул. Карла Маркса, д. 16/2., Тел.: 8 (347) 272 7636, tt.kazantseva@gmail.com

About the Author:

Kazantseva Tamara Timofeevna, Dr. of Geological and Mineralogical Sciences, Academician of the Academy of Sciences of the Republic of Belarus, Chief Researcher of the Institute of Geology of the Ural Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Russia, 450006, Ufa, st. Karl Marx, 16/2., Tel.: 8 (347) 272 7636, tt.kazantseva@gmail.com

Статья поступила в редакцию 02.03.2022; одобрена после рецензирования 03.03.2022; принята к публикации 23.03.2022

The article was submitted 02.03.2022; approved after reviewing 03.03.2022; accepted for publication 23.03.2022