

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 4. С. 143–160.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2023; 25 (4): 143–160.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 549.642 + 544.03 + 54.057

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-143-160

EDN: DFORMM

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Анатолий Васильевич Мананков^{1,2}, Валентин Михайлович Яковлев¹,
Александр Андреевич Локтюшин², Евгений Яковлевич Горюхин³

¹Национальный исследовательский

Томский государственный университет, г. Томск, Россия

²Томский государственный

архитектурно-строительный университет, г. Томск, Россия

³Томская комплексная геологоразведочная экспедиция, г. Томск, Россия

Аннотация. Актуальность. Силикатные материалы традиционно занимают важное место в материаловедении, несмотря на непрерывно меняющиеся запросы технологии. Совершенствование материалов требует развития теории. Обширный опыт, накопленный технической и экспериментальной минералогией, не всегда согласуется с традиционными представлениями, а иногда и совсем не находит в них объяснения. Такая ситуация возникла при попытке описания аномально высоких кинетических параметров диффузии и кристаллизации в стеклах и ситаллах. Поиск решения проблемы привел к использованию наиболее общих законов естествознания – теории колебаний и волн.

В условиях неравновесной кристаллизации в искусственных силикатных системах авторами установлен механизм спинодального распада, который позднее нашел подтверждение в вулканических стеклах Земли и Луны, а также в тектитах. Развиваемая авторами модель пространственно-замкнутых динамических структур адекватно учитывает кинетику фазовых превращений, когда формирование продуктов ликвации (молекулярных кластеров) и связей между ними имеет резонансную природу.

Результаты. Создан новый класс многофункциональных материалов с необычным сочетанием физических и химических свойств. Синтетические метасиликаты уже нашли около трех десятков новых технологических применений: в медицине (хирургии, стоматологии), в производстве бытовой и аэрокосмической техники, в материаловедении (в качестве модифицирующих добавок в керамику, полиэтилен, линолеум, асфальт), в виде жаропрочной, износостойкой футеровки, золо- и шлакопроводов. Показана экономическая эффективность ситаллов на примере федерального проекта «Северный широтный ход».

Ключевые слова: промышленные отходы, спинодальный распад, изоморфизм, автоинтерференция, когерентность, резонанс, сикам, петро-шлакоситаллы, метасиликаты

Для цитирования: Мананков А.В., Яковлев В.М., Локтюшин А.А., Горюхин Е.Я. Новые возможности многофункциональных материалов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 4. С. 143–160. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-143-160. EDN: DFORMM

ORIGINAL ARTICLE

NEW OPPORTUNITIES OF MULTIFUNCTIONAL MATERIALS

Anatoly V. Manankov^{1,2}, Valentin M. Yakovlev¹,
Aleksandr A. Loktyushin², Evgeniy Ya. Gorukhin³

¹National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

²Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

³Tomsk Complex Exploration Company, Tomsk, Russia

Abstract. Silicate materials traditionally occupy an important place in materials science, despite the ever-changing demands. The improvement of materials requires the development of theory. The extensive experience accumulated by technical and experimental mineralogy does not always agree with traditional ideas and, sometimes, does not find an explanation in them at all. Such a situation arises in trying to describe the anomalously high kinetic parameters of diffusion and crystallization in glass and ceramics. The search for a solution to the problem leads to the use of the most general laws of natural science, the theory of oscillations and waves. Under the conditions of nonequilibrium crystallization in artificial silicate systems, the mechanism of spinodal decomposition is found, which is later confirmed in volcanic glasses of the Earth and Moon as well as in tektites. The proposed model of spatially closed dynamic structures takes into account the kinetics of phase transformations, when the formation of segregation products (molecular clusters) and bonds between them is of a resonant nature. As a result, a new class of multifunctional materials with an unusual combination of physical and chemical properties is created. Synthetic metasilicates masters about three dozen new technological applications in medicine (surgery, dentistry), household production, and aerospace equipment, materials science (modifying additives in ceramics, polyethylene, linoleum, asphalt), heat- and wear-resistant lining, gold and slag pipelines. The economic efficiency of glass ceramics is shown on the example of the Federal Project The Northern Latitudinal Railway.

Keywords: industrial waste, spinodal decomposition, isomorphism, self-interference, coherence, resonance, petrological slag glass-ceramics, metasilicates

For citation: Manankov A.V., Yakovlev V.M., Loktyushin A.A., Gorukhin E.Ya. New opportunities of multifunctional materials. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (4): 143–160. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-143-160. EDN: DFORM

Введение

Кристаллизация стекол метасиликатного состава в сильно неравновесных условиях сопровождается иногда визуально наблюдаемыми эффектами перераспределения примесных фаз. Параметры их смещения на несколько порядков превышают рассчитанные из теоретических представлений о диффузии. На основе установленного в экспериментальной минералогии факта, что связи между слагающими частицами вещества (атомами, молекулами) имеют электромагнитно-волновую природу [1, 2], создана голографическая модель вещества (ГМВ). ГМВ построена на отождествлении геометрических образов (характеристические или топологические линии поверхности тора) с физическими реалиями в виде силовых линий напряженности электромагнитного поля [3]. Ряд экспериментов показывает, что вещество для своего существования не требует никакой специфической субстанции кроме электромагнитного поля. Для суще-

ствования электромагнитного поля, как это следует из основных уравнений электродинамики, требуется только пространство. В экспериментах физики высоких энергий установлено, что элементарные частицы и античастицы порождаются электромагнитным полем, а их аннигиляция не оставляет ничего кроме поля. Таковы факты, все остальное – на уровне гипотез либо заблуждения. Что касается поля, то указания на то, что вещество является особым состоянием пространства, содержатся уже в работах Эйлера по механике сплошных сред. Уравнения Эйлера тождественны уравнениям электродинамики Максвелла. Из сопоставления теорий Эйлера и Максвелла следует, что электромагнитное поле является «деформацией» пространства.

Поле в пустоте описывается парой комплексных деформаций. В механике это растяжение и сдвиг. В электродинамике этим деформациям соответствуют электрическая и магнитная напряженность поля. Ортогональность комплексных компонент поля приводит к тому, что их скалярное (вещественное) произведение равно нулю, но векторное произведение дает вектор, имеющий смысл механического импульса, названный вектором Умова – Пойнтинга:

$$\vec{E} = \vec{H} \cdot \vec{P},$$

где \vec{E} – электрическая напряженность; \vec{H} – магнитная напряженность; \vec{P} – механический импульс (вектор Умова – Пойнтинга) электромагнитного поля.

Импульс P введен в электродинамику при анализе баланса энергии электромагнитного поля. Поэтому поле характеризуется не парой векторов, а тройкой, что и подтверждает великий смысл тернарности, тройственной единственности и обусловленности причин и следствий. Специфика вектора P по сравнению с векторами смещений и вращений в классических теориях упругости и электродинамики – вектор импульса не замкнут. При этом любая пара из них является причиной третьего. То есть все эти три вектора в некотором смысле эквивалентны, а детерминизм несколько отличен от классического. Эти векторы способны становиться компланарными, когда принадлежат одной или параллельным плоскостям.

Основные трудности в освоении модели ГМВ в нашей стране (в отличие от зарубежья) во многом связаны с заблуждениями в компланарности векторов. Вектор Умова – Пойнтинга, отвечающий за перенос энергии электромагнитного поля, имеет не только радиальную компоненту, которая характерна для потока энергии изменяющегося со временем источника вдали от источника (в волновой зоне). В ближней зоне вектор P трансформируется преимущественно в поток излучения, ортогональный радиальному направлению. Необходимое и достаточное условие компланарности трех векторов в пространстве основано на понятии смешанного произведения векторов [4, 5].

К любому из векторов электромагнитного поля могут быть применены дифференциальные операторы. В случае, когда значение механического импульса не равно нулю ($\text{rot} \neq 0$), имеет место пространственно локализованный электромагнитный объект со свойствами, соответствующими и элементарной частице. Замыкание контура механического импульса rot стабильной (не виртуальной) частицы осуществляется на поверхности тора, что, в соответствии с теоремой А. Ляпунова, является наиболее устойчивой конфигурацией поля.

Оно означает рождение частицы или пространственно обособленного объекта с моментом импульса. Момент импульса, как и сам импульс, – параметры (свойства) объекта с массой, которую измеряют при взвешивании.

Структуры волновых пространственно-замкнутых (локализованных) объектов в виде решеток пересекающихся силовых линий, взаимодействуя с подобными, порождают в результате интерференции их полей пространственно-замкнутые динамические структуры следующих уровней организации вещества.

В основе научных и технологических решений, представленных в настоящей работе, лежат принципы ГМВ [3]. Собственно, ГМВ является обобщением опыта экспериментальной работы сотрудников лаборатории кинетики и кристаллофизики НИ ТГУ с 1972 г. По сути, голографическая модель вещества нашла применение и для решения методологических проблем общенаучного характера, и для развития естественно-научной картины мира и природы мироздания.

В конце XX в. в материаловедении практически параллельно получили развитие формализованные статистические приемы термодинамики, квантовой химии, а также достаточно новые научные направления: неравновесной термодинамики, синергетики, макрокинетики и теории фракталов. Общим недостатком этих направлений, при несомненных достоинствах, является отсутствие достаточно наглядных образов физической картины описываемых явлений и процессов. В науке формирование как общего мировоззрения, так и специальных дисциплинарных мировоззренческих представлений всегда опиралось на наглядные образы как наиболее соответствующие реально наблюдаемому Порядку Вещей и Гармонии Мира в целом и в деталях [3].

Структурированные системы являются динамическими голограммами, устойчивость которых определяется понятиями временной и пространственной когерентности. Поскольку стабильное вещество представляется в ГМВ гармоническим волновым пространственно-замкнутым пакетом, то процессы взаимодействия и химических связей надатомных структур в конденсированных средах должны иметь резонансный характер [6]. Подтверждением верности подхода явилось совпадение реальных структур ряда кристаллов с пространственными решетками и эксперименты авторов по кинетике фазовых превращений [7, 8, 9, 10].

Поскольку области конструктивной интерференции каждого «набора» векторов в пространстве не совпадают или не вполне совпадают, то структура динамической голограммы может отвечать трем типам когерентности: электрической, магнитной и механической. Известны и элементарные возбуждения, ответственные за каждый тип когерентности – это, помимо электронов, магноны (обменные взаимодействия) и фононы (упругие взаимодействия). Вероятно, выделить систему с «чистым» типом когерентности невозможно, но далее по мере усложнения структур появляется еще четыре смешанных типа (табл. 1).

Первые шесть типов когерентности представляют собой неорганические материалы, начиная с ионных кристаллов. Седьмой тип относится к биологическим, органоминеральным и минеральным объектам, когерентность которых основана на всех трех типах взаимодействий. В самом деле, специфика живых клеток позволяет полагать, что структурозадающим началом являются протоны и совместные решетки групп протонов. Эта специфика находит свое

отражение как в характерных размерах клеток, так и их симметрии. С другой стороны, для ГМВ реализация интерференционных решеток, образованных поверхностями высших порядков, совершенно естественна. Поэтому морфологические признаки являются проявлением не некой дефектности, а выражением самой микроструктуры минерала. Решетки, образованные поверхностями высших порядков, проявляются в морфологических признаках, весьма схожих с морфологией биологических объектов. Широко известны «растительные» корни терминов в минералогии (перисто-, листообразность, дендриты и т. п.). Очень часто почти идеальные кристаллы минералов встречаются в форме плодов и семян. Более того, отмечается для кристаллов алмазов не только их выпуклогранная форма, подобная форме семени, но и наличие волокнистых оболочек, делающих это морфологическое родство.

Таблица 1

Типы когерентности и общая классификация материалов

Table 1

Coherent types and classification of materials

№ п/п	Тип когерентности	Структурный класс материалов
1	Электронная (Э)	Ионные кристаллы
2	Магنونная (М)	Металлы
3	Фоновая (Ф)	Стекла
4	Электронно-магنونная (Э-М)	Полупроводники
5	Электронно-фононная (Э-Ф)	Стеклокристаллические (ситаллы, каменное литье, керамика)
6	Магнноно-фононная (М-Ф)	Металлические стекла
7	Электронно-магнноно-фононная (Э-М-Ф)	Живые, органоминеральные, минеральные

Сегодня традиционная аналитическая техника хорошо «различает» только электронные взаимодействия и структуры электронного типа когерентности. Нелинейность структуры иногда отслеживается по аномалиям ширины дифракционных рефлексов, но для описания реальных структур нужны методы для изучения поверхностей высших порядков.

Создание резонансно-информационной методологии в материаловедении

В природе реальные объекты, располагающиеся строго периодически по волновым принципам, встречаются повсеместно в явлениях самого несопоставимого масштаба – от космических до микроскопических. Участие в них низкоэнергетического протонирования подтверждается новыми теориями. Одна из них – электронно-протонная теория – фундаментальная основа физико-химических процессов выщелачивания оксидных минералов в гидрометаллургии, при обработке алмазов, других ювелирных минералов [11, 12, 13].

Первое представление о мире как о голограмме, подтвердившее более ранние результаты экспериментов авторов настоящей статьи, появилось в кван-

товой механике в результате фундаментального открытия XX в. – корпускулярно-волнового дуализма [3]. Оно принадлежит ученым-физикам Д. Бому и К. Прибраму, чьи идеи потрясли незыблемость рационализма [14]. Группа ученых в 1982 г. при университете в Париже стала известна благодаря открытию, которое считается наиболее значительным в XX в.: элементарные частицы, например протоны, в определенных условиях способны мгновенно сообщаться друг с другом независимо от расстояния между ними [15]. Проблема этого открытия в том, что оно нарушает постулат Эйнштейна о предельной скорости распространения взаимодействия. В дальнейшем развитием волновой идеи занимался М. Талбот и другие ученые и философы [16]. Эти выдающиеся исследования принесли заслуженное признание зарубежным ученым, хотя ещё в 1996 г. авторы настоящей статьи опубликовали результаты своих исследований в монографии [3].

Формированию голографических идей в нашей стране способствовали открытия астрофизика Н.А. Козырева в планетологии и теории времени [17]. Профессор кафедры минералогии ТПУ А.М. Кузьмин более 30 лет изучал волновые структурные проявления и в 1948 г. систематизировал результаты в докторской диссертации [18]. Доказывая волновую природу, он был очень близок к формулировке фундаментальной закономерности: ритмика в структуре кристаллов и процессы обмена в минеральных объектах и геодинамике подчиняются волновым числам установившихся колебаний.

Даже сейчас можно считать, что вопросы организации надатомных структур, важность которых известна с древних времен, в целом в материаловедении существенно отстают от устройства вещества на микроуровне. Ионно-молекулярные механизмы и электронные плотности, безусловно, являются важнейшим уровнем в познании природы вещества и конструировании нужных материалов. В отличие от атомного уровня с богатейшей теоретической базой квантовой механики и химии, надатомная организация вещества находится на стадии сбора технологических рецептов с привлечением в качестве теории туманных представлений о доменах, кластерах, мицеллах и т. п. С этой целью в школе академика В.Е. Панина занялись развитием направления мезомеханики, пытаясь на квантовых принципах «расшифровать» природу дислокаций и других дефектов твердого тела. В результате получены уравнения типа деформаций смещения и сдвига, примененные Эйлером в теории упругости и позднее Максвеллом в электромагнитной теории [19]. Известно, что сами классики подчеркивали ограниченность этих уравнений. Эти уравнения не о веществе, они способны описывать пространства со специфическими свойствами. Ограничения теории Эйлера – Максвелла, вероятно, исходят из локальной применимости евклидовой геометрии.

При электронном описании кристаллов другие виды взаимодействий (магнитные и механические), не меньшие по порядку сил, относят скорее к дефектам структуры, нежели к самой структуре. Другие виды взаимодействий – это обменные, связанные с магнитными свойствами, и колебательные моды, усиливающиеся при тепловом воздействии. Они могут образовывать собственные когерентные структуры, т. е. структуры с магнитными и фононными типами резонансных решеток. С них начался прорыв в высоких технологиях.

Примером такого прорыва стало создание квантовой вычислительной машины группой М. Лукина в Гарвардском университете. Были открыты особые фотонные связи, что позволило говорить о создании фотонной материи [20].

В природе химическая дифференциация при участии автоколебательных длиннопериодических процессов за счет протонно-гидратационного механизма фиксируется в периодических структурах разного масштаба: от ритмически расслоенных недр планет до локальных мономинеральных образований в виде зональных минералов, конкреций, жеод и т. п. Их масштабы, благодаря низкоэнергетической активации процессов, значительно превышают те, что следуют из традиционных термодинамических и основанных на них геохимических представлений.

В процессах фазовых превращений и обмена важнейшая роль принадлежит диффузионным и инфильтрационным потокам [21]. У каждого из них существуют замкнутые векторные поля, они способны или стабилизировать исходный поток, или, напротив, сделать его нелинейным. Последний вариант возникает при нестационарных условиях, сопровождающихся возникновением вихревых потоков.

В крупных масштабах имеет смысл рассматривать полевые структуры электромагнитной и гравитационно-кинетической природы. При электронейтральности вещественных потоков векторное поле представляет собой поле момента импульса, которое при значительных интенсивностях потоков сопровождается аномальными скоростями в процессах фазовых переходов. Процессы квазистационарного развития минералов в природе и технических системах, как правило, имеют гидратационный и протонно-гидратационный механизмы. Эти два механизма неразрывно связаны и, порождая друг друга по волновому принципу, вызывают ритмическую сменяемость этапов высокотемпературного протонирования и гидратации [3].

Такая ритмика проявляется в периодическом изменении кинетических параметров как по пространству кристаллизатора технологической установки, так и во времени для локальных его участков. В итоге за счет циклической смены протонно-гидратных условий формируются кристаллические агрегаты. Низкая энергетика и высокая скорость процесса по сравнению с классической химической ионной сборкой объясняются по-разному. В основном ссылаются на роль строительных надатомных наноблоков – прима-тел К.И. Чепижного [22]. Авторы экспериментально показали ведущую роль в этом процессе механизма спиnodального распада и супердиффузии [23, 24], что позволило открыть целый класс материалов [25], получить около 40 патентов на составы и способы синтеза. Эти материалы завоевали две серебряные и две бронзовые медали на ВДНХ СССР, а также медали международного уровня. В настоящее время механизм спиnodального распада из гипотезы превратился в отдельный раздел петрогенезиса магм и силикатных расплавов [26].

Реализация волновой концепции в создании ситаллов

Ситаллы – конструкционные многофункциональные синтетические материалы. Они появились в середине XX в. при развитии ракетной техники. Сегодня известны ситаллы с широким спектром свойств (полупроводниковые,

износостойкие, кислотостойкие, жаропрочные, а также специальные – поглощающие тепловые нейтроны и т. п.). Ситаллы становятся инновационными материалами в различных сферах и отраслях экономики. Наши полупроводниковые ситаллы работают в бетатронах с конца 1970-х гг. в качестве футеровки в скрубберах ТЭЦ, на Байконуре, в «Буране» и т. п. [26].

Силикатные расплавы представляют собой ионно-полимерные жидкости микрогетерогенного строения, в которых степень полимеризации полианионов определяется концентрацией катионов-модификаторов. Для ситаллов метасиликатного состава в системе $\text{CaO-MgO-FeO-Fe}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ исходная шихта (природное сырье, промышленные отходы добычи, переработки минерального или энергетического сырья) по результатам химических анализов доводится с помощью корректирующих добавок до метасиликатного. По общей формуле цепочечных силикатов $\text{M}_2\text{M}_1(\text{R}_2\text{O}_6)$ достигают равенства мольных долей в катионных подрешетках M_1 и M_2 и кремнекислородных полиэдрах (Si_2O_6). Это происходит при значении модуля кислотности-основности $\text{Mk} = 1$ [27]. Контроль осуществляется расчетом составов шихт на кристаллохимические формулы (на 6 атомов кислорода) с учетом пределов изоморфных замещений в трех подрешетках моноклинных пироксенов. Полученные мономинеральные метасиликаты с обширным полем изоморфных замещений являются наиболее перспективными, поскольку в их структуре возникают когерентные наноструктуры, которые энергетически связаны друг с другом гармоничными отношениями [28, 29]. В табл. 2 представлены кристаллохимические формулы ситаллов, созданных на основе промышленных отходов золоторудных месторождений Полярного Урала и базитов Томского района.

Таблица 2

Кристаллохимические формулы петроситаллов

Table 2

Crystal-chemical formulas of petrurgical glass-ceramics

№ пробы	Подрешетки в формуле пироксенов		
	M_2	M_1	R
1	$(\text{Ca}_{0,86}\cdot\text{Na}_{0,13}\cdot\text{K}_{0,01})$	$(\text{Ca}_{0,06}\cdot\text{Mg}_{0,29}\cdot\text{Fe}^{+2}_{0,18}\cdot\text{Fe}^{+3}_{0,13}\cdot\text{Al}_{0,34})$	$(\text{Si}_{1,65}\cdot\text{Ti}_{0,01}\cdot\text{Al}_{0,34})\text{O}_6$
2	$(\text{Ca}_{0,9}\cdot\text{Na}_{0,09}\cdot\text{K}_{0,01})$	$(\text{Mg}_{0,4}\cdot\text{Fe}^{+2}_{0,22}\cdot\text{Fe}^{+3}_{0,22}\cdot\text{Al}_{0,20})$	$(\text{Si}_{1,57}\cdot\text{Ti}_{0,02}\cdot\text{Al}_{0,41})\text{O}_6$
3	$(\text{Ca}_{0,83}\cdot\text{Na}_{0,08}\cdot\text{K}_{0,09})$	$(\text{Ca}_{0,4}\cdot\text{Mg}_{0,13}\cdot\text{Fe}^{+2}_{0,13}\cdot\text{Fe}^{+3}_{0,08}\cdot\text{Al}_{0,25})$	$(\text{Si}_{1,81}\cdot\text{Ti}_{0,02}\cdot\text{Al}_{0,16})\text{O}_6$
4	$(\text{Ca}_{0,74}\cdot\text{Na}_{0,18}\cdot\text{K}_{0,09})$	$(\text{Ca}_{0,29}\cdot\text{Mg}_{0,16}\cdot\text{Fe}^{+2}_{0,11}\cdot\text{Fe}^{+3}_{0,07}\cdot\text{Al}_{0,38})$	$(\text{Si}_{1,79}\cdot\text{Ti}_{0,02}\cdot\text{Al}_{0,18}\cdot\text{P}_{0,01})\text{O}_6$

По составу шихты рассчитывается весовое количество требуемого основного сырья и подшихтовок. Затем осуществляется дробление и смешивание. Составы (табл. 2) плавилась до гомогенного состояния при 1360–1400 °С, время плавления – 1,5–2,0 ч. После закалывания и отжига гомогенные стекла подвергаются кинетическим исследованиям с целью изучения механизмов фазовых превращений и определения технологических параметров ситаллизации с помощью различных физико-химических аналитических методов. Для определения температурных интервалов зародышеобразования и роста кристаллов стекла исследованы методом ДТА (прибор NETZSCH STA 409 PC/PG)

в интервале 20–1100 °С. Термограммы с вычисленными эндоэффектами (T_1) и экзоэффектами (T_2) представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты ДТА стекол на основе базитов Полярного Урала

Table 3

DTA results of Polar Urals basite-based glass

№ пробы	T_1 , °С	E_1 , мВт/мг	T_2 , °С	E_2 , мВт/мг
1	723	0,391	905	0,494
2	711	0,423	897	0,812
3	742	0,321	951	0,591
4	727	0,360	964	0,686

Примечание. T_1 – температура образования зародышей основной фазы; T_2 – температура роста кристаллов; E_1 – энергия активации зародышеобразования; E_2 – энергия роста кристаллов. Номер пробы 1–4 соответствует номерам в табл. 2.

Динамические или квазистационарные управляющие решетки в процессе получения того или иного материала можно сформировать с помощью внешних воздействий еще на стадии стеклообразного состояния. К воздействиям такого рода относятся не только термомеханические технологические приемы, но и разного рода высокочастотные звуковые и электромагнитные возбуждения. Очевидно, что параметры при этом образующихся решеток будут зависеть от используемых частот, внешних резонаторов и, естественно, от свойств самого материала и резонансных свойств образца, т. е. от его формы и размеров.

В формировании структуры вещества участвуют также и низкочастотные моды объемных колебаний, которые также зависят не только от свойств материала, но и от геометрии и размеров получаемого изделия или образца. Собственные геометрические моды колебаний модулируют параметры решеток вещества и тем самым влияют на его свойства. Связь геометрии образца и его структуры иллюстрируется приведенной ниже фотографией стеклянного шара (рис. 1). Распределение газовых пузырей в нем совершенно не случайно соответствует узлам некоторой объемной решетки проектируемого метасиликата.

Подтверждением возможности динамических надатомных построек с неевклидовой метрикой являются фуллерены, которые соответствуют реальным кристаллам сферического пространства Римана [3]. Особое значение имеют решетки, образуемые «сильными» ионами, исчезающе малые концентрации которых оказывают порой решающее влияние на свойства материалов. Это обстоятельство позволяет совершенно по-новому оценивать роль кислотно-основных взаимодействий в природных процессах и в технологиях. Ранее совершенно необъяснимые концентрические структуры с размерами 2,5–10,5 мкм из мицелл нанометрового диапазона кристаллов магнетита в кристаллизующихся метасиликатных стеклах теперь можно интерпретировать как структурно управляющее воздействие протонов и их решеток. На электронной микрофотографии закаленного стекла метасиликатного состава отчетливо просматриваются светлые кольца структурных неоднородностей, индуцированных протонами

(рис. 2). При нагреве системы в кольце как резонаторе для теплового излучения возникают стоячие волны, которые формируют частоты надатомного упорядочения. Целый ряд ионов, как элементарных, так и молекулярных, обладает весьма большим (порядка 1 мкм) радиусом обменных взаимодействий. Благодаря этому они также образуют собственные решетки, влияние которых на процессы структурирования и свойства матрицы является определяющим.

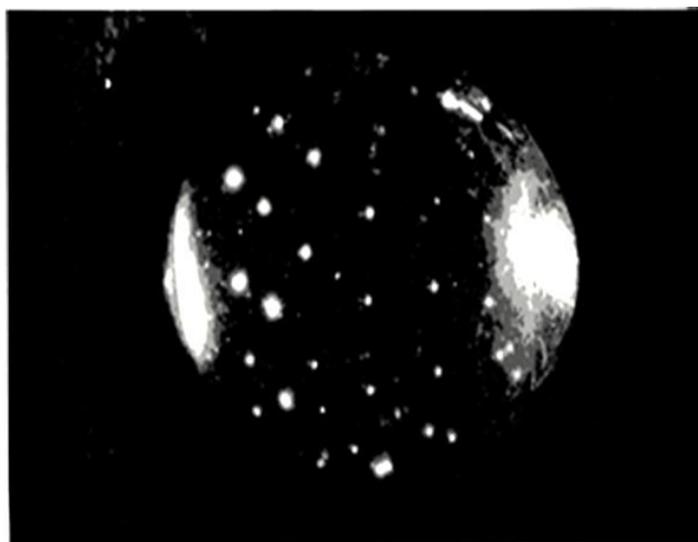


Рис. 1. Распределение газовых пузырей в стеклянном шаре метасиликатного состава по узлам геометрически правильной объемной решетки. $\frac{1}{4}$ натуральной величины

Fig. 1. Distribution of gas bubbles in a metasilicate glass ball in sites of a geometrically regular crystal lattice. $\frac{1}{4}$ of natural size

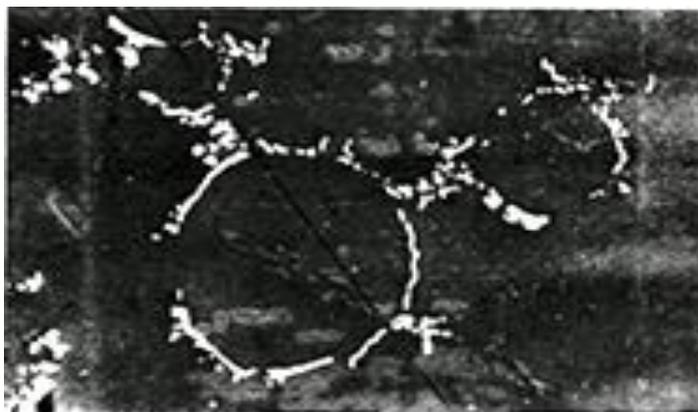


Рис. 2. Кольцевые структуры электронной плотности, индуцированные протонами, на начальной стадии кристаллизации стекла. 10 000 \times

Fig. 2. Electron-density annular structures induced by protons at the initial stage of glass crystallization. Magnification: 10 000 \times

С точки зрения практического применения наиболее известным из этих ионов является хром, используемый как катализатор зародышеобразования при получении ситаллов. На фотографии (рис. 3) кристаллизация хромшпинели в стекле демонстрирует формирование строго упорядоченных фрактальных структур в стекле. Соотношения размеров критических тел здесь связаны отношениями простых чисел.

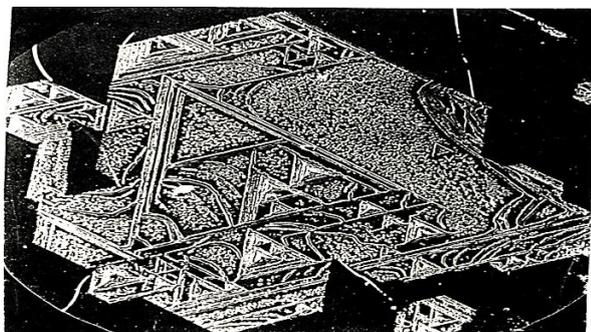


Рис. 3. Заполнение решетки критических тел хромшпинели в стекле. Размеры критических тел связаны отношениями простых чисел (1/2, 1/4, 3/4 и т. д.). 10 000×

Fig. 3. Chrome spinel bodies in glass lattice. The body size: 1/2, 1/4, 3/4, etc. Magnification: 10 000×

Результаты лабораторных экспериментальных исследований позволили установить, что системы метасиликатного состава являются высококогерентными, они проявляют свою уникальность через механизм и кинетику фазовых превращений (рис. 4). Сочетание этих факторов послужило стимулом для дальнейших исследований в разработке новых конструкционных многофункциональных материалов.

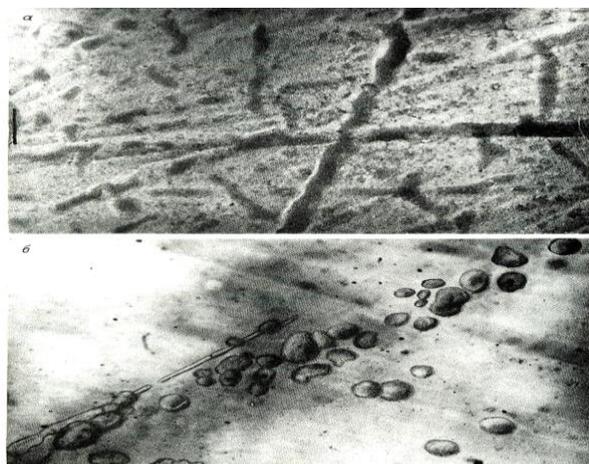


Рис. 4. Субмикроструктура спиновального распада в нагреваемом исходном стекле после его закалки. 10 000×

Fig. 4. Submicrostructure of spinodal decomposition in heated initial glass after quenching. Magnification: 10 000×

Стеклокристаллические материалы после кристаллизации по результатам РФА соответствуют составам твердых растворов в системе «моноклинные пироксены – волластонит», отличающейся широким гетерогенным изоморфизмом (рис. 5), а также монофазным крайним составом (диопсид и β -волластонит).

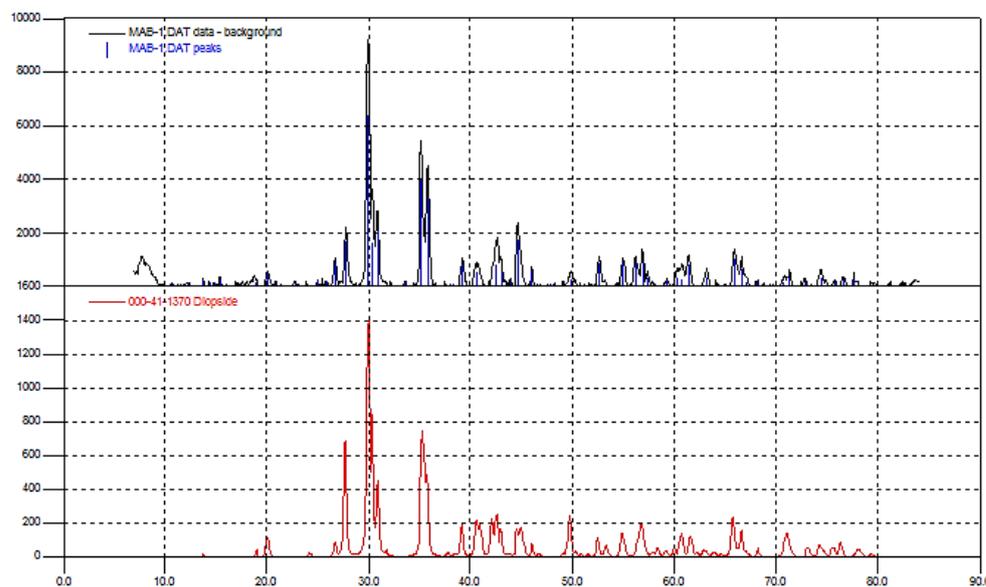


Рис. 5. Рентгенограмма петроситалла класса СКС, образец № 1 (вверху) и эталонный диопсид № 000-41-1370 (внизу) из АСТМ (Crystallographica Search-Match)

Fig. 5. XRD patterns of petrosilica glass-ceramics, sample 1 (blue) and reference diopside N 000-41-1370 (red). (Crystallographica Search-Match)

Основные свойства нового материала из минерального сырья Полярного Урала в сравнении с традиционными материалами представлены в табл. 4. Табличные данные подтверждают, что применение петроситаллов класса «сикам» при строительстве транспортной и промышленной инфраструктуры может оказаться наиболее эффективным. Созданные материалы [26, 27, 28] нужны для строительства дорожных плит, трубопроводов и автодорог на винтовых сваях, взлетно-посадочных полос полярных аэродромов и военных авиабаз в Арктике, грузовых и нефтегазовых морских терминалов, портов и пирсов на арктическом побережье, искусственных островов и кустов бурения на болотах, озерах и мелководном шельфе с заморозкой основания промплощадок криосваями, подводных кессонных буровых станций (типа «подводный колокол»), смонтированных из сталеситалловых сферических фуллеровых тубингов, и т. п. Эти достоинства материала могут найти широкое применение в России и в других странах. Освоение недр Заполярья и шельфовых зон морей Восточной Арктики – одно из современных перспективных направлений. Япония в течение последних лет вложила более 50 млн иен в создание промышленной технологии и проводит промышленные испытания

по добыче природного газа из газогидратов [30]. Огромные перспективы и у дефицитного материала мономинерального волластонитового состава [26].

Таблица 4

**Свойства петроситаллов класса «сикам»
и других конструкционных материалов**

Table 4

Properties of petrugical glass-ceramics and other constructional materials

Показатель (свойство)	Петроситаллы класса «сикам»	Каменное литье*	Бетон*	Чугун*
Коэффициент линейного расширения (КТР) $10^7 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	65–114	48–100	100	100
Температура начала размягчения, $^\circ\text{C}$	950–1100	900–1050	–	–
Сопротивление истиранию, г/см^2	0,015–0,04	0,02–0,08	–	–
Предел прочности, МПа: при статическом изгибе при сжатии	100–188 707–909	47–80 250–500	– 5–60	280 800–1000
Химическая стойкость, %: H_2SO_4 NaOH	94,6–99,9 98,0–99,0	99,8 98,5	– –	– –
Стоимость 1 куб. м материалов в рублях	9000 на заводе петроситаллов	30 000	18 000–24 000 в ЯНАО	112 000

* По данным [24].

Экономические аспекты концепции

Из сравнительного анализа результатов опытно-заводских испытаний следует, что ситаллы нового класса по прочности на изгиб и сжатие сравнимы с чугуном, при этом легче в три раза. Они практически не подвержены коррозии и, что очень важно, их себестоимость в 12 раз ниже. В случае размещения завода по производству этих материалов из отвальных отходов золоторудных месторождений Полярного Урала в п. Харп ЯНАО общая стоимость материала снижается кратно. Стоимость природного газа в этом регионе составляет 3 тыс. руб./тыс. м^3 . Производство одного кубометра петроситалла на тепловые технологические нужды требует около 400 м^3 . Реализация результатов может оказать позитивное влияние на основные показатели проектирования и строительства Северного широтного хода (неоднократно откладываемого) и деятельность нефтегазодобывающих предприятий. Рост экономической привлекательности может быть осуществлен за счет:

1. Увеличения дохода от роста реализации продукции:
 - за счет использования местного природного сырья;
 - ускорения темпов строительства;

– экономии газа, расходуемого на собственные нужды, и снижения его потерь.

2. Снижения материальных и энергетических затрат:

– за счет использования нового оборудования, новых технологий и технологических процессов;

– инноваций, направленных на снижение расхода материальных ресурсов;

– использования импортозамещающих материалов;

– замены используемых в производстве материалов, сырья или полуфабрикатов более дешевыми;

– оптимизации графиков проведения и методов производства капитального и текущего ремонта;

– уменьшения затрат на капитальный и текущий ремонт объектов инфраструктуры;

– повышения ремонтпригодности оборудования.

3. Сокращения затрат живого труда:

– за счет использования нового оборудования, новых технологических процессов.

Заключение

В развитие идей В.И. Вернадского о неевклидовом характере геометрии в природе создана концепция интегрированного понимания структур минерального вещества на основе ГМВ [32]. Она постулирует электромагнитную природу вещества и представляет минералы как пространственно-замкнутые динамические структуры электромагнитного поля, образующиеся в результате интерференции.

Структурный порядок природных и искусственных минералов (систем) определяется когерентностью взаимодействий, ее пространственными и временными параметрами. По характеру взаимодействий следует выделить три ее типа: электронную, магнитную и фононную. Очевидно, что в чистом виде трудно выделить примеры вещества, где реализуется лишь один из трех типов когерентности. В целом, с учетом промежуточных, вернее, комплексных классов материалов установлено семь типов когерентности среды, начиная с ионных структур и заканчивая живыми организмами.

Общим выводом является то, что связанные среды всегда обладают структурным, в общем случае динамически-ритмическим резонансным порядком, выявление которого требует высокого экспериментального искусства, начало которому закладывается сегодня.

Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена ведущая роль механизма спиноподобного распада при формировании нового класса структур. По фазовому составу они соответствуют смешанному электронно-фононному типу когерентности. Наличие высокоэластических свойств у стекол (и полимеров) выше температуры стеклования связано с нарушением условий фононной когерентности и возрастанием роли виртуальной электронной когерентности субатомных структур, что приводит к уменьшению на порядок времени кристаллизации [33, 34, 35].

Стеклокристаллические материалы нового класса способствуют развитию наиболее комплексного интегративного направления в теоретическом материаловедении и, несомненно, повышают конкурентность среди современных конструкционных и строительных материалов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мананков А.В. О механизме ликвации в силикатных системах // Дан СССР. 1979. Т. 246. № 4. С. 942–946.
2. Мананков А.В., Шаранов В.Н. Кинетика фазовых переходов в базитовых расплавах и магмах. Новосибирск : Наука, 1985. 199 с.
3. Локтюшин А.А., Мананков А.В. Пространственно-замкнутые динамические структуры. Томск : Изд-во ТГУ, 1996. 121 с.
4. Терлецкий Я.П. Электродинамика. Москва : Высшая школа, 1990. 129 с.
5. Мастерова М.А., Янц Ю.Г. Вектор Умова – Пойнтинга дипольного электрического и дипольного магнитного моментов. URL: <http://www.vestnik.adygnat.ru>
6. Мананков А.В. К теории формирования и прогноза месторождений полезных ископаемых // Геосферные исследования. 2019. № 4. С. 83–94.
7. Мананков А.В., Гасанова Э.Р., Харитонова Н.В. Кристаллохимические основы расчета мономинеральности ситаллов // Неорганические материалы. 2018. Т. 54. № 9. С. 984–992.
8. Мананков А.В., Гасанова Э.Р. Ситаллы из местного сырья для производства инновационных инфраструктур с высокой технико-экономической эффективностью в экстремальных условиях Крайнего Севера // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 11. С. 87–96.
9. Мананков А.В., Гасанова Э.Р., Быкова В.В. Физико-химические и технологические аспекты разработки ситаллов нового класса // Вестник Воронежского ГУИТ. 2018. Т. 80. № 1. С. 211–222.
10. Manankov A.V. Structural Organization of Innovative Petrositalls from the Local Natural Raw Materials of the Polar Urals // Insights in Mining Science and Technology. 2020. V. 2. № 1. P. 153–161. DOI: 10.19080/IMT.2020.02.555577.
11. Киприянов Н.А., Горичев Н.Г. Электронно-протонная теория – фундаментальная основа физико-химического процесса выщелачивания оксидных минералов в гидрометаллургии // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. 2006. № 1 (12). С. 101–109.
12. Кондратьев Б.К., Турчин В.И. Комбинированный источник ионов. ПТЭ. 3. 1994. С. 106–111.
13. Патент № 2211760 Российская Федерация, МПК В28D 5/00 (2006.01), В44С 1/22 (2006.01), С30В 31/00 (2006.01), С30В 33/00 (2006.01). Устройство для обработки алмазов. № 2001114961/03 : заявл. 31.05.2001 : опубл. 10.09.2003 / Турчин В.И., Радько В.Е.
14. Shelli R. Jove. The Pribram-Bohm hypothesis a topology of consciousness II Cosmos and History // The Journal of Natural and Social Philosophy. 2016. V. 12. № 2. P. 114–136.
15. Aspect A., Grangier P., Roger G. Experimental Realization of Einsteib-Podolsky-Rosen-Bohm Gedanken experiment – A New Violation of Bell Inequalities // Physical Review Letters. 1982. V. 49. № 2. P. 91–94. PRL Bell ADR.
16. Тэлбот М. Голографическая Вселенная : перев. с англ. Москва : ИД «София», 2004. 368 с.
17. Козырев Н.А. Причинная или несимметричная механика в линейном приближении. Пулково, 1958. 41 с.
18. Кузьмин А.М. Периодическо-ритмические явления в минералогии и геологии. Томск : Изд-во СТТ, 2019. 336 с.
19. Панин В.Е., Гринзев Ю.В., Данилов В.И., Зуев Л.В. и др. Структурные уровни пластической деформации и разрушения. Новосибирск : Наука, 1990. 254 с.
20. Попсулин С. Русский ученый из Гарварда осуществил прорыв в пространстве квантового компьютера // Издание о высоких технологиях. 2012. 6 июля.
21. Коржиский Д.С. Теория метасоматической зональности. Москва : Наука, 1982. 104 с.
22. Чепижный К.И. Новое в минералогии (теория минералогии). Ленинград : Наука, 1988. 146 с.
23. Мананков А.В. Физико-химические основы наноструктурной минералогии в получении современных материалов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2012. № 2. С. 120–136.

24. *Manankov A.V., Vladimirov Y.M., Strakhov B.S.* Mechanism for structure formation and non-equilibrium glass crystallization model (a review) // *Glass and ceramic*. 2015. № 1 (January) P. 3–10. DOI: 10.1007/s10717-015-9710-x.
25. *Свидетельство № 92355* на товарный знак «СИКАМ» – новый 19 класс камней – искусственные, строительные и конструкционные строительные материалы неметаллические : приоритет 07.02.1990.
26. *Мананков А.В., Горюхин Е.Я., Локтюшин А.А.* Волластонитовые, пироксеновые и другие материалы из промышленных отходов и недефицитного природного сырья. Томск : Изд-во ТГУ, 2002. 168 с.
27. Патент № 2687014 Российская Федерация, МПК С03В 1/00 (2006.01) Способ приготовления метасиликатной ситалловой шихты : № 2018116526 заявл. 03.05.2018 : опубл. 06.05.2019 / Мананков А.В., Владимиров В.М., Гасанова Э.Р. 10 с.
28. *Loktyushin A.A., Manankov A.V.* Mineral structure in holographic model of substance // Структура и эволюция минерального мира. Сыктывкар, 1997. С. 35–37.
29. *Manankov A.V., Vladimirov V.M.* On the mechanism and thermodynamic modeling of metasilicate glass ceramics crystallization // *Glass and ceramic*. 2016. № 6 (June). P. 3–7. DOI: 10.1007/s10717-016-9856-1.
30. *Шубина Ю.С., Страхов Б.С., Мананков А.В.* Геодинамика арктического шельфа и эманация метана из газогидратов // *Материалы IX Всероссийской научной конференции с международным участием им. проф. М.К. Коровина*. Томск : ТПУ, 2016. С. 10–19.
31. *Павлушкин Н.М.* Основы технологии ситаллов. Москва : Стройиздат, 1979. 340 с.
32. *Вернадский Б.И.* Научная мысль как планетное явление. Москва : Наука, 1991. 271 с.
33. *Авторское свидетельство № 1737965*. Способ получения пористого остеклованного блока : заявл. 14.08.1989 : опубл. 15.01.1993 / Мананков А.В., Локтюшин А.А. Бюл. № 13.
34. *Патент № 2525076* Российская Федерация, МПК С03В 19/08 (2006.01), С03С 11/00 (2006.01). Способ и устройство для изготовления пористого остеклованного блока : № 2013127553/03 : заявл. 17.06.2013 : опубл. 10.08.2014 / Мананков А.В., Карауш С.А. 17 с.
35. *Патент № 2582152* Российская Федерация, МПК С03В 19/08 (2006.01). Способ изготовления пористой стеклокерамики (варианты) : № 2015115361/03 : заявл. 23.04.2015 : опубл. 20.04.2016 / Мананков А.В. 10 с.

REFERENCES

1. *Manankov A.V.* Segregation mechanism in silicate systems. *DAN SSSR*. 1979; 246 (4): 942–946. (In Russian)
2. *Manankov A.V., Sharapov V.N.* Kinetics of phase transitions in basic melts and magmas. *Novosibirsk: Nauka*. 1985. 199 p. (In Russian)
3. *Loktyushin A.A., Manankov A.V.* Spatially closed dynamic structures. Tomsk: TSU, 1996. 121 p. (In Russian)
4. *Terletskiy Ya.P.* *Elektrodinamika*. Moscow: Vysshaya shkola, 1990. 129 p. (In Russian)
5. *Masterova M.A., Yantz Yu.G.* The Umov-Poynting vector of dipole electric and dipole magnetic moments. Available: www.vestnik.adygnat.ru (In Russian)
6. *Manankov A.V.* The theory of formation and forecast of mineral deposits. *Geosfemyye issledovaniya*. 2019; (4): 83–94. (In Russian)
7. *Manankov A.V., Gasanova E.R., Kharitnova N.V.* Crystal-chemical bases for calculation of glass-ceramics monominerality. *Neorganicheskie materialy*. 2018; 54 (9): 984–992. (In Russian)
8. *Manankov A.V., Gasanova E.R.* Glass-ceramics from local raw materials for the production of innovative infrastructures with high technical and economic efficiency in the Far North conditions. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov*. 2018; 329 (11): 87–96. (In Russian)
9. *Manankov A.V., Gasanova E.R., Bykova V.V.* Physicochemical and technological aspects of glass-ceramics of a new class. *Vestnik Voronezhskogo GUIT*. 2018; 80 (1): 211–222. (In Russian)
10. *Manankov A.V.* Structural organization of innovative petrosittals from the local natural raw materials of the Polar Urals. *Insights in Mining Science and Technology*. 2020; 2 (1): 153–161. DOI: 10.19080/IMT.2020.02.555577 (In Russian)

11. Kipriyanov N.A., Gorichev N.G. Electron-proton theory as fundamental basis for physico-chemical process of leaching of oxide minerals in hydrometallurgy. *Vestnik RUDN. Seriya: Inzhenernye issledovaniya*. 2006; 1 (12): 101–109. (In Russian)
12. Kondrat'yev B.K., Turchin V.I. Combused ion source. *Pribory i tekhnika eksperimenta*. 1994; (3): 106–111. (In Russian)
13. Turchin V.I., Rad'ko V.E. Diamond polishing device. Patent Russ. Fed. No. 2211760, 2003. (In Russian)
14. Shelli R. Jove. The Pribram-Bohm hypothesis a topology of consciousness. *Cosmos and History. The Journal of Natural and Social Philosophy*. 2016; 12 (2): 114–136.
15. Aspect A., Grangier P., Roger G. Experimental realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm gedankenexperiment – A new violation of bell inequalities. *Physical Review Letters*. 1982; 49 (2): 91–94.
16. Talbot M. The holographic universe. Moscow: Sofia, 2004. 368 p. (Russian translation)
17. Koz'yrev N.A. Causal or asymmetric mechanics in linear approximation. Pulkovo, 1958. 41 p. (In Russian)
18. Kuz'min A.M. Periodic-rhythmic phenomena in mineralogy and geology. Tomsk: STT, 2019. 336 p. (In Russian)
19. Parun V.E., Grinyayev Yu.V., Danilov V.I., Zuyev L.V., et al. Structural levels of plastic deformation and fracture. Novosibirsk: Nauka, 1990. 254 p. (In Russian)
20. Popsulin S. Russian scientist from Harvard made a breakthrough in the quantum computer space. *Izdaniye o vysokikh tekhnologiyakh*, 2012. (In Russian)
21. Korzhinskiy D.S. The theory of metasomatic zoning. Moscow: Nauka, 1982. 104 p. (In Russian)
22. Chepizhnyy K.I. New in mineralogy (theory of mineralogy). Leningrad: Nauka, 1988. 146 p. (In Russian)
23. Manankov A.V. Physicochemical foundations of nanostructural mineralogy in new material production. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2012; (2): 120–136. (In Russian)
24. Manankov A.V., Vladimirov V.M., Strakhov B.S. Mechanism for structure formation and non-equilibrium glass crystallization model (A review). *Glass and Ceramics*. 2015; (1): 3–10. DOI: 10.1007/s10717-015-9710-x
25. Trademark Certificate No. 92355 “SIKAM” is a new 19th class of artificial stones, building, non-metallic materials”, 1990. (In Russian)
26. Manankov A.V., Goryukhin E.Ya., Loktyushin A.A. Wollastonite, pyroxene and other materials from industrial waste and non-deficient natural raw materials. Tomsk: TSU, 2002. 168 p. (In Russian)
27. Manankov A.V., Vladimirov V.M., Gasanova E.R. Method for preparing metasilicate glass-ceramic mixture. Patent Russ. Fed. No. 2687014, 2019. (In Russian)
28. Loktyushin A.A., Manankov A.V. Mineral structure in holographic model of substance. *Struktura i evolyutsiya mineral'nogo mira*. Syktyvkar, 1997. Pp. 35–37. (In Russian)
29. Manankov A.V., Vladimirov V.M. On the mechanism and thermodynamic modeling of metasilicate glass ceramics crystallization. *Glass and Ceramics*. 2016; (6): 3–7. DOI: 10.1007/s10717-016-9856-1
30. Shubina Yu.S., Strakhov B.S., Manankov A.V. Geodynamics of the Arctic shelf and methane emanation from gas hydrates. In: *Proc. 9th All-Russ. Sci. Conf.*, Tomsk: TPU, 2016. Pp. 10–19. (In Russian)
31. Pavlushkin N.M. Fundamentals of glass-ceramic technology. Moscow: Stroyizdat, 1979. 340 p. (In Russian)
32. Vernadskii V.I. Scientific thought as a planetary phenomenon. Moscow: Nauka, 1991. 271 p. (In Russian)
33. Manankov A.V., Loktyushin A.A. Production method for porous vitrified block. Author's Certificate No. 1787965, 1993. (In Russian)
34. Manankov A.V., Karaush S.A. Production method and design of porous vitrified block. Patent Russ. Fed. No. 2525076, 2014. (In Russian)
35. Manankov A.V., Vladimirov V.M., Gasanova E.R. Production method for porous glass ceramics (options). Patent Russ. Fed. No. 2582152, 2015. (In Russian)

Сведения об авторах

Мананков Анатолий Васильевич, докт. геол.-мин. наук, профессор, Национальный исследовательский Томский государственный университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36; Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.

Яковлев Валентин Михайлович, ст. науч. сотрудник, Национальный исследовательский Томский государственный университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

Локтюшин Александр Андреевич, канд. физ.-мат. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.

Горюхин Евгений Яковлевич, канд. геол.-мин. наук, гл. геолог, Томская комплексная геологоразведочная экспедиция, 634507, Томская область, Томский район, пос. Зональная Станция, База Ткгэ, 6.

Authors Details

Anatoly V. Manankov, DSc, Professor, National Research Tomsk State University, 36, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia; Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia.

Valentin M. Yakovlev, Senior Research Assistant, National Research Tomsk State University, 36, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia.

Aleksandr A. Loktyushin, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia.

Evgeniy Ya. Gorukhin, PhD, Chief Geologist, Tomsk Complex Exploration Company, 634507, Tomsk region, Zonal'naya Stantsiya, Tomsk, Russia.

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 28.03.2023
Одобрена после рецензирования 18.06.2023
Принята к публикации 20.06.2023

Submitted for publication 28.03.2023
Approved after review 18.06.2023
Accepted for publication 20.06.2023