

УДК 549.01

DOI: 10.24930/1681-9004-2025-25-2-191-195

Структура и свойства минералов и минералоподобных синтетических материалов: актуальные проблемы

С. Л. Вотяков

Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, 620110, г. Екатеринбург,
ул. Академика Вонсовского, 15, e-mail: vsl.yndx@yandex.ru

Поступила в редакцию 05.04.2025 г., принята к печати 07.04.2025 г.

Основная цель исследований в области строения и свойств минералов, их кристаллохимии и физики – получение фундаментальной информации о реальной атомной и электронной структуре минеральных объектов и физических закономерностях их преобразования под действием внешних факторов (температуры, давления, радиации, химизма окружающей среды). Подобная информация является основой для типизации, реставрации условий кристаллизации и эволюции минералов в определенной геологической ситуации; она широко используется при петрогенетических и геохронологических построениях. Подобные исследования актуальны и при разработке природоподобных технологий получения новых перспективных функциональных материалов. Работы в данной области сохраняют свою актуальность и сегодня. Настоящий тематический спецвыпуск продолжает спецвыпуск журнала “Литосфера” № 2, т. 24, 2024 г.; в нем представлено 13 статей в области (1) исследований структуры, кристаллохимии, физики и типоморфизма минералов; (2) отработки методик синтеза и изучения свойств минералоподобных материалов; (3) разработки методов исследования. В статьях настоящего спецвыпуска отражены результаты исследований российских ученых, полученные в данных областях в последнее время.

Ключевые слова: структура, строение, свойство, минерал, кристаллохимия, спектроскопия, типоморфизм, природоподобная технология, функциональный материал

Источник финансирования

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГГ УрО РАН, тема № 123011800012-9

Structure and properties of minerals and mineral-like synthetic materials: current problems

Sergey L. Votyakov

A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, UB RAS, 15 Academician Vonsovsky st.,
Ekaterinburg 620110, Russia, e-mail: vsl.yndx@yandex.ru

Received 05.04.2025, accepted 07.04.2025

The main goal of research in the field of the structure and properties of minerals, their crystal chemistry and physics is to obtain fundamental information about the real atomic and electronic structure of mineral objects and physical regularities of their transformation under the influence of external factors (temperature, pressure, radiation, and environmental chemistry). Such information is the basis for typification, restoration of the conditions for mineral crystallization and evolution in a certain geological situation. It is widely used in petrogenetic and geochronological constructions. Such studies are also relevant in the development of nature-like technologies for obtaining new promising functional materials. Research in these areas remains relevant today. This thematic special issue of *Lithosphere* continues the similar one (“*Lithosphere (Russia)*”, 2024. Volume 24. No. 2); it presents 13 articles dedicated to the consideration of the following problems: (1) studies of the structure, crystal chemistry, physics and typomorphism of minerals; (2) development of methods of the synthesis and study of the properties of mineral-like materials; (3) development of research methods. The articles of the special issue reflect the results of research by Russian scientists obtained in these areas recently.

Keywords: structure, property, mineral, crystal chemistry, spectroscopy, typomorphism, nature-like technology, functional material

Funding information

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Geology and Geophysics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, topic No. 123011800012-9

Для цитирования: Вотяков С.Л. (2025) Структура и свойства минералов и минералоподобных синтетических материалов: актуальные проблемы. *Литосфера*, 25(2), 191–195. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-2-191-195>. EDN: WPNSLW

For citation: Votyakov S.L. (2025) Structure and properties of minerals and mineral-like synthetic materials: current problems. *Lithosphere (Russia)*, 25(2), 191–195. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-2-191-195>. EDN: WPNSLW

Советские и российские ученые стоят у истоков развития целого ряда научных направлений в области исследования строения и свойств минерального вещества, кристаллохимии, радио-, оптической, ИК и мессбауэровской спектроскопии минералов, отработки методик синтеза минералоподобных функциональных материалов (см. например (Марфунин, 1974; Кочубей и др., 1988; Вотяков и др., 1993; Скублов, 2005; Чашухин и др., 2007; Колесов, 2009; Каулина, 2010; Вотяков и др., 2011; Щапова и др., 2020)). В настоящее время в России сформировались центры и оформились школы в различных научных направлениях исследования минерального вещества. Следует отметить школы по кристаллографии и кристаллохимии МГУ и Санкт-Петербургского университета, школы в области физико-химии минералов в Казани и на Урале – в Екатеринбурге, Миассе и Сыктывкаре, в Сибири – в Новосибирске, Иркутске и Томске. С целью интеграции различных школ и научных направлений, объединения специалистов, в том числе работающих на стыке наук – минералогии и материаловедения, экспериментальной и теоретической физики, спектроскопии и кристаллохимии минералов и минералоподобных функциональных материалов, а также разработки аналитических методов исследования, начиная с 2009 г., на базе Института геологии и геохимии УрО РАН ежегодно проводится Всероссийская научная конференция “Минералы: строение, свойства, методы исследования”. В 2024 г. был опубликован тематический спецвыпуск журнала Литосфера, посвященного актуальным проблемам в области строения, свойств и методов исследования минералов, инициированный участниками конференции и содержащий 16 статей авторов, представляющих различные академические институты и ВУЗы Москвы, Санкт-Петербурга, Екатеринбурга, Апатитов, Новосибирска и Иркутска (“Литосфера”, № 2, 2024). Настоящий спецвыпуск является его продолжением; в нем представлено 13 статей в области трех основных научных направлений: (1) исследования структуры, кристаллохимии, физики и типоморфизма минералов; (2) отработки методик синтеза и изучения свойств минералоподобных материалов; (3) разработки методов исследования. В статьях настоящего тематического спецвыпуска отражены результаты исследований российских ученых, полученные в данных областях в последнее время.

Открывает спецвыпуск статья Еремина Н.Н. с соавторами (Еремин и др., 2025), в которой рассмотрены разнообразные мотивы заполнения октаэдрических, тетраэдрических и тригональных пустот в анионных упаковках, реализуемые в мире минералов. Показана взаимосвязь кристаллических структур оливина, норбергита, хондродита, гумита и др.; интерпретировано кажущееся противоречие

наблюдаемого топологического разнообразия мотивов и правила парсимонии Л. Полинга.

В работе Ильина Г.С. с соавторами (Ильин и др., 2025a) представлены результаты уточнения кристаллической структуры голотипного образца шюллерита из карьера Лёлай (вулканический район Айфель, Германия) в рамках двух пространственных групп – ацентричной $P1$ и centrosymmetric $P1$. Группа $P1$ предлагается в качестве более подходящей для описания структуры; она позволяет выявить больше существующих различий в заселенностях позиций и длинах связей катион–анион в HOH -модулях; представлена идеализированная формула минерала в виде $Ba_2Na(Mn,Ca)(Fe^{3+}, Mg, Fe^{2+})_2Ti_2(Si_2O_7)_2(O,F)_4$.

Во второй работе Ильиным Г.С. с соавторами (Ильин и др., 2025b) изучена кристаллическая структура Ca -содержащего члена ряда перротита из Октябрьского щелочного массива (Северное Приазовье). Представлены параметры моноклинной элементарной ячейки; структура уточнена в рамках двух пространственных групп $C2$ и $C2/m$. Группа $C2$ предлагается в качестве более подходящей для описания структуры перротита. Изученный образец является F -доминантным аналогом перротита, отличаясь от последнего присутствием в составе Ca , высоким содержанием Fe и низким Nb ; представлена кристаллохимическая формула образца.

Каневой Е.В. с соавторами (Канева и др., 2025) детально исследованы зеленая и сиренево-серая разновидности франкаменита из чароитовых пород Мурунского массива. По данным радиоспектроскопии, оптического поглощения и фотoluminescences установлено, что зеленая окраска франкаменита, вероятно, связана с переходами с переносом заряда Fe/Ti и Fe^{2+}/Fe^{3+} .

В работе Морохина А.И. с соавторами (Морохин и др., 2025) с использованием СЭМ, спектроскопии комбинационного рассеяния света и оптического диффузного отражения исследованы динамические особенности маломедистого борнита Волковского месторождения (Средний Урал). Показано, что окисление ее электропроводящих свойств; при этом диффузии из объема борнита в поверхностный слой под действием электронного пучка не зафиксировано. Предложен критерий для выделения разновидностей борнита и прогнозирования показателей переработки медных руд.

В статье Щаповой Ю.В. с соавторами (Щапова и др., 2025) представлены данные о примесном составе, колебательных и люминесцентных свойствах благородной шпинели из мраморов восточного склона Урала (Мурзинско-Адуйского антиклинория и Кучинского проявления рубина Кочкарского антиклинория), а также из месторождения Кух-и-Лал и Горон (Юго-Западный Памир); проанализировано влияния примесного состава и

тепловой истории на структурное катионное разупорядочение и фотолюминесцентные свойства шпинели; рассмотрены возможности применения результатов для решения геммологических и минералогических задач.

В двух методических статьях Желуницына И.А. с соавторами (Желуницын и др., 2025а, б) на примере ряда гранатов проанализированы возможности использования высокотемпературной импедансной спектроскопии для изучения электрических характеристик минералов. В режиме нагрева-охлаждения при температурах 200–900°C и частотах 1–10⁶ Гц исследованы свойства демантоида из клинопироксенитов (Полдневское месторождение, Средний Урал), андрадитов из скарнов (Верхний Уфалей, Средний Урал; Соколовский рудник, г. Рудный, Казахстан) и альмандина из Верхолювской копи (Средний Урал). Результаты интерпретированы в сопоставлении с термогравиметрическими и рентгеноструктурными данными, а также данными диффузионного светорассеяния минералов в исходном состоянии и после высокотемпературного отжига. Впервые получены электрические характеристики демантоида. Показано, что химический и фазовый состав андрадитов оказывает значимое влияние на их электропроводимость. Для альмандина установлено, что на температурной зависимости электропроводности фиксируется аномалия при 750°C, обусловленная началом разложения образца; о последнем ранее не сообщалось. Влияние начальных стадий фазовых превращений на электропроводность открывает перспективы использования для анализа данного явления импедансной спектроскопии.

В работе Давлетшиной А.А. с соавторами (Давлетшина и др., 2025) представлено описание методических аспектов пробоподготовки и анализа дифракции отраженных электронов в исследовании микродеформаций в зернах циркона, включающие (1) анализ значимости влияния условий регистрации EBSD-изображений при разном ускоряющем напряжении пучка U на соотношения сигнал/шум, пространственное разрешение и ширину полос Кикучи; (2) сравнение карт зерна циркона, полученных при разных U; (3) разработку алгоритма поиска минералов и диагностики деформаций в минералах. Методика апробирована на серии из 50 шлифов импактных пород из метеоритных кратеров Вредерфорт (ЮАР) и Кара (хр. Пай-Хой, п-ов Югорский, Россия); среди обнаруженных 436 зерен циркона выявлены все известные типы микродеформаций.

В работе Мясниковой А.С. с соавторами (Мясникова и др., 2025) рассмотрены вопросы применения методов машинного обучения для эффективной классификации кварцитов по их химическому составу, включая идентификацию ключевых микроэлементов и выявление геохимических разли-

чий между образцами. Для значимой выборки данных, подвергнутых интерпретации с помощью методов машинного обучения (их нормализации и аугментации с использованием SMOTE для решения проблемы дисбаланса классов) выполнена кросс-валидация; показано, что в рамках алгоритма CatBoost достигается точность классификации до 97%. Показано, что Mn является ключевым элементом в классификации образцов.

Никифоровым И.В. с соавторами (Никифоров и др., 2025) в рамках высокотемпературного твердофазного метода изучено образование минералоподобных фаз со структурой стронциовитлоquita для серии Sr₉In(PO₄)₇–Ca₉Ln(PO₄)₇ (Ln = Eu³⁺, Yb³⁺). Продукты аттестованы с использованием рентгеновской дифракции, диэлектрической и фотолюминесцентной спектроскопии. Показано, что образцы кристаллизуются в структуре Sr₉In(PO₄)₇ с замещением Sr²⁺ → Ca²⁺ и Eu³⁺ и характеризуются люминесценцией в красно-оранжевой или ИК области за счет излучения ионов Eu³⁺ или Yb³⁺.

В работе Потапова С.В. с соавторами (Потапов и др., 2025) представлены результаты экспериментов по синтезу джерфишерита K₆Fe₂₅S₂₆Cl при изобарно-изотермической выдержке в автоклавах. Установлены оптимальные (500°C, 500 атм, 168 ч) условия синтеза минерала. Полученные фазы аттестованы с использованием СЭМ, рентгеноструктурного анализа и спектроскопии комбинационного рассеяния света.

С целью создания инъектируемых костных цементов на основе растворимых фаз фосфатов Са и Mg для применения в малоинвазивных хирургических вмешательствах Гольдберг М.А. с соавторами (Гольдберг и др., 2025) изучено влияние введения натрий карбоксил метилцеллюлозы и механохимической активации на фазовый состав, время схватывания, микроструктуру, когезию, инъектируемость и прочностные свойства цементных материалов. Аттестация материалов выполнена с использованием СЭМ, рентгеноструктурного анализа, вискозиметрии и лазерного анализа частиц.

Благодарности

Редколлегия признательна авторам статей этого выпуска, рецензентам за конструктивные комментарии и предложения и организациям за финансовую поддержку проведенных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Вотяков С.Л., Краснобаев А.А., Крохалев В.Я. (1993) Проблемы прикладной спектроскопии минералов. Екатеринбург: УИФ Наука, 236 с.
- Вотяков С.Л., Щапова Ю.В., Хиллер В.В. (2011) Кристаллохимия и физика радиационно-термических эффектов в ряде U-Th-содержащих минералов как основа для их химического микрозондового датирования. Екатеринбург: ИГТ УрО РАН, 336 с.

- Гольдберг М.А., Крохичева П.А., Хайрутдинова Д.Р., Фомин А.С., Леонов А.В., Баикин А.С., Антонова О.С., Сенцова А.М., Донская Н.О., Баринов С.М., Комлев В.С. (2025) Инжектируемые костные цементы на основе магний-замещенного витлокита, содержащие натрий карбоксиметиллцеллюлозу. *Литосфера*, **25**(2), 355-364.
- Давлетшина А.А., Чебыкин Н.С., Замятин Д.А. (2025) Дифракция отраженных электронов в исследовании микродеформаций в зернах циркона из метеоритных кратеров: методические аспекты. *Литосфера*, **25**(2), 309-319.
- Еремин Н.Н., Еремина Т.А., Гурбанова О.А. (2025) Октаэдрические и тетраэдрические мотивы в структурной минералогии – ответ природы пятому правилу Л. Полинга. *Литосфера*, **25**(2), 196-211.
- Желунцын И.А., Михайловская З.А., Вотяков С.Л. (2025а) Импедансная высокотемпературная спектроскопия как метод фиксации начальных стадий фазовых превращений минералов (на примере алмандина из Верховольской гранатовой копи, Средний Урал). *Литосфера*, **25**(2), 295-308.
- Желунцын И.А., Михайловская З.А., Вотяков С.Л. (2025б) Особенности электрофизических свойств гранатов демантоида и андрадита по данным высокотемпературной импедансной спектроскопии: влияние химического состава и фазовых примесей (методические аспекты). *Литосфера*, **25**(2), 281-294.
- Ильин Г.С., Чуканов Н.В., Расцветаева Р.К., Аксенов С.М. (2025а) Псевдосимметрия и особенности катионного упорядочения в гетерофиллосиликатах. 1. Уточнение кристаллической структуры шюллерита $\text{Ba}_2\text{Na}(\text{Mn,Ca})(\text{Fe}^{3+}, \text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_2\text{Ti}_2(\text{Si}_2\text{O}_7)_2(\text{O}, \text{F})_4$. *Литосфера*, **25**(2), 212-220.
- Ильин Г.С., Чуканов Н.В., Пеков И.В., Ямнова Н.А., Расцветаева Р.К., Япаскурт В.О., Аксенов С.М. (2025б) Псевдосимметрия и особенности катионного упорядочения в гетерофиллосиликатах. 2. Уточнение кристаллической структуры Са-содержащего минерала ряда перротита. *Литосфера*, **25**(2), 221-237.
- Канева Е.В., Радомская Т.А., Докучиц Э.Ю., Шендрик Р.Ю. (2025) Франкаменит в чароитовых породах Мурунского массива: сравнительная характеристика зеленой и сиренево-серой разновидности. *Литосфера*, **25**(2), 238-250.
- Каулина Т.В. (2010) Образование и преобразование циркона в полиметаморфических комплексах. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 144 с.
- Колесов Б.А. (2009) Раман-спектроскопия в неорганической химии и минералогии. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 189 с.
- Кочубей Д.И., Бабанов Ю.А., Замираев К.И., Ведринский Р.В., Крайзман В.Л., Кулипанов Г.П., Мазалов Л.Н., Скринский А.Н., Федоров В.К., Хельмер Б.Ю., Шуваев А.Т. (1988) EXAFS-спектроскопия. Новосибирск: Наука, 306 с.
- Марфунин А.С. (1974) Введение в физику минералов. М.: Недра, 328 с.
- Морохин А.И., Королева М.С., Шумилова Т.Г., Исаенко С.И. (2025) Поверхностные свойства маломедистого борнита в динамике. *Литосфера*, **25**(2), 251-262.
- Мясникова А.С., Шендрик Р.Ю., Елисеев И.А., Чачангова О.И., Федоров А.М., Непомнящих А.И. (2025) Применение методов машинного обучения для классификации кварцитов по химическому составу: влияние микроэлементов и геохимическая идентификация. *Литосфера*, **25**(2), 320-335.
- Никифоров И.В., Жуковская Е.С., Гостева А.Н., Аксенов С.М., Дейнеко Д.В. (2025) Формирование минералоподобных фаз в системе $\text{Sr}_3\text{In}(\text{PO}_4)_7\text{--Ca}_9\text{Ln}(\text{PO}_4)_7$. *Литосфера*, **25**(2), 336-343.
- Потапов С.В., Шарыгин И.С., Медведев В.Я., Иванова Л.А., Щербаков Ю.Д. (2025) Экспериментальные исследования по синтезу джерфишериита. *Литосфера*, **25**(2), 344-354.
- Скублов С.Г. (2005) Геохимия редкоземельных элементов в пороодообразующих метаморфических минералах. СПб.: Наука, 147 с.
- Чашухин И.С., Вотяков С.Л., Щапова Ю.В. (2007) Кристаллохимия хромшпинели и окситермобарометрия ультрамафитов складчатых областей. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 310 с.
- Щапова Ю.В., Вотяков С.Л., Замятин Д.А., Червяковская М.В., Панкрушина Е.А. (2020) Минералы-концентраторы d- и f-элементов: локальные спектроскопические и ЛА-ИСП-МС исследования состава, структуры и свойств, геохронологические приложения. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 424 с.
- Щапова Ю.В., Кисин А.Ю., Чебыкин Н.С., Вотяков С.Л. (2025) Примесный состав, структурные особенности и люминесцентные свойства Cr-содержащей благородной шпинели из мраморов восточного склона Урала. *Литосфера*, **25**(2), 263-280.
- Chukanov N.V., Vigasina M.F. (2020) Vibrational (Infrared and Raman) Spectra of Minerals and Related Compounds. Springer, 1376 p.
- Chukanov N.V., Chervonnyi A.D. (2016) Infrared spectroscopy of minerals and related compounds. Springer International Publishing. Switzerland, 1080 p.

REFERENCES

- Chashchukhin I.S., Votyakov S.L., Shchapova Yu.V. (2007) Crystal chemistry of chrome spinels and oxythermobarometry of ultramafic folded regions. Ekaterinburg, IGG UrO RAS, 310 p. (In Russ.)
- Chukanov N.V., Vigasina M.F. (2020) Vibrational (Infrared and Raman) Spectra of Minerals and Related Compounds. Springer, 1376 p.
- Chukanov N.V., Chervonnyi A.D. (2016) Infrared spectroscopy of minerals and related compounds. Springer International Publishing. Switzerland, 1080 p.
- Davletshina A.A., Chebykin N.S., Zamyatin D.A. (2025) Electron backscatter diffraction in the study of microdeformations in zircon grains from meteorite craters: methodological aspects. *Lithosphere (Russia)*, **25**(2), 309-319.
- Eremin N.N., Eremina T.A., Gurbanova O.A. (2025) Octahedral and tetrahedral patterns in structural mineralogy – nature's answer to L. Pauling's fifth rule. *Lithosphere (Russia)*, **25**(2), 196-211.
- Goldberg M.A., Kroklicheva P.A., Khayrutdinova D.R., Fomin A.S., Leonov A.V., Baikin A.S., Antonova O.S., Sentsova A.M., Donskaya N.O., Barinov S.M., Komlev V.S. (2025) Injected bone cements based on magnesium-substituted whitlockite, containing sodium car-

- boxymethyl cellulose. *Lithosphere (Russia)*, **25**(2), 355-364.
- Ilyin G.S., Chukanov N.V., Rastsvetaeva R.K., Aksenov S.M. (2025a) Pseudosymmetry and cation ordering in heterophyllosilicates. 1. Refinement of the crystal structure of schüllerite $\text{Ba}_2\text{Na}(\text{Mn,Ca})(\text{Fe}^{3+}, \text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_2\text{Ti}_2(\text{Si}_2\text{O}_7)_2(\text{O,F})_4$. *Lithosphere (Russia)*, **25**(2), 212-220.
- Ilyin G.S., Chukanov N.V., Pekov I.V., Yamnova N.A., Rastsvetaeva R.K., Yapaskur V.O., Aksenov S.M. (2025b) Pseudosymmetry and features of cation ordering in heterophyllosilicates. 2. Refinement of the crystal structure of a Ca-containing mineral of the perrotite series. *Lithosphere (Russia)*, **25**(2), 221-237.
- Kaneva E.V., Radomskaya T.A., Dokuchits E.Yu., Shendrik R.Yu. (2025) Frankamenite in charoite rocks of the Murun massif: comparative characterization of green and lilac-gray varieties. *Lithosphere (Russia)*, **25**(2), 238-250.
- Kaulina T.V. (2010) Formation and transformation of zircon in polymetamorphic complexes. Apatity, Publishing House of the Kola Scientific Center of the RAS, 144 p. (In Russ.)
- Kochubey D.I., Babanov Yu.A., Zamaraev K.I., Vedrinsky R.V., Kreizman V.L., Kulipanov G.P., Mazalov L.N., Skrinisky A.N., Fedorov V.K., Helmer B.Yu., Shuvaev A.T. (1988) EXAFS spectroscopy. Novosibirsk, Nauka Publ., 306 p. (In Russ.)
- Kolesov B.A. (2009) Raman spectroscopy in inorganic chemistry and mineralogy. Novosibirsk, Publishing House of the SB RAS, 189 p. (In Russ.)
- Marfunin A.S. (1974) Introduction to the physics of minerals. Moscow, Nedra Publ., 328 p. (In Russ.)
- Morokhin A.I., Koroleva M.S., Shumilova T.G., Isaenko S.I. (2025) Surface properties of low-copper bournite in dynamics. *Lithosphere (Russia)*, **25**(2), 251-262.
- Myasnikova A.C., Shendrik R.Yu., Eliseev I.A., Chachanagova O.I., Fedorov A.M., Nepomniyschikh A.I. (2025) Application of machine learning methods to classify quartzites by chemical composition: the influence of trace elements and geochemical identification. *Lithosphere (Russia)*, **25**(2), 320-335.
- Nikiforov I.V., Zhukovskaya E.S., Gosteva A.N., Aksenov S.M., Deineko D.V. (2025) Formation of mineral-like phases in system $\text{Sr}_9\text{Ln}(\text{PO}_4)_7\text{--Ca}_9\text{Ln}(\text{PO}_4)_7$. *Lithosphere (Russia)*, **25**(2), 336-343.
- Potapov S.V., Sharygin I.S., Medvedev V.Ya., Ivanova L.A., Shcherbakov Yu.D. (2025) Experimental studies on the synthesis of djerfisherite. *Lithosphere (Russia)*, **25**(2), 344-354.
- Shchapova Yu.V., Kissin A.Yu., Chebykin N.S., Votyakov S.L. (2025) Chemical composition, structural features and luminescent properties of Cr-bearing spinel from marbles of the Eastern Slope of the Urals. *Lithosphere (Russia)*, **25**(2), 263-280.
- Shchapova Yu.V., Votyakov S.L., Zamyatin D.A., Chervyakovskaya M.V., Pankrushina E.A. (2020) Minerals concentrators of d- and f-elements: Local spectroscopic and LA-ISP-MS studies of composition, structure and properties, geochronological applications. Novosibirsk, Publishing House of the SB of the RAS, 424 p. (In Russ.)
- Skublov S.G. (2005) Geochemistry of rare earth elements in rock-forming metamorphic minerals. St.Petersburg, Nauka Publ., 147 p. (In Russ.)
- Votyakov S.L., Krasnobaev A.A., Krokhalev V.Ya. (1993) Problems of applied spectroscopy of minerals. Ekaterinburg, UIF Nauka Publ., 236 p. (In Russ.)
- Votyakov S.L., Shchapova Yu.V., Hiller V.V. (2011) Crystal chemistry and physics of radiation-thermal effects in a number of U-Th-containing minerals as a basis for their chemical microprobe dating. Ekaterinburg, IGG UrO RAS, 336 p. (In Russ.)
- Zhelunitsyn I.A., Mikhaylovskaya Z.A., Votyakov S.L. (2025b) Electrophysical properties of demantoid and andradite garnets according to high-temperature impedance spectroscopy data: the influence of chemical and phase impurities (methodological aspects). *Lithosphere (Russia)*, **25**(2), 281-294.
- Zhelunitsyn I.A., Mikhaylovskaya Z.A., Votyakov S.L. (2025a) High-temperature impedance spectroscopy as a technique for monitoring the initial stages of phase transformations in minerals (exemplified by almandine from the Verkhovskaya garnet mine, Middle Urals). *Lithosphere (Russia)*, **25**(2), 295-308.