МИНЕРАЛОГИЯ

DOI: 10.7868/S3034506526100134 Оригинальная статья
УДК 548.3(548.32)+546+553.411.071+553.2(553.252.2)

Новая селенистая разновидность сонораита

М.В. Стрельников[1,2,*], член-корреспондент РАН И.В. Пеков[1], В.О. Япаскурт[1], С.Н. Бритвин[3,4], П.А. Плетнёв[1], М.Ф. Вигасина[1]

[1]Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Геологический факультет, Москва, Российская Федерация
[2]Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе, Москва, Российская Федерация
[3]Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация
[4]Кольский научный центр РАН, Апатиты, Российская Федерация
**E-mail: sva240319600@yandex.ru*

Поступила 10.06.2026
После доработки 15.07.2026
Принята к публикации 20.07.2026

Аннотация. Методами сканирующей электронной спектроскопии, электронно-зондового анализа, КР-спектроскопии, порошковой и монокристальной рентгенографии изучен сонораит из зоны окисления Озерновского золоторудного месторождения на Камчатке (первая находка в России). Установлен непрерывный ряд твёрдых растворов от практически беспримесного сонораита, отвечающего идеализированной формуле $Fe^{3+}(Te^{4+}O_3)(OH)\cdot H_2O$, до богатой Se новой разновидности этого минерала с составом $Fe^{3+}_{0,98}(Te^{4+}_{0,55}Se^{4+}_{0,47})_{\Sigma 1,02}O_{3,01}(OH)\cdot nH_2O$ (содержание SeO_2 — до 22,0 мас. %). В сонораите Se изоморфно замещает Te по схеме $(Se^{4+}O_3)^{2-} \rightarrow (Te^{4+}O_3)^{2-}$, что в т.ч. отражается в закономерном уменьшении параметра *b* его элементарной ячейки: от 10,3 до 10,2 Å. Впервые в сонораите установлены примеси S и As: SO_3 – до 1,8 мас. %, As_2O_5 — до 1,5 мас. %. Вхождение примесной S осуществляется по схеме $(S^{6+}O_4)^{2-} \rightarrow (Te_{4+}O_3)^{2-}$. Механизм вхождения примесного As не ясен, но, вероятно, он отвечает схеме $(As^{5+}O_3OH)^{2-} \rightarrow (Te^{4+}O_3)^{2-}$. Впервые публикуются электронно-зондовые анализы хорошего качества как для сонораита близкого к идеализированному составу, так и для его разновидностей, содержащих разные количества примесей Se, As, S. Эмпирически установлено, что природные водные теллуриты Fe^{3+} имеют разное сродство к примесному Se, которое убывает в ряду теллуромандариноит → сонораит → поит → эммонсит.

Ключевые слова: сонораит, водный гидроксил-теллурит железа, гипергенные минералы теллура, селен, зона окисления рудных месторождений, Озерновское месторождение, Камчатка

Финансирование. Минералогические, спектроскопические и кристаллохимические исследования выполнены при поддержке РНФ, проект № 25-17-00005 (М.В.С., И.В.П., М.Ф.В.).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

Вклад авторов в публикацию. Концепция статьи — ПИВ, СМВ; анализ данных литературы — СМВ, ПИВ; написание текста статьи — СМВ; редактирование — ПИВ; сбор каменного материала для исследований — СМВ, ППА, ПИВ; выполнение электронно-зондовых исследований — ЯВО, СМВ; выполнение рентгенографических исследований — БСН, ПИВ; КР-спектроскопия — СМВ, ВМФ.

© Стрельников М.В., Пеков И.В., Япаскурт В.О., Бритвин С.Н., Плетнёв П.А., Вигасина М.Ф., 2026
© Strelnikov M.V., Pekov I.V., Yapaskurt V.O., Britvin S.N., Pletnev P.A., Vigasina M.F., 2026

Благодарности. Коллектив авторов выражает огромную благодарность руководству, геологам и всем сотрудникам АО «СиГМА», которые оказали неоценимую помощь в сборе материала для исследований. Порошковые рентгенографические данные для пяти образцов выполнены в Центре рентгеноструктурных исследований Научного парка СПбГУ в рамках проекта 125021702335-5. За макрофотосъёмку образцов сонораита авторы глубоко признательны М.Д. Мильшиной.

Ссылка для цитирования: Стрельников М.В., Пеков И.В., Япаскурт В.О., Бритвин С.Н., Плетнёв П.А., Вигасина М.Ф. Новая селенистая разновидность сонораита. *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле / Doklady Earth Sciences*. 2026. Т. 530. № 2. С. 369–381. https://doi.org/10.7868/S3034506526100134

DOI: 10.7868/S3034506526100134 Original Article

New Selenian Variety of Sonoraite

M.V. Strelnikov[1,2,*], Corresponding Member of Russian Academy of Sciences I.V. Pekov[1], V.O. Yapaskurt[1], S.N. Britvin[3,4], P.A. Pletnev[1], M.F. Vigasina[1]

[1]Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation
[2]Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russian Federation
[3]Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russian Federation
[4]Kola Science Center, Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation
**E-mail: sva240319600@yandex.ru*

Received June 10, 2026
After revision July 15, 2026
Accepted July 20, 2026

Abstract. Sonoraite from the oxidation zone of the Ozernovskoe gold deposit in Kamchatka (a first find in Russia) was studied using scanning electron microscopy, electron microprobe analysis, Raman spectroscopy, powder and single-crystal X-ray diffraction. A continuous solid-solution series was discovered, from pure sonoraite closely corresponding to the ideal formula $Fe^{3+}(Te^{4+}O_3)(OH)\cdot H_2O$ to a new Se-rich variety of this mineral with a composition $Fe^{3+}_{0.98}(Te^{4+}_{0.55}Se^{4+}_{0.47})_{\Sigma 1.02}O_{3.01}(OH)\cdot nH_2O$ (containing up to 22.0 wt. % SeO_2). In sonoraite, Se substitutes Te according to the scheme $(Se^{4+}O_3)^{2-} \rightarrow (Te^{4+}O_3)^{2-}$, which is reflected in the decrease of the unit-cell parameter *b* from 10.3 to 10.2 Å. For the first time S and As impurities were detected in sonoraite: SO_3 – up to 1.8 wt. %, As_2O_5 – up to 1.5 wt. %. S substitutes Te according to the scheme $(S^{6+}O_4)^{2-} \rightarrow (Te^{4+}O_3)^{2-}$. Mechanism of As → Te substitution is unclear, but it presumably corresponds to the scheme $(As^{5+}O_3OH)^{2-} \rightarrow (Te^{4+}O_3)^{2-}$. Good-quality electron microprobe analyses are first published for both "pure" sonoraite and its varieties containing different amounts of Se, As and S impurities. It is empirically found that natural hydrous tellurites of Fe^{3+} have different affinity for Se impurity which decreases in the series telluromandarinoite → sonoraite → poughite → emmonsite.

Keywords: sonoraite, hydrous hydroxyl-tellurite of iron, secondary minerals of tellurium, selenium, oxidation zone of ore deposits, Ozernovskoe deposit

Funding. Mineralogical, spectroscopic and crystal chemistry study were carried out with the support of the Russian Science Foundation, project no. 25-17-00005 (M.V.S., I.V.P., M.F.V.).

Conflic t of interests. The authors of this article declare that they have no conflict of interest.

Authors contribution. Concept of the article — PIV, SMV; analysis of literature data — SMV, PIV; writing the text of the article — SMV; editing — PIV; field collecting of material for research — SMV, PPA; electron microprobe studies — YVO; XRD studies — BSN; Raman spectroscopy studies — SMV, VMF.

Acknowledgments. Authors expresses their deep gratitude to the management, geologists and all employees of SiGMA JSC, who provided valuable assistance in collecting of the material. Powder X-ray data for five samples were performed at the Center for X-ray Structural Studies of the St. Petersburg State University Science Park as part of project 125021702335-5. The authors are deeply grateful to M.D. Milshina for the photos of sonoraite samples.

For Citation: Strelnikov M.V., Pekov I.V., Yapaskurt V.O., Britvin S.N., Pletnev P.A., Vigasina M.F. New Selenian Variety of Sonoraite. *Doklady Rossiyskoy Akademii Nauk. Nauki o Zemle / Doklady Earth Sciences*. 2026;530(2):369–381. (In Russ.) https://doi.org/10.7868/S3034506526100134

ВВЕДЕНИЕ

Селен и теллур являются родственными элементами-халькогенами и нередко накапливаются в одних и тех же геохимических обстановках. В природе изоморфизм между этими элементами достаточно обычен в бескислородных минералах, что же касается природных оксосолей с Te и Se, то здесь картина иная: судя по имеющимся данным, замещение Se ↔ Te в кислородсодержащих минералах — явление редкое, и известно о нем очень мало. Лишь совсем недавно были охарактеризованы селенистые разновидности поита $Fe^{3+}_2(Te^{4+}O_3)_2(SO_4)\cdot 3H_2O$ [3,6] и непрерывный ряд мандариноит $Fe^{3+}_2(Se^{4+}O_3)_2\cdot 5–6H_2O$ — теллуромандариноит $Fe^{3+}_2(Te^{4+}O_3)_2\cdot 6H_2O$ [4,7], а других сведений о сколь-либо существенном изоморфизме Se и Te в природных оксосолях нам обнаружить в литературе и базах данных не удалось. Настоящая статья посвящена еще одному примеру широкого изоморфизма между теллуром и селеном в кислородсодержащих минералах — новой богатой Se разновидности сонораита.

Водный гидроксил-теллурит железа сонораит (sonoraite), имеющий идеализированную формулу $Fe^{3+}(Te^{4+}O_3)(OH)\cdot H_2O$ — очень редкий минерал, известный в зоне окисления нескольких богатых Te месторождений, главным образом золото-серебряных. В основе кристаллической структуры сонораита лежит каркас, образованный цепочками Fe^{3+}-центрированных октаэдров, которые скреплены между собой и одиночными тригонально-пирамидальными («зонтичными») полиэдрами $(TeO_3)^{2-}$. OH-группы и часть молекул воды координируют катионы Fe^{3+}, тогда как остальные молекулы воды располагаются в каналах каркаса [8].

В публикациях и базах данных удалось обнаружить информацию о 15 объектах, где встречен этот минерал. Неожиданным оказалось, что в литературе фигурирует лишь один количественный анализ сонораита *относительно хорошего*[1] качества — из рудника Мактецума, Сонора, Мексика: он приведен в статье, посвященной первому описанию этого минерала [11]. Еще в двух[2] работах приводятся электронно-зондовые данные для сонораита, однако: для образца из рудника Кавацу, Япония, дана только эмпирическая формула [15], а для минерала из месторождения Родалькилар (Rodalquilar), Альмерия, Испания, опубликован [14] анализ плохого качества, выполненный на фазово неоднородном материале. О примеси Se в сонораите сообщается только в последней работе, посвящённой гипергенным минералам Родалькилара: Г. Синтес с соавторами опубликовали анализ этого минерала, *возможно*[3]*, содержащего до 5 мас. % Se*. Таким образом, можно констатировать, что химический состав сонораита на сегодня изучен явно недостаточно.

Нами сонораит встречен в зоне окисления Озерновского золоторудного месторождения на Камчатке. Это первая находка данного минерала в России. Наряду с «обычным», т.е. бесселенистым сонораитом мы обнаружили на Озерновском месторождении и богатую Se разновидность этого минерала. Между ними установлен непрерывный ряд твердых растворов.

Озерновское месторождение расположено в 150 км к северу от пос. Ключи Карагинского района, в пределах Срединного хребта Камчатки. Оно относится к эпитермальным объектам золото-теллуридного, кислотно-сульфатного типа (AS/HS: [2, 12]). Яркой особенностью Озерновского месторождения являются богатые Se-содержащим самородным теллуром, теллуридами, селенотеллуридами и Se-содержащими теллуристыми блёклыми рудами диккит-кварцевые и кварцевые прожилки и участки распространения гидротермально-метасоматических брекчий. К зоне их окисления приурочена обильная гипергенная минерализация, где значительную роль играют минералы Te и Se. С геологией Озерновского месторождения и минералогией его руд можно ознакомиться в работах [2, 3, 5, 12].

Исследование выполнено на образцах из карьера главного рудного участка месторождения — участка БАМ. Изучен каменный материал как собранный авторами (П.А.П., М.В.С. и И.В.П.) в период с 2018-го по 2024-й г., так и любезно предоставленный геологами АО «Сибирский Горно-Металлургический Альянс».

[1] Курсив наш: анализ сонораита из работы [11], полученный методами мокрой химии, имеет значительно больший дефицит суммы, чем ожидается для соединения состава $Fe^{3+}(Te^{4+}O_3)(OH)\cdot H_2O$.

[2] Качественный электронно-зондовый анализ, приведённый в работе [10], скорее всего соответствует не сонораиту, а какому-то другому теллуриту или смеси минералов, в пользу чего говорят представленные в этой же статье данные КР-спектроскопии этого образца (см. ниже, в разделе Обсуждение результатов).

[3] Курсив наш: приведённый в работе [14] ЭДС-анализ сонораита содержит наряду с Fe, Te, Se и As также 6 мас. % Si и 1 мас. % Sb. Сумма этого анализа равна 100,2 мас. %, тогда как сумма анализа для соединения состава $Fe^{3+}(Te^{4+}O_3)(OH)\cdot H_2O$ составляет 89,9 мас. %, а для Se-содержащих разновидностей сонораита должна быть ещё меньше. На основании этого можно сделать вывод, что проанализированный в работе [14] сонораит сильно загрязнён, и мы не можем исключить, что источником Se в этом анализе являются вростки другого минерала, например, мандариноита $Fe^{3+}_2(Se^{4+}O_3)_2\cdot 5–6H_2O$, который, как отмечено в этой же работе, ассоциирует с сонораитом.

УСЛОВИЯ НАХОЖДЕНИЯ И МИНЕРАЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОЗЕРНОВСКОГО СОНОРАИТА

Сонораит в Озерновском месторождении приурочен к гипергенно измененным участкам диккит-кварцевых прожилков и зон гидротермально-метасоматических брекчий, богатых селенистой разновидностью самородного теллура (как правило содержащей 13–30 мас. % примесного Se). Наиболее обильные скопления гипергенных минералов характерны для верхних горизонтов рудных тел, однако встречаются они и глубже — в зонах пересечения рудных прожилков и водопроницаемых систем трещин. В составе гипергенной минерализации здесь преобладают теллуриты Fe^{3+}: распространены эммонсит $Fe^{3+}_2(TeO_3)_3{\cdot}2H_2O$, поит $Fe^{3+}_2(TeO_3)_2(SO_4){\cdot}3H_2O$, сонораит $Fe^{3+}TeO_3(OH){\cdot}H_2O$ и теллуромандариноит $Fe^{3+}_2(TeO_3)_3{\cdot}6H_2O$, встречается озерновскит $Fe^{3+}_4(Te^{4+}_2O_4)(Te^{4+}O_3)_4{\cdot}7H_2O$. Широко развиты простые оксиды Te^{4+} — диморфные теллурит и парателлурит TeO_2, а также порошковатый самородный селен. Распространён единственный обнаруженный здесь селенит — мандариноит $Fe^{3+}_2(SeO_3)_2{\cdot}5–6H_2O$ [4]. Из гипергенных минералов, не содержащих Se и Te, очень широко развиты гётит и ярозит, изредка встречаются самородное (в т.ч. горчичное) золото, самородная сера и хлораргирит.

Сонораит как правило находится в трещинах (иногда целиком заполняя их) и кавернах диккит-кварцевых агрегатов (см. рис. 1). Для него характерны зелёная разных оттенков, чаще всего жёлто- или салатово-зелёная, реже зеленовато-жёлтая окраска и сильный стеклянный блеск (рис. 1). Сонораит наиболее часто образует «россыпи» и друзы полупрозрачных пластинчатых или таблитчатых кристаллов (рис. 2 а, б), уплощённых по (100) и как правило расщеплённых, зачастую сильно. Размер таких кристаллов варьирует от 10 мкм до 1 мм. Обычны сферолиты размером от 50 мкм до 2 мм, сложенные пластинчатыми кристаллами (см. рис. 1, 2 в). Часто встречаются массивные и друзовые корки этого минерала площадью до 4 $см^2$, нарастающие на кварц, гётит, диккит, ярозит, поит и минералы ряда мандариноит-теллуромандариноит (см. рис. 1, 2). Нередко сонораит и поит «пропитывают» агрегаты диккита; такие образования представлены сплошными корками порошковатого сложения и имеют зеленовато-жёлтую или бледно-зелёную окраску. Изредка сонораит образует нерасщеплённые псевдоромбоэдрические кристаллы (см. рис. 2 г) размером не более 50 мкм. Отметим, что некоторые образцы сонораита неустойчивы под вакуумом: на кристаллах и агрегатах при нахождении в камере электронного микроскопа менее чем за час появляются трещины дегидратации (см. рис. 2 г, е).

Встречены частичные и полные псевдоморфозы по теллуридам и селенотеллуридам Au (калавериту, малетойваямиту, гачингиту), сложенные агрегатами сонораита, горчичного золота, теллурита/парателлурита и самородного селена. Иногда сонораит вместе с теллуритом/парателлуритом и самородным селеном дает псевдоморфозы по Se-содержащему самородному теллуру.

В большинстве случаев сонораит образуется последним из всех гипергенных минералов Se и Te, нарастая в полостях на поит, мандариноит, теллуромандариноит, теллурит, парателлурит и самородный селен. Лишь изредка на сонораит нарастают игольчатые кристаллы озерновскита (см. рис. 1 а) или агрегаты эммонсита (см. рис. 1 б).

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ

Определение химического состава сонораита из Озерновского месторождения выполнено методом электронно-зондового анализа. Работы проводились в Лаборатории локальных методов исследования вещества кафедры петрологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова на сканирующем электронном микроскопе Jeol IT-500 с ЭДС INCA X-Max-50. Количественный химический анализ выполнялся при ускоряющем напряжении 20 кВ, силе тока 0,7 нА и диаметре электронного зонда 3 мкм. Стандарты: Te — PbTe, Se — PbSe, S — FeS_2, As — InAs, P — GaP, Fe — Fe. В качестве аналитических были использованы линии *K*-серий для S, P и Fe, а для Se, As и Te — линии *L*-серий. Перекрытий аналитических, которые могли бы сколь-либо значимо исказить результаты анализа, в данной системе определяемых элементов не выявлено.

Методом электронно-зондового микроанализа исследован 21 образец сонораита из Озерновского месторождения. Для них получено более 100 точечных анализов. При анализе большое внимание уделялось однородности анализируемых образцов: при большом увеличении выбирались только однородные кристаллы размером более 10 мкм и не анализировались участки индивидов сонораита, где он соприкасается с другими минералами Se и Te. Представительные анализы сонораита с разным содержанием Se даны в таблице 1.

Помимо видообразующих элементов — Fe и Te — во многих образцах обнаружены примесные компоненты. Главный из них — Se, реже фиксируются As и S. Расчёт эмпирических формул минерала произведён на сумму всех перечисленных элементов, равную 2, в соответствии с формулой $A^{3+}(BO_3)(OH){\cdot}H_2O$ [8], где позицию *A* занимает Fe^{3+}, позицию *B* — Te^{4+}, Se^{4+}, S^{6+} и As^{5+}. Количество OH-групп принято равным 1 на формулу. Мы не используем чисто анионный базис для расчёта формул сонораита, т.к. в его составе находится сразу несколько элементов, степень окисления которых может легко изменяться, и нельзя исключить, что некоторые из них могут находиться (пусть и в небольшом количестве) в валентном состоянии, отличном от указанных выше.

Содержание TeO_2 в изученных образцах варьирует в пределах от 36,1 до 60,2 мас. % (0,55–1,03 атома

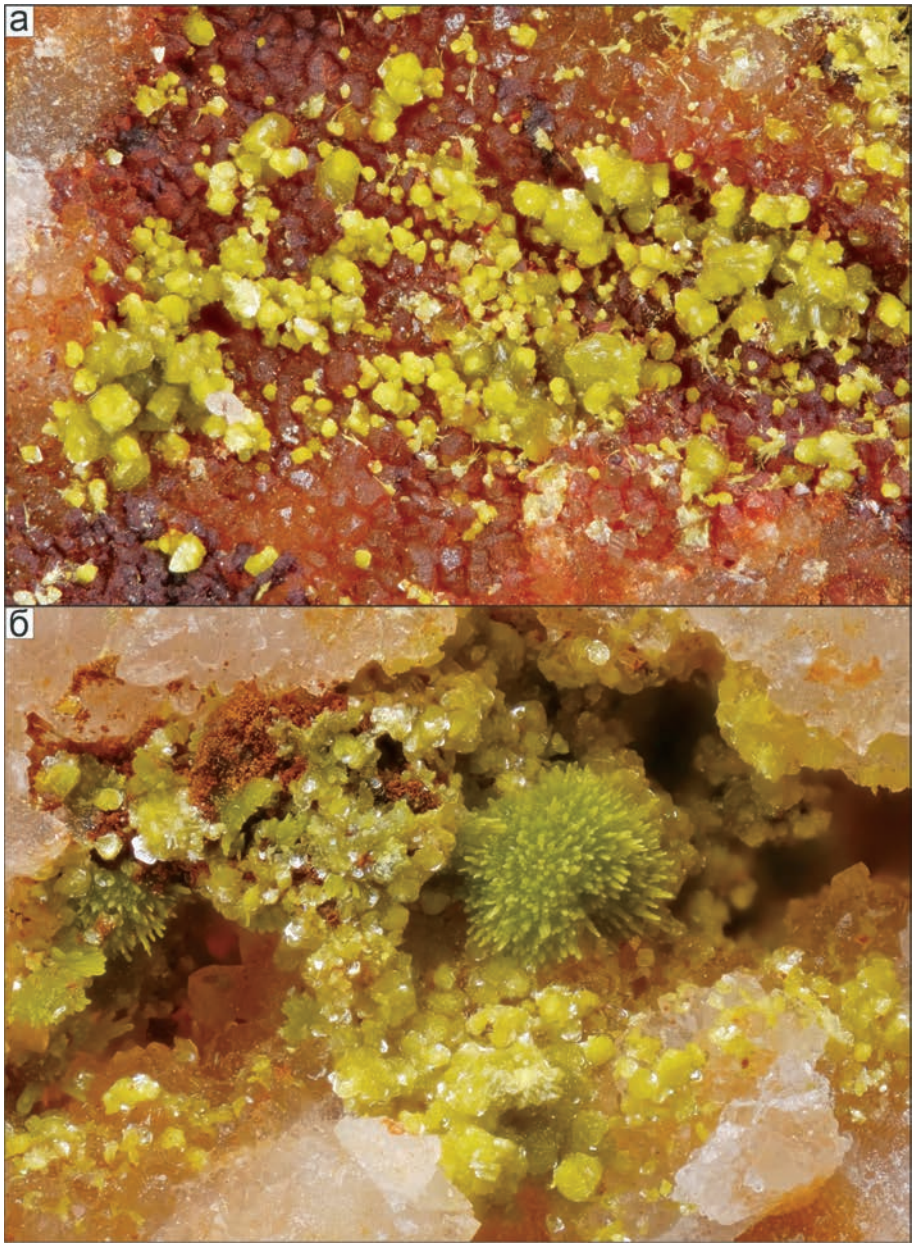


Рис. 1. Сильно расщепленные пластинчатые кристаллы и сферолиты сонораита $Fe^{3+}(Te^{4+}O_3)(OH)\cdot H_2O$ желто-зеленого цвета из Озерновского месторождения: (а) на кварце, покрытом пленкой гётита, с мелким тонкоигольчатым озерновскитом $Fe^{3+}{}_4(Te^{4+}O_4)(Te^{4+}O_3)_4\cdot 7H_2O$, ширина поля зрения 3.6 мм; (б) в полости на кварце с крупными зелеными сферолитами эммонсита $Fe^{3+}{}_2(Te^{4+}O_3)_3\cdot 2H_2O$, ширина поля зрения 3.4 мм. Автор фотографий — М.Д. Мильшина

Fig. 1. Strongly splitted tabular yellowish green crystals and spherulites of sonoraite $Fe^{3+}(Te^{4+}O_3)(OH)\cdot H_2O$ from Ozernovskoe deposit: (a) on quartz (with thin goethite covering) with small acicular crystals of ozernovskite $Fe^{3+}{}_4(Te^{4+}O_4)(Te^{4+}O_3)_4\cdot 7H_2O$, field of view width — 3.6 mm; (б) on quartz with green spherulites of emmonsite $Fe^{3+}{}_2(Te^{4+}O_3)_3\cdot 2H_2O$, field of view width — 3.4 mm. Photo: M.D. Milshina

Te на формулу, ниже — а.ф.), Fe_2O_3 — от 27,5 до 32,1 мас. % (1,95–2,05 а.ф. Fe). Содержания примесей таковы: SeO_2 — от 0,00 до 22,0 мас. % (до 0,47 а.ф. Se), SO_3 — от 0,00 до 1,8 мас. % (0,06 а.ф. S), As_2O_5 — от 0,00 до 1,5 мас. % (0,04 а.ф. As).

На изображениях, полученных под сканирующим электронным микроскопом в режиме обратно-рассеянных электронов, у некоторых кристаллов сонораита хорошо заметна ростовая зональность (см. рис. 2 д, е). Тёмные зоны на этих изображениях обогащены Se относительно более светлых.

РЕНТГЕНОДИФРАКЦИОННЫЕ ДАННЫЕ

Порошковые рентгенодифракционные исследования сонораита выполнены в Центре рентгендифракционных исследований Научного парка СПбГУ

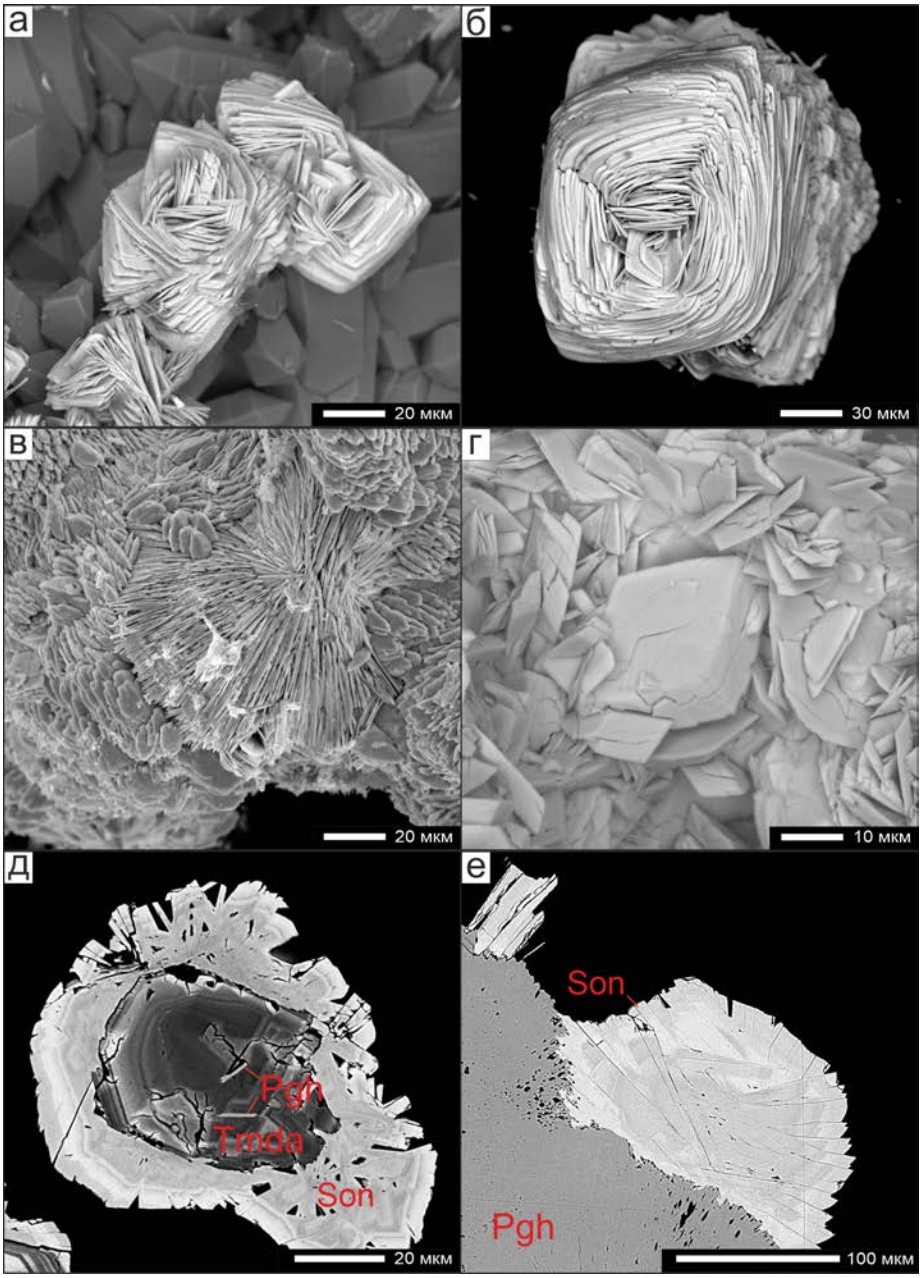


Рис. 2. Морфология кристаллов и агрегатов сонораита из Озерновского месторождения: (а, б) сростки расщеплённых таблитчатых кристаллов сонораита (а – на кварце); (в) параллельные сростки короткопризматических кристаллов эммонсита на сферолите тонкопластинчатого сонораита; (г) друза псевдоромбоэдрических кристаллов сонораита; (д, е) агрегаты кристаллов сонораита (полированные срезы) с ростовой концентрической зональностью, наросшие на теллуромандариноит (д) и поит (е): тёмные зоны обогащены Se относительно более светлых. Изображения получены под сканирующим электронным микроскопом: (а, в, г) — в режиме вторичных электронов (SE), (б, д, е) — в режиме обратно-рассеянных электронов (BSE).

Fig. 2. Morphology of sonoraite from Ozernovskoe deposit: (а, б) intergrowths of tabular splitted sonoraite crystals (а – on quartz); (в) parallel intergrowths of emmonsite crystals on spherulitic aggregate of sonoraite; (г) aggregate of pseudorhombohedral crystals of sonoraite; (д, е) polished sections of sonoraite crystals with well-visible growth concentric zonation on telluromandarinoite (е) and poughite (е): dark zones are enriched with Se compare to light ones. SEM images: а, в, г — SE mode, б, д, е — BSE mode

(Санкт-Петербург). Порошковые рентгенограммы получены на дифрактометре Rigaku R-AXIS Rapid II с цилиндрическим IP детектором (монохроматизированное Co$K\alpha$-излучение, 40 кВ, 15 мА с экспозицией 15 минут; геометрия Дебая–Шеррера, d = 127,4 мм); интегрирование исходных данных с цилиндрического детектора произведено с помощью программного пакета *Osc2Tab* [1]. Расчёт параметров элементарной

Таблица 1. Химический состав сонораита

Table 1. Chemical composition of sonoraite

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
						мас. %							
Fe_2O_3	31,35	31,00	30,31	29,84	31,10	31,18	29,32	29,68	29,51	29,54	27,97	27,90	29,96
SeO_2	20,22	17,71	15,41	13,49	11,24	8,95	4,63	2,95	1,35	–	–	н.д.	
TeO_2	36,34	38,88	40,75	42,74	47,20	50,48	52,87	56,08	57,27	58,34	58,34	52,50	59,90
As_2O_5	–	–	0,60	0,52	–	0,42	0,31	–	–	–	–	н.д.	
SO_3	–	0,29	0,23	0,50	0,43	–	0,60	0,67	–	–	0,21	н.д.	
Сумма	87,91	87,88	87,30	87,09	89,98	91,03	87,73	89,38	88,13	88,38	86,52	80,40	89,86
Формулы, рассчитанные на сумму всех атомов $A+B=5$ при условии, что (OH) = 1													
Fe	0,98	0,98	0,97	0,97	0,98	0,99	0,98	0,98	1,00	1,01	0,97	1,03	1,00
Se	0,45	0,40	0,36	0,31	0,26	0,20	0,11	0,08	0,03	–	–	н.д.	
Te	0,57	0,61	0,65	0,69	0,75	0,80	0,88	0,92	0,97	0,99	1,02	0,97	1,00
As	–	–	0,01	0,01	–	0,01	0,01	–	–	–	–	н.д.	
S	–	0,01	0,01	0,02	0,01	–	0,02	0,02	–	–	0,01	н.д.	
$O_{расч}$	3,01	3,02	3,03	3,04	3,02	3,01	3,035	3,03	3,00	2,995	3,025	2,985	3,00
ΣB*	1,02	1,02	1,03	1,03	1,02	1,01	1,02	1,02	1,00	0,99	1,03	0,97	1,00

Примечание. 1–11 — Озерновское месторождение; 12 — месторождение Моктецума, Сонора, Мексика [11]; 13 — расчетные значения для $Fe^{3+}(TeO_3)(OH)\cdot H_2O$. * B = Te+Se+S+As. Прочерк означает содержание компонента ниже предела обнаружения, н.д. — нет данных. Анализы расположены в порядке уменьшения содержания Se.

Note. 1–11 — Ozernovskoe deposit; 12 — Moctezuma deposit, Sonora, Mexico [11]; 13 — calculated data for $Fe^{3+}(TeO_3)(OH)\cdot H_2O$. * B = Te+Se+S+As. Dash – content is below detection limit; н.д. — no data available. Analyses are arranged in decreasing order of Se content.

ячейки осуществлялся с помощью программного обеспечения STOE WinXPOW Crystallinity, версия 2.02.

Монокристальные рентгенодифракционные исследования сонораита проведены на кафедре кристаллографии и кристаллохимии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, на дифрактометре Xcalibur S CCD с монохроматизированным Mo$K\alpha$-излучением. Параметры элементарной ячейки (ниже — э.я.) сонораита приведены в таблице 2.

КР-СПЕКТРОСКОПИЯ

На материале из Озерновского месторождения впервые получены КР-спектры надёжно идентифицированной богатой Se разновидности сонораита. Исследования проведены в двух лабораториях: (1) на кафедре минералогии МГУ имени М.В. Ломоносова и (2) в учебно-научной лаборатории геммологии на кафедре минералогии, геммологии и петрографии геологоразведочного факультета МГРИ имени Серго Орджоникидзе. В обеих лабораториях КР-спектры получены на неориентированных образцах при комнатной температуре с помощью рамановского микроскопа EnSpectr 532 при увеличении 40· , при накоплении сигнала в течение 0,75 или 1 с и усреднении по 10, 20 или 50 экспозициям в зависимости от интенсивности рассеянного излучения. Длина волны лазерного излучения составляла 532 нм, мощность лазерного источника — от 1,6 до 3,8 мВт. Спектральное разрешение составило 3 $см^{-1}$, диаметр лазерного пятна — около 5 мкм. Интерпретация данных КР-спектроскопии выполнена в соответствии со справочником [13].

Изучена серия из девяти образцов, содержание SeO_2 в которых варьирует от 0,0 до 19,5 мас. %, SO_3 — от 0,00 до 1,6 мас. %, As_2O_5 — от 0,0 до 1,1 мас.%. На рисунке 3 приведены представительные КР-спектры сонораита следующего состава: (а) $Fe_{1,01}Te_{0,99}O_{2,995}(OH)\cdot nH_2O$ (см. рис. 3 а); (б) $Fe_{0,98}(Te_{0,60}Se_{0,39}S_{0,02}As_{0,01})\ O_{2,975}(OH)\cdot nH_2O$ (см. рис. 3 б).

В спектре бесселенистого сонораита (рис. 3 а) присутствуют сильные линии валентных [781 $см^{-1}$ (ν_1) и 664 $см^{-1}$ + 635пл $см^{-1}$ (ν_3)] (пл – плечо) и деформационных [468 $см^{-1}$ + 424 $см^{-1}$ (ν_4) и 378 $см^{-1}$ (ν_2)], свойственных колебаниям аниона $(TeO_3)^{2-}$. В спектрах селенистых разновидностей этого минерала (см. рис. 3 б) перечисленные линии смещаются в более высокочастотную область: для валентных колебаний вплоть до 791 $см^{-1}$ (ν_1) и 674 $см^{-1}$ (ν_3), для деформационных — до 480 $см^{-1}$ + 430 $см^{-1}$ (ν_4) и 388 $см^{-1}$ (ν_2). Только в КР-спектрах наиболее селенистых (более 15 мас. % SeO_2) разновидностей сонораита возникает небольшое расщепление линии около 380 $см^{-1}$ на два пика: 375 $см^{-1}$ и 388 $см^{-1}$. Скорее всего оба этих пика принадлежат

Таблица 2. Параметры моноклинной элементарной ячейки сонораита
Table 2. Parameters of monoclinic unit cell of sonoraite

Источник	Метод	*a*, Å	*b*, Å	*c*, Å	β, °	*V*, Å^3	SeO_2, мас. %
Gaines et al., 1968*	Порошковый	10,984(2)	10,268(1)	7,917(2)	108,49(2)	846,8(5)	н.д.
Yamada et al., 1999**	Порошковый	11,00(3)	10,27(21)	7,92(3)	108,6(3)	848(2)	0
Ruff. net_R070745	Монокристальный	11,011(5)	10,280(5)	7,939(3)	108,36(1)	853(2)	н.д.
Наши данные	Монокристальный	10,979(13)	10,303(6)	7,928(6)	108,44(10)	851(1)	0
Наши данные	Порошковый	10,990(3)	10,271(3)	7,9216(2)	108,34(3)	848,8(3)	2
Наши данные	Порошковый	10,9622(2)	10,2656(19)	7,9168(16)	108,34(3)	845,66(20)	5
Наши данные	Порошковый	10,955(9)	10,254(12)	7,898(6)	108,1(10)	843,4(9)	8
Наши данные	Порошковый	10,903(5)	10,235(4)	7,910(3)	108,04(3)	839,2(4)	12
Наши данные	Порошковый	10,927(9)	10,21(12)	7,894(6)	108,29(10)	836,3(9)	16

Примечание. * — при расшифровке кристаллической структуры сонораита в работе [8] были взяты параметры элементарной ячейки из статьи [11]; ** — параметры элементарной ячейки сонораита рассчитаны нами с использованием порошковых рентгеновских данных из этой работы; н.д. — нет данных.

Note. * — sonoraite unit-cell parameters in [8] were taken from the article [11]. ** — unit-cell parameters of sonoraite were calculated by us using PXRD data from this paper; н.д. — no data available.

деформационным полносимметричным колебаниям (ν_2): аниона $(TeO_3)^{2-}$ для компоненты с 375 см$^{-1}$ и аниона $(SeO_3)^{2-}$ — с 388 см$^{-1}$. Ещё одним отличием спектров селенистых разновидностей сонораита является уширение линии около 790 см$^{-1}$. Наиболее вероятно, что это связано с появлением в этой же области линии валентного полносимметричного колебания ν_1 аниона $(SeO_3)^{2-}$. Кроме того, для КР-спектров только селенистой разновидности сонораита характерна малоинтенсивная линия около 900 см$^{-1}$. Её однозначная идентификация затруднительна: мы с большой осторожностью можем связать её с валентными колебаниями тетраэдров $(Se^{6+}O_4)^{2-}$.

Малоинтенсивное плечо при 525 см$^{-1}$ (см. рис. 3 а) отнесено нами к трансляционным колебаниям Fe^{3+} в октаэдрической координации. В образцах с повышенным содержанием Se (см. рис. 3 б) это плечо становится чуть более выраженным, и его максимум совсем немного смещается к 530 см$^{-1}$.

В спектральной области ниже 350 см$^{-1}$ зарегистрированы многочисленные линии, принадлежащие решеточным модам и трансляционным колебаниям катионов.

В спектрах образцов, обогащенных S, в интервале около 990 см$^{-1}$ отчётливо фиксируется слабая линия валентных колебаний аниона $(SO_4)^{2-}$. Увидеть линии рассеяния, отвечающие изменениям длин связей As^{5+}–O в анионе $(AsO_4)^{3-}$, даже если в изучаемом образце присутствует этот примесный анион, не представляется возможным, поскольку они перекрываются интенсивными линиями валентных колебаний аниона $(Te^{4+}O_3)^{2-}$.

В области выше 3400 см$^{-1}$ в КР-спектрах всех образцов сонораита находятся широкая полоса («купол») в диапазоне 3480–3600 см$^{-1}$ и малоинтенсивная полоса около 3425 см$^{-1}$, отвечающие валентным колебаниям O–H молекул H_2O и OH-групп соответственно. Также для всех изученных образцов сонораита характерна малоинтенсивная линия около 1600 см$^{-1}$, которая относится к деформационным колебаниям молекул воды.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Электронно-зондовый анализ показал, что между «чистым» сонораитом состава $Fe^{3+}_{1,00}Te_{1,00}{}^{4+}O_3(OH)\cdot nH_2O$ и его высокоселенистой разновидностью с составом $Fe^{3+}_{0,98}(Te^{4+}_{0,55}Se^{4+}_{0,47})_{\Sigma 1,02}O_{3,01}(OH)\cdot nH_2O$ на Озерновском месторождении реализуется непрерывный ряд твёрдых растворов (см. табл. 1; рис. 4 а). Этот ряд на всем его зафиксированном протяжении является изоморфным: принадлежность всех его членов к минеральному виду сонораиту в наших образцах однозначно подтверждена как порошковыми и монокристальными рентгеновскими данными, так и КР-спектрами.

Если ранее в литературе был опубликован лишь один анализ сонораита относительно хорошего качества — в оригинальной статье ([11]: см. Введение), то нами в настоящей работе приводится серия электронно-зондовых анализов (см. табл. 1), представительно характеризующая ряд от бесселенистого сонораита до его разновидностей, в которых содержания Te и Se близки.

С увеличением содержания Se в сонораите в КР-спектре закономерно: (1) все линии смещаются

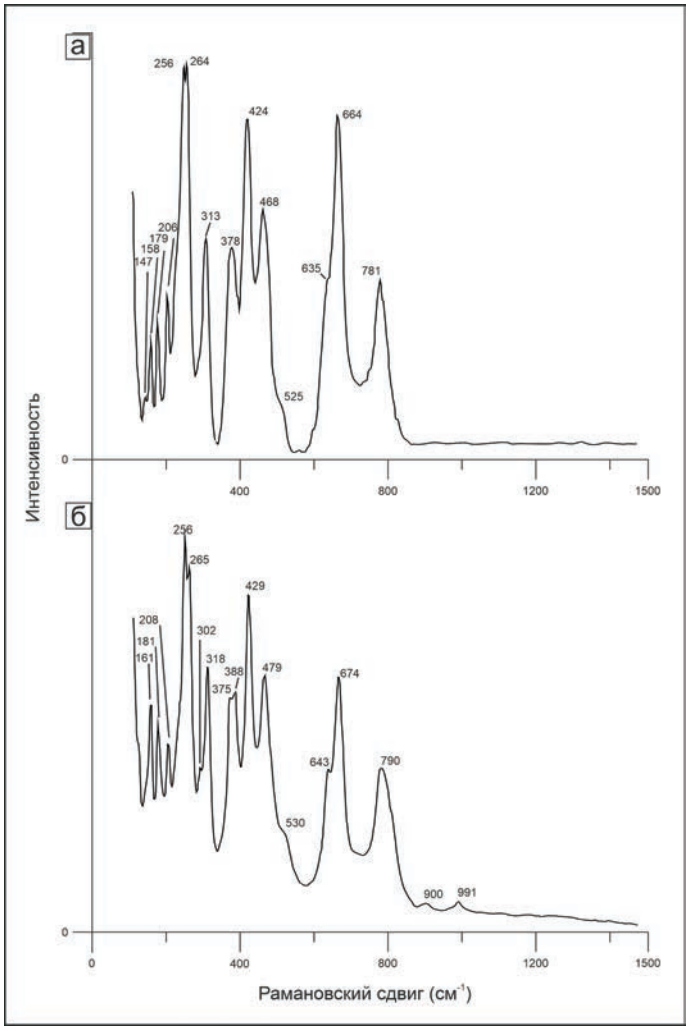


Рис. 3. КР-спектры сонораита из Озерновского месторождения. Химический состав образцов: (а) $Fe_{1,01}Te_{0,99}O_{2,995}(OH)\cdot nH_2O$; (б) $Fe_{0,98}(Te_{0,60}Se_{0,39}S_{0,02}As_{0,01})\ O_{2,975}(OH)\cdot nH_2O$

Fig. 3. Raman spectra of sonoraite from Ozernovskoe deposit. Chemical composition of the samples: (а) $Fe_{1.01}Te_{0.99}O_{2.995}(OH)\cdot nH_2O$; (б) $Fe_{0.98}(Te_{0.60}Se_{0.39}S_{0.02}As_{0.01})\ O_{2.975}(OH)\cdot nH_2O$

в более высокочастотную область на величины от 1 до 11 $см^{-1}$; наиболее ярко это проявлено в диапазоне 370–800 $см^{-1}$, где находятся линии валентных и деформационных колебаний групп $(TeO_3)^{2-}$ (см. рис. 3); (2) уширяется линия около 785 $см^{-1}$, что связано с появлением в этой области ещё одного пика, соответствующего валентному полносимметричному (ν_1) колебанию аниона $(SeO_3)^{2-}$; (3) в спектрах наиболее селенистых разновидностей возникает пик на 388 $см^{-1}$, который скорее всего отвечает деформационному (ν_2) колебанию группировки $(SeO_3)^{2-}$. Схожая картина ранее была зафиксирована нами для Se-содержащего поита [6] и минералов ряда мандариноит — теллуромандариноит [4].

В литературе мы обнаружили пять КР-спектров сонораита: два в работе [9], два в статье [14] и один в работе [10]. Ещё один КР-спектр этого минерала приведён в открытой базе данных rruff.net. Полученные нами КР-спектры бесселенистого сонораита из Озерновского месторождения (см. рис. 3 а) почти идентичны четырём из шести этих спектров. Исключение составили спектр образца из месторождения Родалькилар [14] и тот спектр образца из рудника Моктецума, что опубликован в работе [10].

КР-спектр образца из месторождения Родалькилар оказался очень похож на таковой для очень богатого Se сонораита из Озерновского месторождения (см. рис. 3 б): (а) основные линии валентных и деформационных колебаний аниона $(TeO_3)^{2-}$ смещены в более высокочастотную область; (б) уширена линия около 790 $см^{-1}$; (в) линия около 380 $см^{-1}$ расщеплена на две. Таким образом, КР-спектр из работы [14] скорее всего принадлежит сонораиту, содержащему значительное количество примесного Se^{4+} (предположительно, более 15 мас. % SeO_2). Это позволяет считать Родалькилар еще одним, наряду с Озерновским, месторождением, в зоне окисления которого образуется Se-содержащая разновидность сонораита.

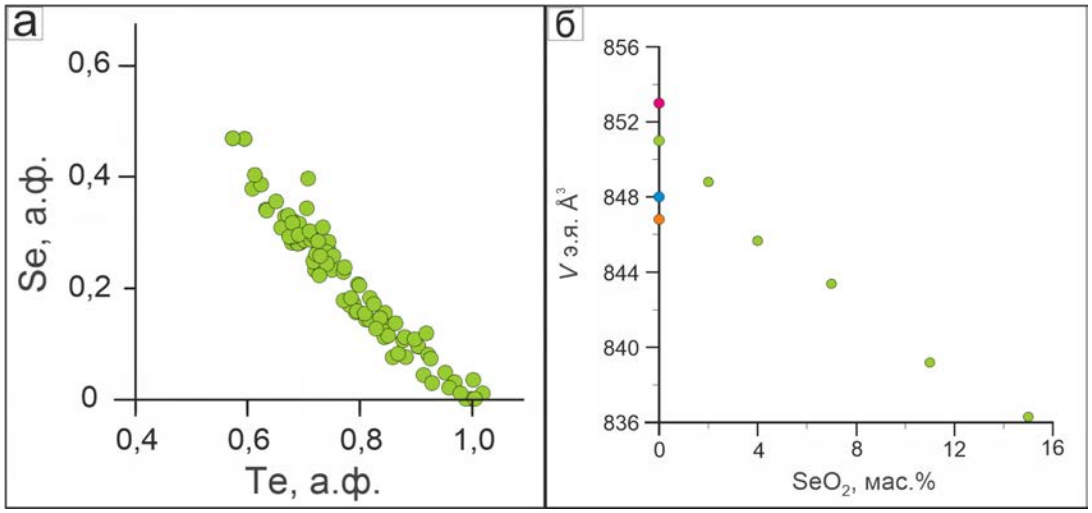


Рис. 4. а) Соотношение Se и Te в сонораите из Озерновского месторождения — в атомах на формулу (а.ф.), рассчитанную на сумму всех компонентов $A+B = 5$ а.ф. (см. текст и табл. 1). б) Зависимость объема элементарной ячейки (V, Å^3) от содержания Se у сонораита из Озерновского месторождения (зелёные точки: наши данные), рудника Кавацу, Шизуока, Япония (синяя точка, по: [15]), месторождения Моктецума, Сонора, Мексика (оранжевая точка, по: [11]), рудника Томбстоун, Аризона, США (пурпурная точка, по: база данных rruff.net, номер карточки *R*070745)

Figure 4. a) Ratio between Se and Te in sonoraite from Ozernovskoe deposit (in *apfu*, per formula calculated based on the sum of all components $A+B = 5$ *apfu*: see text and Table 1). б) Dependence of unit-cell volume (V, Å^3) from Se content in sonoraite from Ozernovskoe deposit (green dots: our data), Kawazu mine, Shizuoka, Japan (blue dot, from: [15]), Moctezuma deposit, Sonora, Mexico (orange dot, from: [11]), Tombstone mine, Arizona, USA (purple dot, from: rruff.net database, card # *R*070745)

КР-спектр образца из статьи [10] очень сильно отличается как от спектров сонораита из Озерновского месторождения, так и от всех спектров в приведённых выше источниках. Он содержит серию пиков в диапазоне 775–695 см$^{-1}$ и интенсивные линии около 580, 510 и 350 см$^{-1}$, ни одна из которых не зафиксирована в других опубликованных КР-спектрах этого минерала. В то же время, в этом КР-спектре отсутствуют типичные для других спектров сонораита высокоинтенсивные линии около 780, 665, 470 и 265 см$^{-1}$. Таким образом, можно уверенно сказать, что в работе Р. Фроста с коллегами (2015)[4] минерал идентифицирован неверно, т.е. приведён КР-спектр не сонораита, а какого-то другого минерала или смеси нескольких соединений[5].

Установленная электронно-зондовым анализом примесь S в сонораите (см. табл. 1) входит в этот минерал по схеме $(SO_4)^{2-} \rightarrow (TeO_3)^{2-}$. Так, в КР-спектрах S-содержащих образцов этого минерала около 900 см$^{-1}$ возникает малоинтенсивная линия, которая уверенно относится нами к колебаниям аниона $(SO_4)^{2-}$. Что же касается примесного As (см. табл. 1), то мы не можем уверенно сказать ни о степени окисления этого элемента, ни о форме, в которой он входит в сонораит. На то, что As здесь находится в степени окисления 5+, косвенно указывает обилие парагенных сонораиту минералов Fe^{3+} — индикаторов высокоокислительной обстановки. Мы с осторожностью предполагаем, что вхождение мышьяка в этот минерал может происходить по следующей схеме: $(As^{5+}O_3OH)^{2-} \rightarrow (TeO_3)^{2-}$.

Методами порошковой и монокристальной рентгенографии показано, что с увеличением содержания Se в сонораите из Озерновского месторождения линейно уменьшается объём э.я. (см. табл. 2, рис. 4 б), в хорошем соответствии с правилом Вегарда. Наиболее «чувствительным» к содержанию Se у этого минерала оказался параметр b э.я. Он закономерно уменьшается в ряду от бесселеновых образцов сонораита к образцам, имеющим значительную примесь этого элемента (см. табл. 2). Это хорошо объясняется особенностями кристаллической структуры сонораита: все «зонтичные» полиэдры $(Te^{4+}O_3)^{2-}$ [и, соответственно, примесные группы $(Se^{4+}O_3)^{2-}$] ориентированы таким образом, что их ось симметрии третьего порядка оказывается почти перпендикулярна оси b (см. [8]). Следовательно, при замещении Te^{4+} на Se^{4+} в таком полиэдре и, соответственно, уменьшении длин связей халькоген–кислород наиболее подверженным изменению параметром э.я. сонораита должен оказаться именно параметр b, что мы и наблюдаем на образцах из Озерновского месторождения.

[4] В отличие от этой работы диагностика сонораита из рудника Томбстоун, Аризона, США (база данных rruff.net) и из Озерновского месторождения (наши данные) независимо подтверждена рентгенодифракционными методами.

[5] Особо отметим, что представленный в этой статье КР-спектр не соответствует не только всем другим спектрам сонораита, но и тем двум спектрам, что приведены в более ранней работе за авторством того же Р. Фроста [9]. Данный факт в статье [10] никак не комментируется.

Сонораит, обладающий цеолитоподобной квазикаркасной кристаллической структурой и содержащий слабо связанные (только посредством водородных связей), «цеолитные» молекулы воды, способен к частичной дегидратации под вакуумом: на его кристаллах в колонне сканирующего электронного микроскопа возникают характерные трещины дегидратации[6] (см. рис. 2 г). Эта кристаллохимическая особенность сонораита может в определённой мере обуславливать колебания сумм некоторых его анализов (см., например, ан. 11 и 12 в табл. 1).

Среди гипергенных теллуритов Озерновского месторождения наиболее распространёнными являются эммонсит $Fe^{3+}_2(TeO_3)_3{\cdot}2H_2O$, поит $Fe^{3+}_2(TeO_3)_2(SO_4){\cdot}3H_2O$, теллуромандариноит $Fe^{3+}_2(TeO_3)_3{\cdot}6H_2O$ и сонораит $Fe^{3+}(Te^{4+}O_3)(OH){\cdot}H_2O$. Они часто находятся в тесной ассоциации друг с другом и, несомненно, формировались практически в одних и тех же условиях. Тем не менее, каждый из них обнаруживает различную степень сродства к примесному Se. Так, теллуромандариноит здесь формирует почти полный изоморфный ряд со своим селенистым аналогом — мандариноитом [4], содержание примесного Se в самой высокоселенистой разновидности сонораита почти равно содержанию Te в атомных количествах (см. табл. 1), а в поите оно ещё меньше (до Se: Te ≈ 1:5, [6]). Единственным минералом класса теллуритов, который содержит очень мало Se, здесь является эммонсит (не выше 1 мас. % SeO_2, как показывают наши электронно-зондовые данные для более чем 70 образцов). Вполне очевидно, что главная причина такого распределения Se между этими минералами Te с разными структурными типами, формировавшимися в практически одинаковых условиях, должна быть именно кристаллохимическая, однако более точное её установление требует дальнейших исследований.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Водный гидроксил-теллурит Fe^{3+} сонораит в зоне окисления Озерновского месторождения представлен непрерывным рядом твёрдых растворов, где состав варьирует от конечного члена, практически точно отвечающего идеализированной формуле $Fe^{3+}(Te^{4+}O_3)(OH){\cdot}H_2O$, до очень богатой Se разновидности состава $Fe^{3+}_{0,98}(Te^{4+}_{0,55}Se^{4+}_{0,47})_{\Sigma 1,02}O_{3,01}(OH){\cdot}nH_2O$ (содержание SeO_2 изменяется от 0,00 до 22,0 мас. %). По данным порошковой рентгенографии и КР-спектроскопии можно сказать, что члены этого ряда твердых растворов изоструктурны. Сонораит — третий после теллуромандариноита и поита кислородный минерал Te, для которого надёжно установлена значительная (целые мас. %) примесь Se.

Впервые публикуются электронно-зондовые анализы сонораита хорошего качества — соответствующие его структурно подтвержденной формуле: как для бесселенистого минерала, так и для разновидностей с различным содержанием Se.

В сонораите Se изоморфно замещает Te по схеме $(Se^{4+}O_3)^{2-} \rightarrow (Te^{4+}O_3)^{2-}$, что подтверждается результатами КР-спектроскопии, данными порошковой и монокристальной рентгенографии. С ростом величины отношения Se: Te происходит линейное уменьшение объёма элементарной ячейки сонораита. Наиболее чувствителен к изменению Se: Te-отношения параметр элементарной ячейки *b*, что обусловлено закономерной ориентировкой в кристаллической структуре полиэдров $(Te^{4+}O_3)$, которые замещаются на $(Se^{4+}O_3)$. С ростом содержания Se в сонораите в его КР-спектрах закономерно: 1) все линии смещаются в более высокочастотную область; 2) происходит уширение линии около 785 $см^{-1}$; 3) возникает дополнительная линия на 388 $см^{-1}$. КР-спектроскопия — экспрессный метод, позволяющий отличить богатый Se сонораит от его бедных Se разновидностей.

Впервые в сонораите зафиксированы примеси S и As: SO_3 — до 1,8 мас. % (0,06 а.ф. S), As_2O_5 — до 1,5 мас. % (0,04 а.ф. As). Вхождение в этот минерал S происходит по схеме $(SO_4)^{2-} \rightarrow (Te^{4+}O_3)^{2-}$, что подтверждается данными КР-спектроскопии. Механизм вхождения примесного As не очевиден; мы с осторожностью предполагаем, что оно может осуществляться по схеме $(As^{5+}O_3OH)^{2-} \rightarrow (TeO_3)^{2-}$.

На примере минералов из зоны окисления Озерновского месторождения эмпирически установлено, что сродство к примесному Se у теллуритов Fe^{3+} заметно различается. Можно выстроить следующий эмпирический ряд структурных типов (минералов) по уменьшению этого сродства: тип мандариноита (теллуромандариноит) → тип сонораита (сонораит) → тип поита (поит) → тип эммонсита (эммонсит). Очевидно, что в основе этой закономерности лежат некие кристаллохимические причины, однако для их установления требуются дальнейшие исследования.

[6] Дефицит суммы электронно-зондовых анализов таких кристаллов, не содержащих примеси Se, составляет около 10 мас. %, что хорошо соответствует идеализированной формуле этого минерала $Fe^{3+}(Te^{4+}O_3)(OH){\cdot}H_2O$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бритвин С.Н., Доливо-Добровольский Д.В., Кржижановская М.Г. Программный пакет для обработки рентгеновских порошковых данных, полученных с цилиндрического детектора дифрактометра Rigaku Raxis Rapid II. *Записки РМО*. 2017. № 3. С. 104–107.
2. Вартанян С.С., Орешин В.Ю., Ершова Н.А. и др. *Определить критерии локализации и вещественный состав золотоносных образований Озерновского рудного поля*. М.: ФГБУ ЦНИГРИ, 1991. С. 184.

3. Кудаева Ш.С., Козлов В.В., Скильская Е.Д. и др. Новый тип золотоносной минерализации на Озерновском Au-Te-Se эпитермальном месторождении (Центральная Камчатка, Россия). *Геол. рудн. месторожд.*. 2024. № 5. С. 505–532.
4. Пеков И.В., Стрельников М.В., Зубкова Н.В. и др. Первый природный пример широкого изоморфизма между селенитами и теллуритами: непрерывный ряд твердых растворов мандариноит–теллуромандариноит, его кристаллохимические и генетические особенности. *Записки РМО*. 2026. № 2. С. 3–33.
5. Стрельников М.В., Пеков И.В., Япаскурт В.О. и др. Высокоселенистый самородный теллур из Озерновского золоторудного месторождения (Камчатка) и особенности изоморфизма в природной системе теллур–селен. *Записки РМО*. 2025. № 2. С. 88–105.
6. Стрельников М.В., Пеков И.В., Япаскурт В.О. и др. Новая богатая селеном разновидность поита из Озерновского золоторудного месторождения (Камчатка). *Записки РМО*. 2026. № 4. (в печати).
7. Back M.E., Grice J.D., Gault R.A. et al. Telluromandarinoite, a new tellurite mineral from the El Indio-Tambo mining property, Andes mountains, Chile. *Can. Mineral*. 2017. Vol. 55. Pp. 21–28.
8. Donnay G., Stewart J.M., Preston H. The crystal structure of sonoraite, $Fe^{3+}Te^{4+}O_3(OH)\cdot H_2O$. *Tschermaks mineralogische und petrographische Mitteilungen*. 1970. Vol. 14. no. 1. Pp. 27–44.
9. Frost R.L., Keeffe E.C. Raman spectroscopic study of the tellurite mineral: sonoraite $Fe^{3+}Te^{4+}O_3(OH)\cdot H_2O$. *J. Raman Spectroscopy*. 2009. Vol. 40. no. 2. Pp. 133–136.
10. Frost R.L., López A., Scholz R. A SEM, EDS and vibrational spectroscopic study of the tellurite mineral: Sonoraite $Fe^{3+}Te^{4+}O_3(OH)\cdot H2O$. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2015. Vol. 147. Pp. 225–229.
11. Gaines R.V., Donnay G., Hey M.H. Sonoraite. *Amer. Miner*. 1968. Vol. 53. no. 11–12. Pp. 1828–1832.
12. Kovalenker V.A., Plotinskaya O. Yu. Te and Se mineralogy of Ozernovskoe and Prasolovskoe epithermal gold deposits, Kuril — Kamchatka volcanic belt. *Geochemistry, Mineralogy and Petrology*. 2005. Vol. 43. Pp. 14–19.
13. Nakamoto K. *Infrared and Raman Spectra of Inorganic and Coordination Compounds*. New York: John Wiley & Sons, 1986. 432 p.
14. Sintes G., Graf B.S.B., Ortiz H. El singular patrimonio mineralógico del Cerro del Cinto (Rodalquilar, Almería, España). *De Re Metallica*. 2025. Vol. 44. Pp. 11–28.
15. Yamada T., Tagai T., Kojiro T. et al. Rare minerals from Kawazu mine, Shizuoka prefecture. In: *Abstract of Joint Meeting the Societies of Earth and Planetary Sciences*. Presentation MC-002. 1999. P. 1.

REFERENCES

1. Britvin S.N., Dolivo-Dobrovolsky D.V., Krzhizhanovskaya M.G. Programmnyj paket dlya obrabotki rentgenovskih poroshkovyh dannyh, poluchennyh s cilindricheskogo detektora difraktometra Rigaku Raxis Rapid II [Software for processing the X-ray powder diffraction data obtained from the curved image plate detector of Rigaku RAXIS Rapid II diffractometer]. *Zapiski RMO*. 2017;3:104–107. (In Russ.)
2. Vartanyan S.S., Oreshin V. Yu., Ershova N.A. et al. *Opredelit' kriterii lokalizacii i veshchestvennyj sostav zolotonosnyh obrazovanij Ozernovskogo rudnogo polya* [To determine the localization criteria and the mineral composition of the gold-bearing formations of the Ozernovsky ore field]. Moscow: TSNIGRI; 1991. (In Russ.)
3. Kudaeva Sh.S., Kozlov V.V., Skilskaya E.D. et al. Novyj tip zolotonosnoj mineralizacii na Ozernovskom Au-Te-Se epitermal'nom mestorozhdenii (Central'naya Kamchatka, Rossiya) [New type of gold-bearing mineralization at the Ozernovskoe Au-Te-Se epithermal deposit (Central Kamchatka, Russia)]. *Geol. Ore Deposits*. 2024;5:547–569. (In Russ.)
4. Pekov I.V., Strelnikov M.V., Zubkova N.V. et al. Pervyj prirodnyj primer shirokogo izomorfizma mezhdu selenitami i telluritami: nepreryvnyj ryad tverdyh rastvorov mandarinoit–telluromandarinoit, ego kristallohimicheskie i geneticheskie osobennosti [First natural example of wide isomorphism between selenites and tellurites: a mandarinoite–telluromandarinoite continuous solid-solution series, its crystal chemical and genetic features]. *Zapiski RMO*. 2026;2:3–33. (In Russ.)
5. Strelnikov M.V., Pekov I.V., Yapaskurt V.O. et al. Vysokoselenistyj samorodnyj tellur iz Ozernovskogo zolotorudnogo mestorozhdeniya (Kamchatka) i osobennosti izomorfizma v prirodnoj sisteme tellur–selen [Selenium-rich native tellurium from the Ozernovskoe gold deposit (Kamchatka, Russia) and isomorphism in the Te–Se system.]. *Zapiski RMO*. 2025;2:88–105. (In Russ.)
6. Strelnikov M.V., Pekov I.V., Yapaskurt V.O. et al. Novaya bogataya selenom raznovidnost' poita iz Ozernovskogo zolotorudnogo mestorozhdeniya (Kamchatka) [New selenium-rich variety of poughite from Ozernovskoe gold deposit (Kamchatka)]. *Zapiski RMO*. 2026;(4). (in press) (In Russ.)

7. Back M.E., Grice J.D., Gault R.A. et al. Telluromandarinoite, a new tellurite mineral from the El Indio-Tambo mining property, Andes mountains, Chile. *Can. Mineral*. 2017;55:21–28.
8. Donnay G., Stewart J.M., Preston H. The crystal structure of sonoraite, $Fe^{3+}Te^{4+}O_3(OH)\cdot H_2O$. *Tschermaks mineralogische und petrographische Mitteilungen*. 1970;14(1):27–44.
9. Frost R.L., Keeffe E.C. Raman spectroscopic study of the tellurite mineral: sonoraite $Fe^{3+}Te^{4+}O_3(OH)\cdot H2O$. *Journal of Raman Spectroscopy*. 2009;40(2):133–136.
10. Frost R.L., López A., Scholz R. A SEM, EDS and vibrational spectroscopic study of the tellurite mineral: Sonoraite $Fe^{3+}Te^{4+}O_3(OH)\cdot H_2O$. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2015;147:225–229.
11. Gaines R.V., Donnay G., Hey M.H. Sonoraite. *Amer. Miner.* 1968;53(11–12):1828–1832.
12. Kovalenker V.A., Plotinskaya O. Yu. Te and Se mineralogy of Ozernovskoe and Prasolovskoe epithermal gold deposits, Kuril — Kamchatka volcanic belt. *Geochemistry, Mineralogy and Petrology*. 2005;43:14–19.
13. Nakamoto K. *Infrared and Raman Spectra of Inorganic and Coordination Compounds*. New York: John Wiley & Sons; 1986. 432 p.
14. Sintes G., Graf B.S.B., Ortiz H. El singular patrimonio mineralógico del Cerro del Cinto (Rodalquilar, Almería, España). *De Re Metallica*. 2025;44:11–28.
15. Yamada T., Tagai T., Kojiro T. et al. Rare minerals from Kawazu mine, Shizuoka prefecture. In: *Abstract of Joint Meeting the Societies of Earth and Planetary Sciences*. Presentation MC-002. 1999, p. 1.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Стрельников Михаил Владимирович — асп., техник, МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация
E-mail: sva240319600@yandex.ru
https://orcid.org/0009-0007-6710-9958

Пеков Игорь Викторович — д-р геол.-минерал. наук, чл.-кор. РАН; зав. каф. минералогии, МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация
E-mail: igorpekov@mail.ru

Япаскурт Василий Олегович — канд. геол.-минерал. наук; вед. науч. сотр., МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация
E-mail: yvo72@geol.msu.ru
https://orcid.org/0000-0003-4277-7216

Бритвин Сергей Николаевич — д-р геол.-минерал. наук; проф. каф. кристаллографии, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация; Кольский научный центр РАН, Апатиты, Российская Федерация
E-mail: sbritvin@gmail.com
https://orcid.org/0000-0003-3183-7594

Плетнёв Пётр Андреевич — канд. геол.-минерал. наук; науч. сотр., МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация
E-mail: ppletnev@yandex.ru

Вигасина Марина Фёдоровна — канд. геол.-минерал. наук; вед. науч. сотр., МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация
E-mail: vigasina55@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-1494-469X

ABOUT THE AUTHORS

Strelnikov, Mikhail V. — Postgraduate, Technician, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation
E-mail: sva240319600@yandex.ru
https://orcid.org/0009-0007-6710-9958

Pekov, Igor V. — Ph.D. (Geology and Mineralogy), Corresponding Member of the RAS; Head of the Department of Mineralogy, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation
E-mail: igorpekov@mail.ru

Yapaskurt, Vasily O. — Cand. Sc. (Geology and Mineralogy); Head Scientist Researcher, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation
E-mail: yvo72@geol.msu.ru
https://orcid.org/0000-0003-4277-7216

Britvin, Sergey N. — Ph.D. (Geology and Mineralogy); Professor at the Department of Crystallography, Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russian Federation; Kola Science Center, Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation
E-mail: sbritvin@gmail.com
https://orcid.org/0000-0003-3183-7594

Pletnev, Petr A. — Cand. Sc. (Geology and Mineralogy); Research Officer, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation
E-mail: ppletnev@yandex.ru

Vigasina, Marina F. — Cand. Sc. (Geology and Mineralogy); Head Scientist Researcher, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation
E-mail: vigasina55@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-1494-469X