
МИНЕРАЛЫ И ПАРАГЕНЕЗИСЫ МИНЕРАЛОВ

НАХОДКА УЭДДЕЛЛИТА В ЗАПАДНОЙ ЯКУТИИ

© 2022 г. Т. И. Васильева¹, *, д. чл. Н. В. Заякина¹, Я. Б. Легостаева¹, О. В. Шадринова¹

¹*Институт геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения РАН,
пр. Ленина, 39, Якутск, 677000 Россия*

**e-mail: vasilevatig@gmail.com*

Поступила в редакцию 22.12.2021 г.

После доработки 02.02.2022 г.

Принята к публикации 17.02.2022 г.

Двухводный оксалат кальция уэдделлит $\text{Ca}(\text{C}_2\text{O}_4)\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ обнаружен в виде тонкого белого порошкообразного налета на поверхности почвенно-растительной толщи на территории промышленной площадки Удачнинского горно-обогатительного комбината. Территория расположена в пределах Далдынского кимберлитового поля, сложенного однообразной толщей карбонатных пород нижнего палеозоя. Минеральный состав породы представлен доломитом и кварцем с небольшим количеством полевого шпата, слюды и хлорита. В статье обсуждаются возможные варианты образования уэдделлита. Авторы связывают образование оксалата с взаимодействием шавелевой кислоты, являющейся продуктом жизнедеятельности лишайников и грибов, с доломитом, который наследуется почвой от материнской породы. Химический состав почвы, высокая влажность обусловленная микрорельефом, растительность и мохово-лишайниковый покров создают благоприятные условия для формирования уэдделлита. Образец изучен методами рентгенофазового анализа, сканирующей электронной микроскопии и термогравиметрии. Дифрактограмма и термограмма изученного образца соответствуют уэдделлиту, элементный анализ подтвердил наличие кальция, углерода и кислорода. Минерал представляет собой бесформенную массу с изредка встречающимися бипирамидально-призматическими кристаллами. В ассоциации с уэдделлитом зафиксированы незначительные примеси кварца, доломита и полевого шпата.

Ключевые слова: уэдделлит, оксалаты кальция, органические минералы, Далдынское кимберлитовое поле, Западная Якутия

DOI: 10.31857/S0869605522020095

ВВЕДЕНИЕ

Оксалаты образуют большую группу органических минералов, они достаточно широко распространены в природе, наиболее часто встречаются оксалаты кальция: уэвеллит – $\text{Ca}(\text{C}_2\text{O}_4)\cdot \text{H}_2\text{O}$ и уэдделлит – $\text{Ca}(\text{C}_2\text{O}_4)\cdot 2\text{H}_2\text{O}$, реже – трехводный оксалат кальция – каоцит – $\text{Ca}(\text{C}_2\text{O}_4)\cdot 3\text{H}_2\text{O}$, который является нестабильной формой и легко переходит в одноводный уэвеллит (Echigo, Kimata, 2010). Уэвеллит, согласно работам многих авторов (Glasauer, 2005; Echigo, Kimata, 2010; Изатулина, 2017), более распространенная форма оксалатов кальция. Однако известно, что в зависимости от условий окружающей среды (рН, влажности и присутствия органических кислот) уэдделлит может преобладать над уэвеллитом, либо присутствовать один (Thomas, 2012; Sazanova, 2020; Rusakov et al., 2021).

Оксалаты кальция были найдены в различных геологических объектах: в донных отложениях моря Уэдделла в виде мельчайших бесцветных тетрагональных кристаллов (Bannister, Hey, 1936), в виде прожилков в буром угле в зоне вечной мерзлоты (Жемчужников, Гинзбург, 1960), на серпентинитах, покрытых лишайниками (Wilson et al., 1980), на мраморе докембрийских пород Онтарио (Mandarino, 1983), в керне скважины угольных разрезов Кузбасса (Пельдяков, Карпенко, 1983), в месторождении марганцевых и железных руд Черкьяра в Италии (Basso et al., 1997), в поверхностном слое почвы и на поверхности горных пород на территории Болгарии (Minčeva-Stefanova et al., 2008), на поверхности мрамора и известняка зданий и памятников (Русаков и др., 2010), в полости кварца кварц-карбонатной жилы в Кольском регионе (Волошин и др., 2018), на поверхности апатит-нефелиновых пород Хибинского щелочного массива (Frank-Kamenetskaya et al., 2019). Известны находки оксалатов кальция в высших и низших растениях (Malainine et al., 2003; Nakata, 2003; Osyczka, 2018), уэвеллит и уэдделлит – это наиболее известные и часто вместе образующиеся патогенные минералы в организмах людей или животных (Graustein et al., 1977; Изатулина, 2017). Подробно история находок оксалатов и описание уэдделлита рассмотрены в работе (Mandarino, Witt, 1983).

В Якутии, по известным нам данным, находки уэдделлита и других оксалатов описаны в прожилках бурых углей на Тыллахском и Чайтумусском месторождений (бассейн р. Лены, Булунский район), где также найдены степановит – $\text{NaMgFe}^{3+}(\text{C}_2\text{O}_4)_3 \cdot 8-9\text{H}_2\text{O}$, жемчужниковит – $\text{NaMg}(\text{Al}, \text{Fe}^{3+})(\text{C}_2\text{O}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, глушинскит – $\text{Mg}(\text{C}_2\text{O}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, уэвеллит – $\text{Ca}(\text{C}_2\text{O}_4) \cdot \text{H}_2\text{O}$ (Жемчужников, Гинзбург, 1960). Оксалаты найдены в ассоциации с кальцитом и доломитом в зоне вечной мерзлоты.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Минерал в виде светлого порошкового налета был обнаружен на почвенно-растительном покрове территории Далдынского кимберлитового поля (Западная Якутия) в западинах редкостойного мохово-лишайникового северотаежного лиственничного леса, рядом с действующим Удачинским горно-обогатительным комбинатом (УГОК) АК АЛРОСА (ПАО) (рис. 1) (Легостаева и др., 2019). Далдынское кимберлитовое поле расположено в северо-восточной части Средне-Сибирского плоскогорья. Территория сложена однообразной толщей карбонатных пород (известняков, доломитизированных известняков, доломитов) нижнего палеозоя (Легостаева, 2008). Место находки минерала расположено в середине пологого склона, между пульпопроводом и хвостохранилищем на расстоянии 1.2 и 2.6 км, соответственно, над подземным полигоном захоронения дренажных и высокоминерализованных вод в естественном коллекторе многолетнемерзлых пород. Минеральный состав почв характеризуется, главным образом, кварцем, полевыми шпатами и карбонатами с небольшим количеством хлоритов и слюд (Васильева, Легостаева, 2020). В отобранном образце присутствуют остатки хвойного и лиственного опада, лишайников и мха. Выделенный под бинокулярным микроскопом минерал представлял собой белую рыхлую, мягкую массу, нерастворимую в воде.

Изучение минерала было проведено методами порошковой рентгенографии, электронной микроскопии, термического и спектрального анализов.

Рентгенографическое изучение минерала выполнено на дифрактометре D2 PHASER в ИГАБМ СО РАН. Препараты готовили из отобранных под бинокулярным микроскопом и истертых в агатовой ступке проб. Съемка образцов проводилась на $\text{CuK}\alpha$ излучении, напряжение 30 кВ, сила тока 10 мА, интервал углов $2\theta^\circ$ от 4.5° до 65° , с шагом 0.03° и временем экспозиции 1 с. Для интерпретации использовали базу данных ICDD (PDF-2, 2011). Термический анализ проводился на анализаторе NETZSCH STA 449C Jupiter (ИГАБМ СО РАН, аналитик Н.Н. Емельянова). Режим съемки от

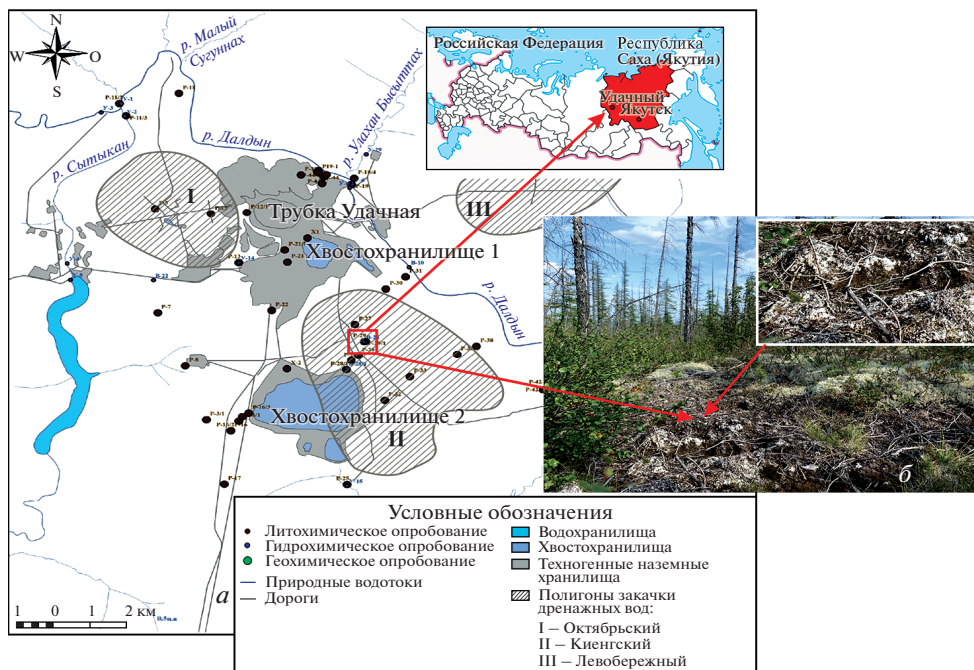


Рис. 1. Схема территории промышленной площадки Удачинского горно-обогатительного комбината (Легостаева, Гололобова, 2021) (а) и фотография места находки уэдделлита – точка Р-29 (б), координаты: 66°22'58.2" N 112°23'14.3" E.

Fig.1. Scheme of the industrial site of the Udachny mine (Legostaeva, Gololobova, 2021) (a) and a photograph of sampling point R-29 of the weddellite find (b), coordinates: 66°22'58.2" N 112°23'14.3" E.

комнатной температуры до 1000 °С в инертной среде аргона со скоростью 1 °С в минуту. Морфологию кристаллов изучали на электронном сканирующем микроскопе JEOL JSM-7800F с энергетическим дисперсионным спектрометром Oxford X-MAX-20: ускоряющее напряжение 2 кВ (АИЦ СВФУ, аналитик А.А. Дьяконов), элементный состав – на JEOL JSM-6480LV с энергетическим дисперсионным спектрометром Energy 350 Oxford: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 1 нА (ИГАБМ СО РАН, аналитик А.В. Попов).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 2 представлена дифрактограмма выделенной монофракции минерала. Выявлено, что минерал хорошо кристаллизован, пики дифрактограммы четкие, острые. Помимо уэдделлита, в образце диагностированы небольшие примеси доломита, полевого шпата и кварца. На рентгенограммах нижележащих горизонтов почвы уэдделлит не зафиксирован.

Минерал представлен в основном мелкими обломками неправильной формы, изредка встречаются хорошо ограниченные кристаллы размером 1–3 мкм, бипирамидально-призматического габитуса (рис. 3, а). Элементный анализ (рис. 3, б) показал наличие в минерале кальция, углерода и кислорода.

Термогравиметрический анализ показал, что в исследуемом образце наблюдаются 5 эндотермических эффектов (рис. 4). Значения потери веса указаны на кривой ТГ.

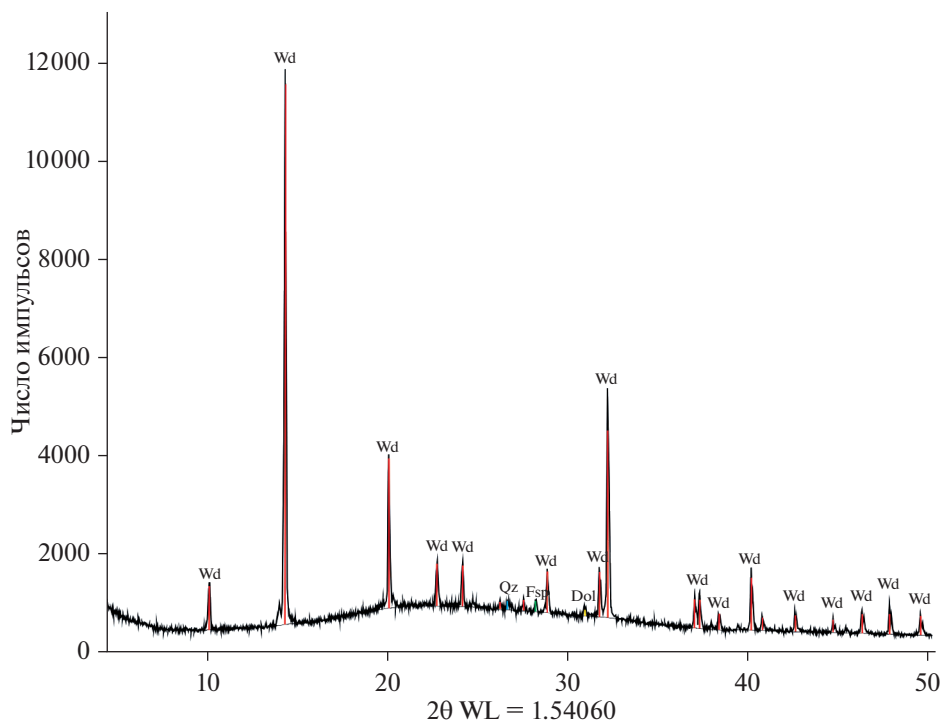


Рис. 2. Дифрактограмма образца уэдделлита. Wd – уэдделлит (PDF 00-017-0541), Qz – кварц, Fsp – полево шпат, Dol – доломит.

Fig. 2. X-ray powder diffraction pattern of the studied samples of weddellite. Wd – weddellite (PDF 00-017-0541), Qz – quartz, Fsp – fieldspat, Dol – dolomite.

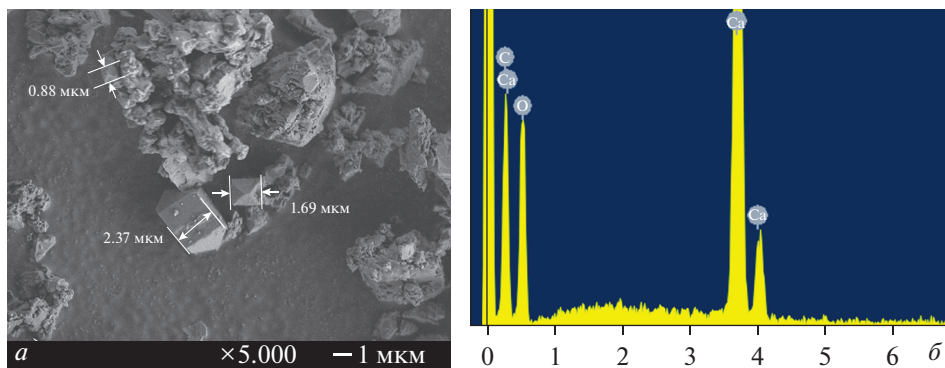


Рис. 3. Уэдделлит: (а) SEM изображение, (б) спектр EDS.

Fig. 3. Weddellite: (a) SEM image, (b) EDS spectrum.

Первый эндотермический эффект при температуре 74.9 °С связан с потерей адсорбированной и возможно имеющейся в минерале цеолитной воды (Wadsten, Moberg, 1985; Изатулина, 2017).

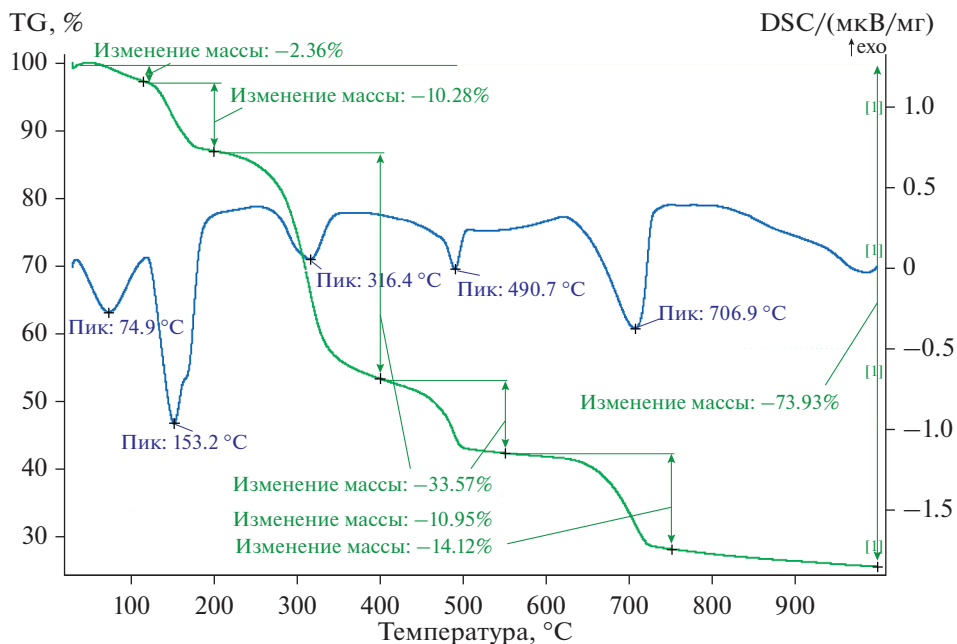


Рис. 4. Термограмма (кривые ТГ и ДТГ) уэдделлита.

Fig. 4. Thermogram – TG/DSC curves of weddellite.

Второй – двойной пик при 153.2 °С – двухступенчатая потеря кристаллизационной воды, при которой уэдделлит сначала переходит в одноводный оксалат кальция – уэвеллит, затем в безводный оксалат кальция. Этому пику соответствуют следующие реакции: $\text{Ca}(\text{C}_2\text{O}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{C}_2\text{O}_4) \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$ и $\text{Ca}(\text{C}_2\text{O}_4) \cdot \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{C}_2\text{O}_4) + \text{H}_2\text{O}$, (теоретическая потеря массы 21.95%). Третий пик при 490.7 °С соответствует распаду оксалата кальция до карбоната кальция с выделением монооксида углерода: $\text{Ca}(\text{C}_2\text{O}_4) \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{CO}$ (теоретическая потеря массы 30.54%). Четвертый пик при 706.9 °С отвечает термическому разложению карбоната кальция до оксида кальция и диоксида углерода: $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ (теоретическая потеря массы 43.97%). Следует отметить, что если полученные значения температур разложения оксалата практически не отличаются от приведенных в работах (Wendlandt, 1964; Frost, Weier, 2003; Echigo et al., 2005; Perez-Rodriguez et al., 2011), то реальные потери массы в каждом пике отличаются от теоретических. Это можно объяснить тем, что исследуемый образец не является идеальной монофракцией уэдделлита и может содержать некоторое количество аморфных примесей как неорганических, так и органических соединений. Дополнительный эффект – эндотермический при 316.4 °С связан с присутствием примесных фаз. Примеси органических соединений в природном уэдделлите были установлены в работе Перес-Родригеса с соавторами (Perez-Rodriguez et al., 2011). Очевидно, что наличие примесей повлияло на значения потерь массы.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Образование заметного количества оксалата – уэдделлита на поверхности почвенно-растительного слоя территории Далдынского кимберлитового поля вызывает немало вопросов, связанных как с проблемой возникновения таких достаточно редких в

Якутии минералов, так и с фактом нахождения только двухводной модификации оксалата кальция. По литературным данным (Wilson et al., 1981; Mandarin, 1983; Frank-Kamenetskaya et al., 2012; Франк-Каменецкая, Власов, 2018а; Osyczka, 2018) большинство авторов связывают образование оксалатов в природе с лишайниками и грибами, продуцирующими щавелевую кислоту, взаимодействующую затем с породами, на которых они произрастают. Возможно, и в нашем случае лишайники были субстратом для накопления и выброса оксалатов, что, могло стать одной из причин образования уэдделлита. В то же время, и почва является субстратом для образования и накопления различного рода карбоновых кислот при переработке органических и растительных остатков почвенными бактериями и микроскопическими грибами, при этом одним из продуктов трансформации является щавелевая кислота (Александрова, 1980; Шеглов и др., 2008; Макаров, 2018; Соколова, 2020). Не исключена возможность техногенного воздействия, хотя, по известным нам данным, щавелевая кислота не используется в технологических процессах при добыче алмазов и обогащении кимберлитов. Территория, на которой обнаружен оксалат, находится между пульпопроводом захоронения дренажных и высокоминерализованных вод в естественном коллекторе многолетнемерзлых пород и комплексом, предназначенным для хранения или захоронения отвальных отходов обогащения кимберлитовых пород (Легостаева и др., 2019). Косвенно подземный полигон и хвостохранилище могли повлиять на состояние растительности на территории и способствовать образованию оксалата. Установлено, что увеличение синтеза щавелевой кислоты в растениях возможно, как механизм адаптации к условиям окружающей среды из-за интоксикации тяжелыми металлами (Nakata, 2003; Osyczka et al., 2018).

Известно, что среди оксалатов кальция наиболее устойчивым для зон резко континентального климата является одноводный – уэвеллит, присутствие которого даже в виде примеси в исследуемом образце не зафиксировано. Образование уэдделлита можно объяснить влиянием условий окружающей среды. Ранее установлено, что кристаллизации уэдделлита способствуют низкие температуры и повышенная влажность со слабым воздействием солнечного света, а также избыток ионов кальция в среде (Франк-Каменецкая, Власов, 2018б; Изатулина, 2017; Frank-Kamenetskaya et al., 2019; Sazanova et al., 2020; Rusakov, et al., 2021). Такие условия характерны для бугорковато-западного микрорельефа исследованной территории: в западинах скапливается влага, редкостойная растительность и плотный мохово-лишайниковый покров препятствует проникновению солнечного света. Благодаря карбонатным породам Далдынского кимберлитового поля в почвах высокое содержание ионов кальция и оптимальная для образования оксалата слабонейтральная среда. Таким образом, создаются благоприятные условия для формирования уэдделлита именно в понижениях микрорельефа.

Следует отметить, что нами обнаружены оксалаты кальция в пробах аллювиальных почв в районе нижнего течения р. Марха (левый приток р. Вилюй) и в пробах песчаника, отобранных из береговых обнажений р. Аллах-Юнь (Южное Верхоянье). В перечисленных образцах на рентгенограммах проявились основные линии соответствующие уэвеллиту и уэдделлиту. Поэтому, вероятно распространенность оксалатов в Якутии намного шире, чем это принято считать.

ВЫВОДЫ

Двухводный оксалат кальция, найденный на территории Далдынского кимберлитового поля, по рентгенометрическим, химическим и термографическим данным соответствует уэдделлиту. Минерал представлен в виде мелких обломков неправильной

формы, изредка встречаются хорошо ограненные кристаллы бипирамидально-призматического габитуса. Элементный анализ подтвердил наличие в минерале кальция, углерода и кислорода.

На сегодняшний день остаются открытыми вопросы по механизму образования уэдделлита, а также распространенности оксалатов в Якутии, что требует дальнейшего более детального изучения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят сотрудников ИГАБМ СО РАН О.В. Королеву за проявленный интерес к работе и ценные советы, аналитиков отдела физико-химических методов анализа за проведенную работу. Статья подготовлена по плану НИР ИГАБМ СО РАН, проект FUEM-2019-0003, раздел “Эколого-геохимическое изучение техногенных массивов на территории Якутской алмазодобывающей провинции”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Александрова Л.Н. Органическое вещество почвы и процессы ее трансформации. Л.: Наука, **1980**. 287 с.

Васильева Т.И., Легостаева Я.Б. Минералогический состав природных и техногенно-преобразованных почв Далдынского кимберлитового поля / Геология и минеральные ресурсы Северо-Востока России. Якутск: Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, **2020**. С. 448–452.

Волошин А.В., Карпов С.М., Чернявский А.В., Компанченко А.А. Новые данные о минералах. Вып. 4. Первые находки в России и в Кольском регионе // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. **2018**. Вып. 15. С. 95–102.

Жемчужников Ю.А., Гинзбург А.И. Основы петрологии углей. М.: Изд. АН СССР, **1960**. 185 с.

Изатулина А.Р. Кристаллогенезис и кристаллохимия оксалатов кальция почечных камней человека. Автореф. дис. ... канд. г.-м. н. СПб, **2017**. 22 с.

Легостаева Я.Б. Экологическая значимость микроэлементного состава почв Далдынского кимберлитового поля // Проблемы региональной экологии. **2008**. № 2. С. 15–20.

Легостаева Я.Б., Гололобова А.Г. Особенности распределения микроэлементов в почвах фоновых и импактных зон на участках алмазодобычи на Северо-Западе сибирской платформы // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. **2021**. Т. 332. № 9. С. 142–153.

Легостаева Я.Б., Ксенофонтова М.И., Попов В.Ф. Геоэкологический мониторинг на территории подземных полигонов утилизации высокоминерализованных вод в Западной Якутии // Экология и промышленность России. **2019**. Т. 23. № 4. С. 58–63.

Макаров В.Н. Ионы органических карбоновых кислот (формиат, ацетат и оксалат) в снежном покрове мерзлотных ландшафтов бореальной зоны Восточной Сибири // Геохимия. **2018**. № 6. С. 594–602.

Пельдяков Н.И., Карпенко М.В. Об уэвеллите в Кузбассе // ЗВМО. **1983**. № 1. С. 83–85.

Русаков А.В., Франк-Каменецкая О.В., Зеленская М.С., Власов Д.Ю., Гимельбрант Д.Е., Кнауф И.В., Плоткина Ю.В. Оксалаты кальция в биопленках на поверхности археологических памятников из херсонесского известняка (Крым) // ЗРМО. **2010**. № 5. С. 100–108.

Соколова Т.А. Низкомолекулярные органические кислоты в почвах: источники, состав, содержание, функции в почвах (обзор) // Почвоведение. **2020**. № 5. С. 559–575.

Франк-Каменецкая О.В., Власов Д.Ю. Вторичное минералообразование при участии микроскопических грибов и бактерий / Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения – 2018). Сыктывкар: ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН. **2018а**. С. 150–151.

Франк-Каменецкая О.В., Власов Д.Ю. Современное минералообразование при участии литобийонтного микробного сообщества / Геология, геоэкология, эволюционная география: Коллективная монография. СПб: Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, **2018б**. Т. XVII. С. 126–130.

Шеглов Д.И., Дудкин Ю.И., Крамарева Т.Н. Учение о факторах почвообразования: учебно-методическое пособие для вузов. Воронеж: Издательско-полиграфический центр Воронежского государственного университета, **2008**. 33 с.

Find of Weddellite in Western Yakutia

T. I. Vasileva^{a,*}, N. V. Zayakina^a, Ya. B. Legostaeva^a, and O. V. Shadrinova^a

^a*Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch of the RAS, Yakutsk, Russia*

**e-mail: vasilevatig@gmail.com*

Calcium oxalate $\text{Ca}(\text{C}_2\text{O}_4)\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ has been found as a thin-grained powdery coating on the surface of soil in industrial area of Udachny mine. The territory is located within Daldyn kimberlite field composed of a uniform formation of the Lower Paleozoic carbonate rocks. The mineral composition of the rock is represented by dolomite and quartz with small amounts of feldspar, mica and chlorite. The article discusses the possible options for the formation of weddellite. Authors associate formation of oxalate with interaction of oxalic acid, as a product of vital activity of lichens and fungi, with dolomite inherited by soil from the parent rock. Chemical composition of the soil, its high humidity due to microrelief, vegetation and moss-lichen cover create favorable conditions for the weddellite formation. The sample was studied by X-ray phase analysis, scanning electron microscopy and thermogravimetry. The diffractogram and thermogram of the studied mineral substance correspond to weddellite; elemental analysis confirms the presence of calcium, carbon and oxygen. The mineral consist mainly of shapeless mass with rare bipyramidal-prismatic crystals. In association with weddellite, there are minor admixtures of quartz, dolomite, and feldspar.

Keywords: weddellite, calcium oxalates dihydrates, organic minerals, Daldyn kimberlite field, Western Yakutia

REFERENCES

- Aleksandrova L.N.* Soil organic matter and the processes of its transformation. Leningrad: Nauka, **1980**. 287 p. (in Russian).
- Bannister F.A., Hey M.H.* Report on some crystalline components of the Weddell sea deposits. *Discovery Reports*. **1936**. Vol. 19. P. 60–69.
- Basso R., Lucchetti G., Zefiro L., Palenzona A.* Ca $(\text{H}_2\text{O})_3(\text{C}_2\text{O}_4)$, a new mineral from the Cerchiara mine, northern Apennines, Italy. *Neues Jahrbuch für Mineralogie*. **1997**. Vol. 2. P. 84–96.
- Echigo T., Kimata M.* Crystal chemistry and genesis of organic minerals: a review of oxalate and polycyclic aromatic hydrocarbon minerals. *Canad. Miner.* **2010**. Vol. 48. P. 1329–1358.
- Frank-Kamenetskaya O.V., Ivanyuk G.Y., Zelenskaya M.S., Izatulina A.R., Kalashnikov A.O., Vlasov D.Y., Polyanskaya E.I.* Calcium oxalates in lichens on surface of apatite-nepheline ore (Kola Peninsula, Russia). *Minerals*. **2019**. Vol. 9. P. 656–669.
- Frank-Kamenetskaya O.V., Rusakov A.V., Barinova K.V., Zelenskaya M.S., Vlasov D.Y.* The formation of oxalate patina on the surface of carbonate rocks under influence of microorganisms. In: *Proc. 10th International Congress of applied mineralogy*. Berlin: Springer Verlag, **2012**. P. 213–220.
- Frank-Kamenetskaya O.V., Vlasov D.Y.* Secondary mineral formation with the involvement of microscopic fungi and bacteria. In: *Modern problems of theoretical, experimental, and applied mineralogy (Yushkin Memorial Seminar – 2018)*. Syktyvkar. IG Komi SC UB RAS. **2018a**. P. 150–151 (in Russian).
- Frank-Kamenetskaya O.V., Vlasov D.Y.* Modern mineral formation with participation of lichen microbial community. In: *Geology, Geoecology and evolution Geography: Materials of the XVIII international conference*. Saint Petersburg: Herzen Russian state pedagogical University, **2018b**. Vol. XVII. P. 126–130 (in Russian).
- Frost R., Weier M.* Thermal treatment of weddellite – a raman and infrared emission spectroscopic study. *Thermochim. Acta*. **2003**. Vol. 406. P. 221–232.
- Glasauer S.M., Beveridge T.J., Burford E.P., Harper F.A., Gadd G.M.* Metals and metalloids, transformation by microorganisms. *Encyclopedia of Soils in the Environment*. **2005**. P. 438–447.
- Graustein W.C., Cromack K., Jr., Sollins P.* Calcium oxalate: occurrence in soils and effect on nutrient and geochemical cycles. *Science*. **1977**. Vol. 23. P. 1252–1254.
- Izatulina A.R.* Crystallogenes and crystal chemistry of calcium oxalates of human kidney stones. *Ph. D. thesis. syn.* Saint Petersburg: Saint Petersburg State University, **2017**. 22 p. (in Russian).
- Legostaeva Ya.B.* Ecological importance of microelement soil composition of Daldinskiy kimberlitic field. *Probl. Reg. Ekol.* **2008**. N 2. P. 15–20 (in Russian).
- Legostaeva Ya.B., Gololobova A.G.* Features of distribution of trace elements in soils of background and impact zones in diamond mining areas in the northwest of the Siberian platform. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. **2021**. Vol. 332. N 9. P. 142–153 (in Russian).

- Legostaeva Ya.B., Ksenofontova M.I., Popov V.F.* Geoecological monitoring on the territory of underground disposal sites of highly mineralized waters in Western Yakutia. *Russian Ecology and Industry*. **2019**. Vol. 4. P. 58–63 (in Russian).
- Mandarino J.A.* Weddellite from Lutterworth Township, Haliburton country, Ontario. *Canad. Miner.* **1983**. Vol. 21. P. 509–511.
- Mandarino J.A., Witt N.V.* Weddellite from Biggs, Oregon, U.S.A. *Canad. Miner.* **1983**. Vol. 21. P. 503–508.
- Mincheva-Stefanova J., Kostov I., Petrussenko S., Kostov R.* Organic minerals from the upper soil layer and rock surfaces on the territory of Bulgaria. *Geochem. Miner. Petrol.* **2008**. N 46. P. 9–29 (in Bulgarian).
- Malainine M.E., Alain D., Dupeyre D., Vignon M.R., Mahrouz M.* First evidence for the presence of weddellite crystallites in *Opuntia ficus indica* Parenchyma. *Z. Naturforschung*. **2003**. Vol. 58. N 11–12. P. 812–816.
- Makarov V.N.* Ions of organic carboxylic acids (formic, acetic, and oxalic) in the snow cover of permafrost landscapes of Boreal Eastern Siberia. *Geochemistry Int.* **2018**. Vol. 56. N 6. P. 594–602.
- Nakata P.A.* Advances in our understanding of calcium oxalate crystal formation and function in plants. *Plant Science*. **2003**. Vol. 164. P. 901–909.
- Osyczka P., Boroń P., Lenart-Boroń A., Rola K.* Modifications in the structure of the lichen *Cladonia* thallus in the aftermath of habitat contamination and implications for its heavy-metal accumulation capacity. *Envir. Science and Pollution Research*. **2018**. Vol. 25(2). P. 1950–1961.
- Peldyakov N.I., Karpenko M.V.* About whewellite in Kuzbass. *Zapiski VMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1983**. N 1. P. 83–85 (in Russian).
- Perez-Rodriguez J.L., Duran A., Perez-Maqueda L.A.* Thermal study of unaltered and altered dolomitic rock samples from ancient monuments. *J. Thermal Anal. Calorim.* **2011**. Vol. 104(2). P. 467–474.
- Rusakov A.V., Frank-Kamenetskaya O.V., Zelenskaya M.S., Vlasov D.Yu., Gimelbrand D.E., Knauf I.V., Plotkina J.V.* The first find of calcium oxalates in biofilms on the surface of archeological monuments of Tauric Chersonesos limestone (Crimea, Ukraine). *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2010**. N 5. P. 100–108 (in Russian).
- Rusakov A.V., Kuzmina M.A., Frank-Kamenetskaya O.V.* Biofilm medium chemistry and calcium oxalate morphogenesis. *Molecules*. **2021**. Vol. 26. N 16. P. 5030.
- Sazanova K.V., Frank-Kamenetskaya O.V., Vlasov D.Y., Zelenskaya M.S., Vlasov A.D., Rusakov A.V., Petrova M.A.* Carbonate and oxalate crystallization by interaction of calcite marble with *Bacillus subtilis* and *Bacillus subtilis*–*Aspergillus niger* association. *Crystals*. **2020**. Vol. 10. P. 756.
- Shcheglov D.I., Dudkin Yu.I., Kramareva T.N.* The doctrine of the factors of soil formation: a teaching aid for universities. Voronezh: Voronezh State University, **2008**. 33 p. (in Russian).
- Sokolova T.A.* Low-molecular-weight organic acids in soils: sources, composition, concentrations, and functions: a review. *Eurasian Soil Science*. **2020**. Vol. 53. N 5. P. 580–594 (in Russian).
- Thomas A., Rosseeva E., Hochrein O., Carrillo-Cabrera W., Simon, P., Duchstein P., Zahn D., Kniep R.* Mimicking the growth of a pathogenic biomineral: Shape development and structures of calcium oxalate dehydrate in the presence of polyacrylic acid. *Chem.-A Eur. J.* **2012**. Vol. 18. P. 4000–4009.
- Vasilieva T.I., Legostaeva Y.B.* Mineralogical composition of natural and technogenic transformed soils of the Daldyn kimberlite field. In: *Geology and Mineral Resources of the North-East of Russia: Mat. of the All-Russian Sci. Practical Conf.* Yakutsk: NEFU, **2020**. P. 448–452 (in Russian).
- Voloshin A.V., Karpov S.M., Chernyavsky A.V., Kompanchenko A.A.* New data on minerals. Issue 4. The first finds in Russia and in the Kola region. In: *Proc. Fersman scientific session of the State Institute of the KSC RAS*, **2018**. Issue 15. P. 95–102 (in Russian).
- Wadsten T., Moberg R.* Calcium Oxalate Hydrates on the Surface of Lichens. *The Lichenologist*. **1985**. Vol. 17(3). P. 239–245.
- Wendlandt W.* Thermal Methods of Analysis. New York: Wiley-Interscience Publication, **1964**. 424 p.
- Wilson M.J., Jones D., Russell J.D.* Glushinskite, a naturally occurring magnesium oxalate. *Miner. Mag.* **1980**. Vol. 43. P. 837–840.
- Wilson M.J., Jones D., Mc Hardy W.J.* The weathering of serpentinite by *Lecanora atra*. *Lichenologist*. **1981**. Vol. 13. P. 167–176.
- Zhemchuzhnikov Yu.A., Ginzburg A.I.* Basics of coal petrology. Moscow: USSR Acad. Sci., **1960**. 185 p. (in Russian).