

УДК 552.163

Формирование новообразований уэделлита в криоземах как фактор техногенного воздействия в районах алмазодобычи (Западная Якутия)

Т. И. Васильева*, Я. Б. Легостаева, И. А. Прокопьев, О. В. Шадринова

*Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск, Россия;

e-mail: vasilevatig@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9203-9193>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
15.01.2026;
получена
после доработки
17.04.2026;
принята
к публикации
27.04.2026

Проведено комплексное исследование условий образования, состава и генезиса поверхностных оксалатных новообразований, обнаруженных на техногенно-преобразованных почвах в районе разработки кимберлитовой трубки "Удачная" в Западной Якутии. Основными объектами послужили два почвенных разреза (P-29 и P-29/1), заложенных на пологом склоне между пульпопроводом и хвостохранилищем Удачнинского ГОКа, непосредственно над полигоном глубинного захоронения высокоминерализованных дренажных рассолов. В разрезе P-29, расположенном в микрозападине, выявлен обширный сплошной белый налет, в то время как на соседнем микроповышении (P-29/1) аналогичные образования отсутствовали. С применением комплекса методов (рентгенофазовый анализ, газовая хромато-масс-спектрометрия, атомно-абсорбционная спектрометрия) установлено, что налет состоит из хорошо окристаллизованного двухводного оксалата кальция – уэделлита ($\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). ГХ-МС анализ подтвердил биогенную природу образования: свободная щавелевая кислота в почве не обнаружена, однако в биомассе лишайников с участка P-29 выявлено значительное содержание связанных оксалатов (2,7 мг/г сухого веса). Сделан вывод, что формирование налета является защитной реакцией лишайников на техногенное воздействие в результате прорыва пульпопровода. Ключевыми естественными предпосылками процесса являются расположение в пониженных элементах микрорельефа, повышенная влажность за счет сезонного протаивания мерзлоты, слабощелочная почвенная среда и наличие карбонатов в почвообразующей породе. Спусковым механизмом аномально интенсивного оксалатообразования выступает техногенный прессинг, связанный с аварийной ситуацией в инфраструктуре обогатительных фабрик. Образование видимых макроскопических скоплений уэделлита на фоне угнетения лишайников предлагается использовать в качестве наглядного и оперативного индикатора нарушения экологического равновесия в экосистемах криолитозоны, подверженных интенсивному промышленному воздействию.

Ключевые слова:

техногенез,
биоминерализация,
лишайники,
уэделлит,
криоземы,
Якутия

Для цитирования

Васильева Т. И. и др. Формирование новообразований уэделлита в криоземах как фактор техногенного воздействия в районах алмазодобычи (Западная Якутия). Вестник МГТУ. 2026. Т. 29, № 2. С. 158–171. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-2-158-171>.

Weddellite formation in cryosols as a factor of technogenic impact in diamond mining areas (Western Yakutia)

Tatiana I. Vasileva*, Yana B. Legostaeva, Ilya A. Prokopiev, Olesya V. Shadrinova

*Diamond and Precious Metals Geology Institute SB RAS, Yakutsk, Russia;

e-mail: vasilevatig@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9203-9193>

Article info

Received
15.01.2026;
received
in revised form
17.04.2026;
accepted
27.04.2026

Abstract

The paper presents a comprehensive study of the formation conditions, composition, and genesis of surface oxalate minerals discovered on technogenically disturbed soils in the Udachnaya kimberlite pipe mining area in Western Yakutia. The main objects include two soil profiles (R-29 and R-29/1) located on a gentle slope between the slurry pipeline and the tailings storage facility of the Udachninsky Mining and Processing Plant, directly above the deep disposal site for highly mineralized drainage brines. In profile P-29 located in the micro-depression an extensive continuous white coating was observed, whereas no similar formations were found in the adjacent micro-elevation (P-29/1). A complex of methods (X-ray diffraction, gas chromatography-mass spectrometry, atomic absorption spectrometry) reveals that the coating consisted of well-crystallized calcium oxalate dihydrate – weddellite ($\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). GC-MS analysis has confirmed biogenic nature of the formation: free oxalic acid has not been detected in the soil, although a significant amount of bound oxalates (2.7 mg/g dry weight) was found in the lichen biomass from the P-29 site. It has been concluded that coating formation is a protective response of lichen biota to technogenic impact due to a slurry pipeline failure. The major natural conditions of the process include the location in low microrelief parts, increased humidity due to seasonal permafrost thawing, a slightly alkaline soil environment, and the presence of carbonates in the parent rock. The trigger for abnormally intense oxalate formation is a technogenic pressure associated with emergency situations in the processing plant environment. The formation of visible macroscopic weddellite accumulations accompanied by lichen suppression is proposed to be utilized as a diagnostic indicator of ecological imbalance in permafrost zones subjected to intensive industrial impact.

Key words:

technogenesis,
biomineralization,
lichens,
weddellite, cryosols,
Western Yakutia

For citation

Vasileva, T. I. et al. 2026. Weddellite formation in cryosols as a factor of technogenic impact in diamond mining areas (Western Yakutia). *Vestnik of MSTU*, 29(2), pp. 158–171. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-2-158-171>.

Введение

В последние годы во всем мире наблюдается значительный интерес к механизмам биоминерализации, происходящим на границе живого и неживого (Syed et al., 2020; Cuéllar-Cruz et al., 2020; Gómez-Espinoza et al., 2021; Du et al., 2025). Биоминералы, образующиеся в результате взаимодействия продуктов метаболизма живых организмов с горными породами и минералами, относятся к метабиогенным органо-минеральным агрегатам (Korago, 1992). Одним из наиболее распространенных процессов является продуцирование лишайниками оксалатов кальция. Лишайники активно участвуют в биоминерализации в результате взаимодействия продуктов их метаболизма, в первую очередь щавелевой кислоты, с подстилающим, обычно каменным, субстратом (Wilson et al., 1980; 1983; Frank-Kamenetskaya et al., 2012; 2019; Rusakov et al., 2021). Среди метабиогенных оксалатов наиболее распространены оксалаты Ca: уэвеллит ($\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) и уэдделлит ($\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (Malainine et al., 2003; Echigo et al., 2010; Frank-Kamenetskaya et al., 2019).

Общеизвестно, что источником минеральных веществ для лишайников является не только субстрат, который они заселяют, но также вода с растворенными в ней веществами и воздух, содержащий твердые частицы и аэрозоли. Все привнесенные микро- и макроэлементы способны накапливаться в талломах лишайников, что делает их эффективными биоиндикаторами нарушения экологического равновесия (Garty, 2002; Wakefield et al., 2012; Саумова и др., 2015; Malainine et al., 2003; Echigo et al., 2010; Lucadamo et al., 2015; Головкин и др., 2018). Помимо кальция, известны случаи образования солей щавелевой кислоты с магнием, железом и тяжелыми металлами. В частности, образование оксалатов тяжелых металлов используется в биотехнологиях для обезвреживания токсичных элементов посредством их связывания в нерастворимой форме (Sarret et al., 1998).

В научной литературе все чаще публикуются данные об обнаружении оксалатов кальция в талломах лишайников (Krajanová et al., 2023; Du et al., 2025), причем четко прослеживается связь их усиленного образования с негативным техногенным воздействием (Gadd, 2007; Gadd et al., 2014; Marques et al., 2016). Однако большинство исследований сосредоточено на процессах биоминерализации на скальных субстратах в относительно стабильных условиях. Значительно менее изученным остается формирование подобных новообразований на техногенно-преобразованных почвах, особенно в экстремальных условиях криолитозоны, где природные и антропогенные факторы создают уникальную геохимическую обстановку.

Целью исследования является изучение генезиса, условий образования и экологической значимости оксалатных новообразований, выявленных на техногенно-преобразованных почвах в районе разработки кимберлитовых трубок Западной Якутии.

Объекты и методы

Исследуемая территория Далдыно-Алаkitского района (Северо-Западная Якутия) представляет собой сильно расчлененное пологоволнистое плато в северо-восточной части Среднесибирского плоскогорья. Геологический фундамент сложен нижнепалеозойскими карбонатными породами (известняки, доломитизированные известняки, доломиты), рыхлыми четвертичными отложениями, породами трапповой формации и кимберлитами¹. Основу почвенного покрова составляют криоземы различных подтипов, формирующиеся на равнинных территориях, склонах и положительных элементах микрорельефа. В понижениях распространены глееземы, а на плотных карбонатных породах – литоземы (Gololobova et al., 2022). Растительность принадлежит к северной подзоне редкостойной лиственничной тайги с доминированием лиственницы Каяндера (*Larix cajanderi*) и развитым кустарниково-кустарничковым и мохово-лишайниковым ярусами (Николин и др., 2019).

Налет уэдделлита был обнаружен на пологом склоне, расположенном между пульпопроводом (на расстоянии ~1,2 км) и хвостохранилищем обогатительной фабрики (~2,6 км) Удачнинского горно-обогатительного комбината (ГОК). Данный участок находится непосредственно над подземным полигоном для захоронения высокоминерализованных дренажных рассолов в подмерзлотный коллектор многолетнемерзлых пород (ММП). Использование таких горизонтов в качестве природного экрана требует наличия поглощающего комплекса, перекрытого слабопроницаемым экраном, которым обычно и служат толщи ММП (Дроздов и др., 2013). Захораниваемые дренажные рассолы являются конечным продуктом системы осушения месторождения и представляют собой смесь атмосферных, поверхностных и грунтовых вод различной минерализации из кембрийских водоносных комплексов, с общей минерализацией от 22 до 424 г/дм³ и выше (Дроздов и др., 2013). В связи с этим территория характеризуется напряженной экологической обстановкой и находится под системным мониторингом. Примечательно, что в год обнаружения налета на участке фиксировались следы разлива пульпы.

¹ Геологическая карта СССР масштаба 1 : 200000. Серия Анабарская. Лист Q-49-XVII. Объяснительная записка. М. : Государственное научно-техническое издательство литературы по геологии и охране недр, 1960. С. 68 ; Салихов Р. Ф., Салихова В. В., Иванюшин Н. В., Охлопков В. И. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200000. Серия Верхневилуйская. Лист Q-49-XXI, XXII (Айхал). Объяснительная записка. М. : МФ ВСЕГЕИ, 2013. С. 284.

Объектами детального исследования послужили два почвенных разреза (P-29 и P-29/1), заложенные в ~1,5 км к северу от хвостохранилища Удачинского ГОКа (рис. 1). В разрезе P-29, расположенном в микрозападине, на поверхности был обнаружен сплошной белый налет, предварительно идентифицированный как уэделлит (двухводный оксалат кальция). На соседнем микроповышении (разрез P-29/1) подобные образования отсутствовали. Оба изученных разреза представляют собой криоземы с разной степенью проявления процессов оглеения и техногенной трансформации почвенного профиля.

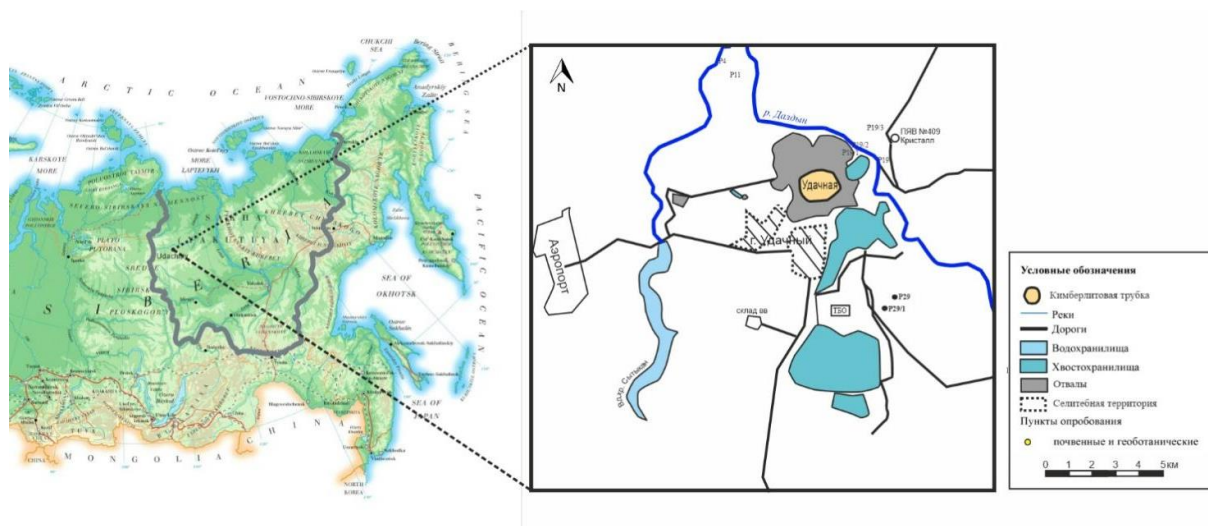


Рис. 1. Схема расположения района исследований и точек отбора проб почв в районе кимберлитовой трубки "Удачная" (Западная Якутия)
 Fig. 1. Schematic map of the study area and soil sampling points in the region of the "Udachnaya" kimberlite pipe (Western Yakutia)

Лабораторные исследования включали комплекс анализов. Микроэлементный состав в почвенных образцах (Cr, Ni, V, Sc, Co, Ba, Sr, Nb, Zr, Y, Yb) определяли методом атомно-абсорбционной спектрометрии с электротермической атомизацией на спектрометре МГА-1000 (ЛЮМЭКС, Россия). Анализировалось валовое содержание микроэлементов. Разложение проб проводили на основе кислотной минерализации с использованием смеси концентрированных кислот (HF, HNO₃, HCl) в блоке HotBlock Environmental Express при температуре 180^o. Химический анализ каждого образца проводили в двух повторностях относительно контроля аналитической точности с использованием стандартных образцов – САДПП-07/2020 и САДПП-08/6тм Всероссийского научно-исследовательского института агрохимии имени Д. Н. Прянишникова (ВНИИА агрохимии) с аттестованными значениями валового содержания микроэлементов.

Определение физико-химических свойств и валового состава почв выполнены по общепринятым методикам в двухкратной повторности² (Качинский, 1958). Минералогический состав изучали методом рентгенофазового анализа на дифрактометре D2 PHASER (Bruker, Германия). Полуколичественное содержание минералов рассчитывали методом нормированных интенсивностей RIR (Reference Intensity Ratio) с последующей корректировкой долей минералов на основе данных химического состава.

Для определения содержания щавелевой кислоты отбиралось 20 мг измельченного воздушно-сухого образца, с последующей промывкой дистиллированной водой и центрифугированием. К осадку последовательно добавляли 200 мкл 12 М HCl и 300 мкл воды, перемешивали на шейкере (20 мин) и инкубировали при 80 °C (30 мин) для перевода оксалатов в растворимую форму. После охлаждения в смесь вносили 100 мкл насыщенного NaCl и 1 мл этилацетата. Полученную систему перемешивали 20 мин, центрифугировали (5 мин, 6000 g) и отбирали органическую фазу (верхний слой) для последующего количественного анализа на газовом хромато-масс-спектрометре (ГХ-МС) системы "Мазстро" Agilent 5975C (Agilent Technologies, США).

Микрофотографии выполнены с помощью сканирующей электронной микроскопии JSM-7800F (JEOL, Япония).

Результаты и обсуждение

Для выяснения причин образования налета и оценки возможных изменений в почвах было проведено сравнение физико-химических свойств и микроэлементного состава двух соседних разрезов: P-29 (с налетом

² Аринушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. М. : Изд-во МГУ, 1970. 487 с. ; Мамонтов В. Г. Химический анализ почв и использование аналитических данных. Лабораторный практикум. СПб. : Лань, 2021. 328 с.

и признаками угнетения лишенобиоты) и P-29/1 (без налета, с ненарушенным напочвенным покровом, состоящим из лишайниковой подушки) (рис. 2). Следует отметить, что сравнение проводилось по ограниченному набору данных, так как наблюдение не было изначально запланировано. Это ограничивает возможности полноценного геохимического моделирования и установления точных количественных трендов. Однако следует подчеркнуть, что подобные находки оксалатных образований в местах интенсивного техногенного воздействия в криолитозоне не являются единичными. Аналогичные проявления защитной биоминерализации лишайников отмечались нами ранее на других участках в районе алмазодобычи и золотодобычи, что указывает на типичность данной реакции для экосистем, подверженных подобному прессингу (Vasileva et al., 2023; Васильева и др., 2024).

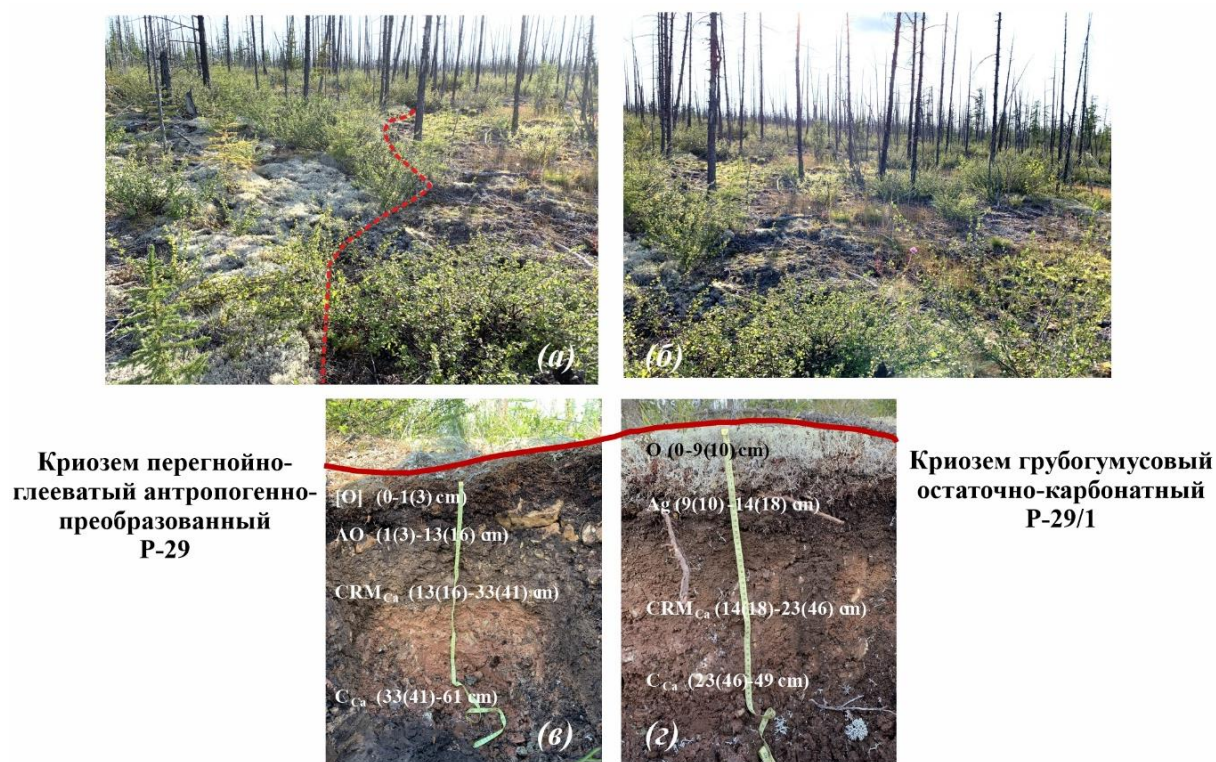


Рис. 2. Исследованная территория: а – площадка почвенных разрезов; б – общий вид склона; в – почвенный разрез P-29 с белым налетом уэдделлита на поверхности; г – почвенный разрез P-29/1
Fig. 2. Study area: а and б – general view with the location of the soil profiles; в – soil profile P-29 with a white coating of weddellite on the surface; г – soil profile P-29/1

Результаты полуколичественного рентген-дифракционного анализа (РДА) выявили как сходства, так и принципиальные различия в минералогическом составе почвенных профилей P-29 и P-29/1 (рис. 3).

В обоих исследованных разрезах (P-29 и P-29/1) минералогический состав закономерно меняется с глубиной. В нижних горизонтах преобладают первичные минералы материнской породы: карбонаты, в основном доломит, и алюмосиликаты (полевые шпаты, мусковит, клинохлор). В средней части профиля содержание устойчивого кварца возрастает. Однако ключевое различие наблюдается в самом верхнем горизонте. В разрезе P-29/1 поверхностный слой состоит из кварца и доломита, что типично для слаборазвитых органогенных горизонтов криоземов. В разрезе P-29, там, где был обнаружен белый налет, картина иная. В горизонте 0–1(3) см доминирующим минералом, составляющим почти половину массы (47,97 %), является уэдделлит – двухводный оксалат кальция. Примечательно, что в этом же горизонте впервые появляется кальцит (19,41 %), тогда как доля доломита резко падает. Важно, что уэдделлит не обнаружен ни в одном из нижележащих горизонтов обоих разрезов, что доказывает его поверхностное происхождение непосредственно на месте. Сопутствующее образование кальцита, вероятно, связано с химическим взаимодействием биогенной щавелевой кислоты с доломитом породы. Полное отсутствие уэдделлита в минералогически сходном разрезе с ненарушенной лишенобиотой однозначно указывает, что для его масштабного образования необходим особый спусковой механизм, который в данном случае связан с комплексным техногенным воздействием на лишайники. Таким механизмом, по-видимому, стал разлив пульпы, который затронул лишайники, произрастающие в микрозападине (разрез P-29), и не затронул лишайники на соседнем микроповышении (разрез P-29/1). Анализ самого налета методом рентген-дифракционного анализа подтвердил, что он

практически полностью состоит из хорошо окристаллизованного уэделлита (четкие и острые линии на дифрактограмме), с незначительной примесью доломита, полевого шпата и кварца.

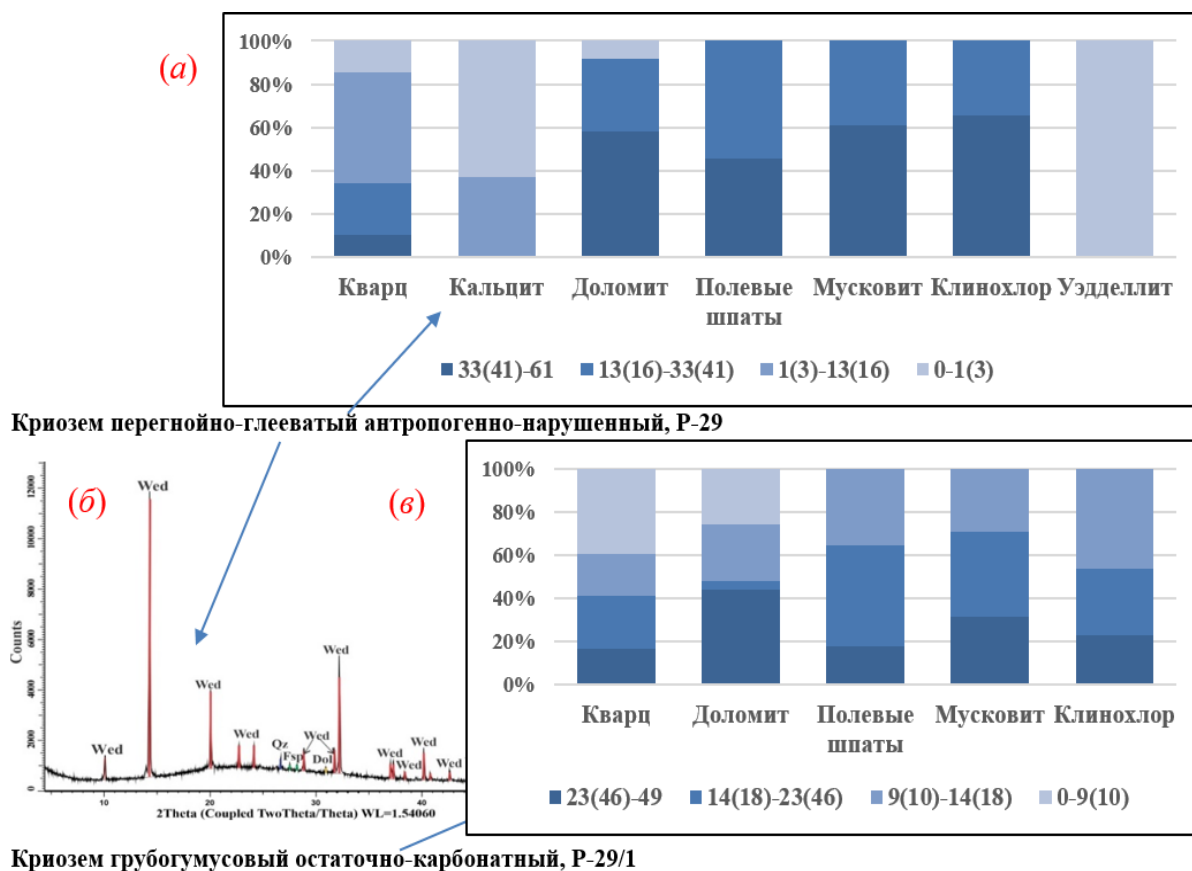


Рис. 3. Распределение минералов по горизонтам в исследованных почвах (а, в) и дифрактограмма налета (б), почти полностью состоящего из уэделлита с примесью кварца, полевого шпата и доломита
 Fig. 3. Distribution of minerals by horizons in the studied soils (a, v) and diffractogram of the coating (b) consisting almost entirely of weddellite with an admixture of quartz, feldspar and dolomite

Валовой химический состав исследованных почв (табл. 1) отражает их минералогию и выявляет некоторые различия между разрезами. В обоих профилях преобладают SiO_2 (до 49 %), Al_2O_3 (до 10 %), CaO (до 13 %) и MgO (до 11 %), что соответствует карбонатно-терригенному составу почвообразующих пород. Содержание CaO в поверхностном горизонте P-29 (8,96 %) заметно выше, чем в верхнем горизонте P-29/1 (1,36 %), что коррелирует с присутствием уэделлита, выявленного по результатам рентген-дифракционного анализа (рис. 3). В отличие от кальция, магний не накапливается в поверхностном горизонте; его содержание преимущественно определяется карбонатной составляющей почвообразующих пород – доломитом, также диагностированным методом РДА. Распределение MgO в поверхностных горизонтах разрезов P-29 и P-29/1 близко по значениям (0,91 и 0,68 % соответственно). При этом в минеральных горизонтах P-29 концентрации MgO достигают 8,21–10,91 %, что сопоставимо с фоновым разрезом. Значения Na_2O в разрезе P-29 (0,24 % в верхнем горизонте) заметно превышают таковые в P-29/1 (0,02 % в верхнем органогенном горизонте). Обе исследуемые почвы характеризуются слабощелочной реакцией среды (pH 7,4–7,9) в минеральных горизонтах. Исключение составляет органогенный горизонт разреза P-29/1, где pH смещается в слабокислую область (pH = 6,2), в то время как в антропогенно-преобразованном разрезе P-29 даже поверхностный горизонт имеет слабощелочную реакцию (pH = 7,8). Содержание гумуса в органогенных горизонтах исследуемых педонов высокое (от 20,2 до более 30 %). В разрезе P-29, почва которого описывает антропогенное преобразование, отмечается повышенное содержание органического вещества в горизонте CRMca (6,1 %), что выше показателей аналогичного горизонта в разрезе P-29/1 (0,22 %) и может указывать на трансформацию почвенного профиля под влиянием внешних воздействий. Потери при прокаливании (ППП) достигают максимальных значений (до 73,88 %) в горизонтах с высоким содержанием органики и снижаются до нуля в карбонатных нижних горизонтах. Таким образом, оба разреза находятся в зоне техногенного влияния, однако степень их преобразования различается. В разрезе P-29/1, приуроченном к микроповышению, почвенный профиль сохранил природное строение, что согласуется с присутствием лишайникового покрова и более закономерным распределением основных компонентов.

В разрезе P-29 техногенное воздействие проявляется сильнее и выражается в трансформации почвенного профиля, изменении соотношений между CaO, органическим веществом и другими компонентами.

Таблица 1. Некоторые химические свойства почв разрезов P-29 и P-29/1
Table 1. Some chemical properties of soil profiles P-29 and P-29/1

Почвы	Криозем грубогумусовый остаточно-карбонатный (P-29/1)				Криозем перегнойно-глееватый антропогенно-преобразованный (P-29)			
	0–9(10)	9(10)–14(18)	14(18)–23(46)	23(46)–49	0–1(3)	1(3)–13(16)	13(16)–33(41)	33(41)–61
Глубина, см								
SiO ₂ , %	6,24	49,13	19,82	39,48	5,43	3,50	40,52	35,7
Al ₂ O ₃ , %	1,19	10,23	4,74	8,36	0,79	1,40	7,83	8,78
Fe ₂ O ₃ , %	0,45	1,83	3,49	2,48	1,03	0,52	н/о	3,02
K ₂ O, %	0,48	3,90	1,52	3,39	0,32	0,38	3,05	3,40
Na ₂ O, %	0,02	0,22	0,02	0,13	0,24	0,02	0,17	0,09
CaO, %	1,36	6,81	5,34	12,41	8,96	6,42	10,57	12,98
MgO, %	0,68	6,66	1,78	10,13	0,91	1,05	8,21	10,91
MnO, %	0,01	0,07	0,04	0,05	0,02	0,01	0,09	0,06
CO ₂ , %	1,88	9,57	1,86	18,73	1,57	1,13	14,91	19,76
ППП, %	64,39	4,72	53,98	0	66,62	73,88	0	0
pH	6,2	7,8	7,4	7,9	7,8	7,4	7,8	7,8
Гумус, %	>30	6,34	0,22	1,8	23,8	20,2	6,1	1,8

Примечание. ППП – потери при прокаливании.

Результаты количественного анализа микроэлементного состава (табл. 2) свидетельствуют о том, что формирование оксалатов кальция носит не случайный характер, а приурочено к участкам с интенсивным типом техногенного воздействия. В исследуемых разрезах фиксируется специфическая дифференциация элементного спектра. Для сравнения приведены значения регионального фона, которые рассчитаны на основе статистически достоверной выборки ($n = 1241$), куда вошли образцы доминирующих и интразональных типов почв природных ненарушенных ландшафтов Северо-Западной Якутии (*Легостаева и др., 2021*). В разрезе P-29 (криозем перегнойно-глееватый антропогенно-преобразованный) концентрации Cr (69,7 г/т), Ni (52,4 г/т), V (83,5 г/т) и Zn (253,0 г/т) находятся на уровне регионального фона или незначительно превышают его. Концентрации Ba (340,0 г/т) и Sr (250,0 г/т) превышают фоновый уровень. Содержания Cu (18,0 г/т) и Pb (4,0 г/т) находятся ниже регионального фона. В разрезе P-29/1 (криозем грубогумусовый остаточно-карбонатный) наиболее заметны повышенные концентрации Sr (1700,0 г/т), Nb (350,0 г/т), Ba (790 г/т), Y (55,3 г/т) и Zn (366 г/т). Содержания Cr (2,2 г/т), Ni (30,5 г/т) и V (11,0 г/т) ниже регионального фона. Содержания Cu (3,6 г/т) и Pb (1,9 г/т) также остаются низкими. Следует отметить, что Zn повышен в обоих разрезах. Концентрации Cu и Pb в обоих разрезах ниже регионального фона. Преобладание группы переходных металлов (Cr, Ni, V, Zn), как правило, характерно для влияния карьерных вод, закачиваемых в подземные полигоны утилизации высокоминерализованных вод (*Дроздов и др., 2013; Легостаева и др., 2019*). Таким образом, можно предположить, что комплекс условий – расположение на склоне в микрозападине, повышенное увлажнение, экранирование надмерзлотного горизонта, высокая концентрация элементов-индикаторов кимберлитов – привел к угнетению лишенобиоты, защитным свойством которой является продуцирование оксалатов кальция.

Таблица 2. Содержание микроэлементов в почвах разреза P-29 и P-29/1, г/т
Table 2. Trace element content in soils of profile P-29 and P-29/1, g/t

Элемент	Региональный фон, $n = 1241^*$	P-29, криозем перегнойно-глееватый антропогенно-преобразованный, $n = 4$	P-29/1, криозем грубогумусовый остаточно-карбонатный, $n = 4$
Cr	80,6	$69,7 \pm 7,0$	$(2,2)^{**} \pm 1,1$
Ni	38,5	$52,4 \pm 5,2$	$30,5 \pm 4,7$
V	85,1	$83,5 \pm 8,4$	$11,0 \pm 1,7$
Sc	19,7	$10,4 \pm 1,6$	$5,4 \pm 1,1$
Co	42,0	$12,6 \pm 1,9$	$15,0 \pm 2,3$
Ba	отс***	$340,0 \pm 34,0$	$790,0 \pm 79,0$
Sr	отс	$250,0 \pm 25,0$	$1700,0 \pm 170,0$
Nb	9,2	$14,8 \pm 2,2$	$350,0 \pm 35$
Zr	отс	$160,0 \pm 16,0$	$270,0 \pm 27,0$
Y	36,3	$16,8 \pm 2,5$	$55,3 \pm 8,3$

Yb	28,0	$2,0 \pm 0,4$	$2,5 \pm 0,5$
Cu	32,0	$18,0 \pm 2,7$	$3,6 \pm 0,8$
Pb	10,0	$4,0 \pm 0,8$	$1,9 \pm 0,4$
Zn	54,2	$253,0 \pm 25,3$	$366,0 \pm 36,6$

Примечание. *Региональный фон рассчитан по 1241 пробе (Легостаева и др., 2021); **значение в скобках получено при концентрации ниже предела линейности калибровочной кривой; ***отс – отсутствует/не определялся.

В то же время высокие концентрации Ba, Sr, Nb, Zr на фоне меньшего увлажнения и отсутствия антропогенно-преобразованного горизонта не приводят к гибели лишайникового покрова. И, как следствие, образование оксалатов кальция минимально и достаточно для стабильного онтогенеза. Таким образом, анализ полученных данных подтверждает, что массовое образование макроскопических скоплений уэдделлита служит надежным диагностическим признаком техногенной трансформации среды. Данные минералы выступают в роли биокосных новообразований, маркирующих предельную адаптационную нагрузку на фитоценозы в условиях комплексного техногенного воздействия (в том числе высокоминерализованных рассолов), которое наиболее ярко проявляется в микропонижении рельефа.

Анализ образцов лишайников, представленных главным образом кладонией оленьей (*Cladonia rangiferina*), и почвы, отобранных непосредственно в месте образования оксалатной корки методом ГХ-МС, не выявил присутствия свободной щавелевой кислоты, которая могла бы быть непосредственным источником для кристаллизации оксалатов на поверхности (рис. 4, а, б). При этом в образцах лишайников и почвы были обнаружены относительно высокие концентрации нерастворимых оксалатов и сукцинатов, которые идентифицировали по образованию щавелевой и янтарной кислот в ходе кислотной обработки (рис. 4, в, г). Количество щавелевой кислоты в форме оксалатов в биомассе лишайников составило $2,7 \pm 0,2$ мг/г сухого веса (табл. 3). Наибольшее содержание щавелевой кислоты в форме оксалатов наблюдалось в белом налете на почвенно-растительном покрове, где ее содержание составляло $38,9 \pm 1,2$ мг/г сухого веса.

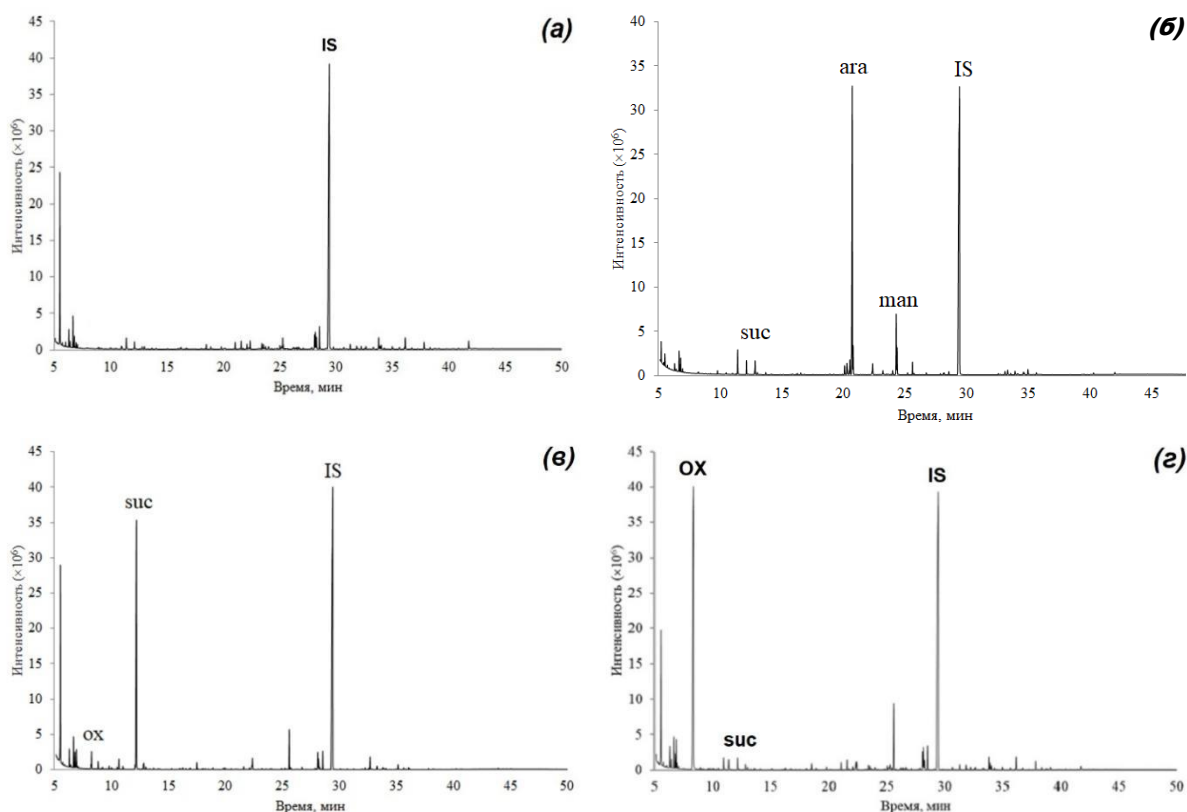


Рис. 4. Хроматограммы образцов верхнего органо-минерального горизонта почвы и лишайника до (а, б) и после обработки соляной кислотой (в, г). Ох – щавелевая кислота (2 ТМС), suc – янтарная кислота (2 ТМС), ара – арабидол, ман – маннитол, IS – внутренний стандарт C23

Fig. 4. Chromatograms of samples from the top organo-mineral soil horizon and lichen before (a, б) and after hydrochloric acid treatment (в, г). Ox – oxalic acid (2 TMS), suc – succinic acid (2 TMS), ara – arabidol, man – mannitol, IS – internal standard C23

Таблица 3. Содержание щавелевой кислоты в образцах почвы и лишайников после обработки соляной кислотой
 Table 3. Oxalic acid content in soil and lichen samples after hydrochloric acid treatment

Объект и глубина	Содержание щавелевой кислоты
Кризем перегнойно-глееватый антропогенно-преобразованный, P-29	
Налет	38,9 ± 1,2
0–1(3) см	12,4 ± 0,5
1(3)–13(16) см	2,9 ± 0,2
13(16)–33(41) см	н.о.
Лишайник (<i>Cladonia rangiferina</i>)	2,7 ± 0,2
Кризем грубогумусовый остаточно-карбонатный, P-29/1	
0–9(10) см	0,6 ± 0,1
9(10)–14(18) см	н.о.

В ходе исследования с применением сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) проведен морфологический анализ кристаллов, выделенных из почвенного налета (рис. 5). Полученные данные убедительно свидетельствуют о биогенном происхождении этих кристаллов. На микрофотографиях отчетливо видны хорошо сформированные кристаллические структуры дипирамидальной (бипирамидальной) формы с гладкими, четко очерченными гранями. Такая морфология типична для уэдделлита ($\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) – кристаллогидрата оксалата кальция, образующегося в биологических системах. Подобные кристаллические формы неоднократно описаны в научной литературе при изучении оксалатов кальция в тканях высших растений и талломах лишайников (Nakata, 2003; Franceschi et al., 2005).

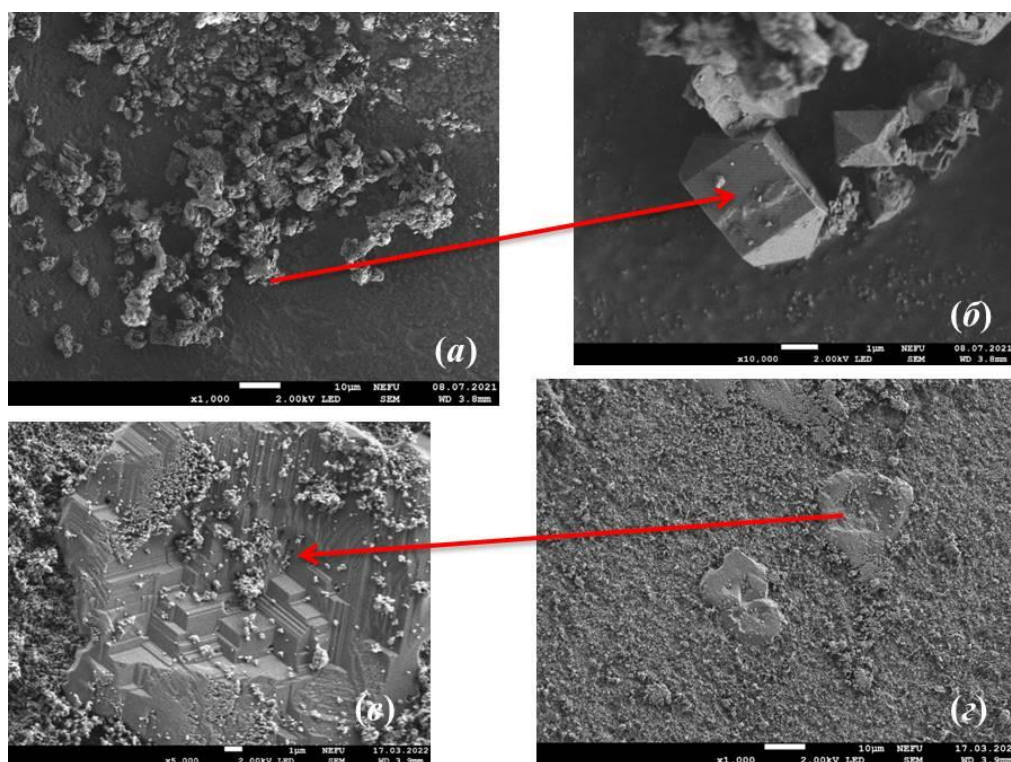


Рис. 5. Микрофотографии кристаллов оксалата кальция, полученные методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ): а, б – кристаллы уэдделлита биогенного происхождения из почвенного налета (разрез P-29); в, г – кристаллы оксалата кальция, полученные искусственно (для сравнения)
 Fig. 5. SEM microphotographs of calcium oxalate crystals: а, б – biogenic weddellite crystals from the soil coating (profile P-29); в, г – calcium oxalate crystals obtained artificially (for comparison)

Для объективности исследования выполнен сравнительный анализ с кристаллами оксалата кальция, полученными в лабораторных условиях химическим методом. Искусственно полученные кристаллы демонстрируют принципиально иную морфологию: они имеют неправильную, изометричную или пластинчатую форму, склонны к образованию агрегатов и характеризуются шероховатой поверхностью без четких граней. Это контрастное различие наглядно демонстрирует, что биологические матрицы

и специфические условия *in vivo* оказывают существенное влияние на процессы нуклеации и роста кристаллов, обуславливая формирование характерных для биогенных образцов дипирамидальных габитусов.

Известно, что многие виды лишайников обладают способностью активно накапливать оксалат кальция в своих слоевищах – в отдельных случаях концентрация достигает 66 % от сухой массы (как у *Aspicilia esculenta*) (Donkin, 1981). Хотя точная биологическая функция такого накопления остается предметом дискуссий, исследователи предполагают, что оно может выполнять роль механизма детоксикации, участвовать в фоторегуляции или обеспечивать структурную поддержку таллома (Ručová et al., 2022). При этом механизм образования внешних кристаллических корок на поверхности субстрата хорошо изучен: он связан с выделением лишайниками щавелевой кислоты, которая вступает в химическую реакцию с ионами минерального субстрата, приводя к осаждению кристаллов оксалата кальция (Frank-Kamenetskaya et al., 2019).

Примечательно, что на территории Западной Якутии ранее не фиксировались столь масштабные поверхностные скопления уэдделлита. Общая площадь, занятая сплошным белым налетом уэдделлита на поверхности почвы в районе разреза Р-29, составляла около 2–3 м². Налет имел пятнисто-прерывистый характер и был приурочен преимущественно к микрозападинам с повышенной влажностью и нарушенным лишайниковым покровом. Мощность налета варьировала от 1 до 7 мм, местами образуя сплошную корку. Визуально, в целом, налет был зафиксирован на достаточно большой территории на пологом склоне в месте разлива пульпы. Мощность техногенного намыва по склону разная: на вершине больше, по мере растекания мощность уменьшается, местами с хорошим возобновлением, подростом ольховника кустарникового (*Duschekia fruticose*) и фрагментарно сохранившимся лишайниковым покровом (рис. 2). Обнаружение кристаллов с типичной биогенной морфологией в непосредственной близости от угнетенных талломов лишайников позволяет обоснованно интерпретировать наблюдаемый налет как результат защитной биоминерализации. По всей видимости, этот процесс индуцирован стрессовым воздействием техногенных факторов, оказывающих негативное влияние на лишайниковые сообщества.

Проведенное исследование позволяет сделать вывод о биогенном происхождении обширного поверхностного налета уэдделлита, обнаруженного на техногенно-преобразованном склоне вблизи Удачинского ГОКа. Ключевым доказательством этого служат данные ГХ-МС, выявившие отсутствие свободной щавелевой кислоты в почве при наличии значительного количества связанных оксалатов непосредственно в биомассе лишайников (2,7 мг/г). Это указывает на то, что щавелевая кислота изначально продуцировалась лишайниками и далее, взаимодействуя с кальцием субстрата, формировала кристаллы на поверхности. Данный процесс можно рассматривать как защитную реакцию симбиотического организма на стрессовые условия, что согласуется с выводами других исследователей (Wadsten et al., 1985; Marques et al., 2016; Gadd, 2007).

Минералогическое и морфологическое изучение налета подтверждает эту гипотезу. Высокая степень кристалличности и чистота уэдделлита, а также характерная дипирамидальная форма кристаллов, типичны для биогенных оксалатов кальция. Существенно, что уэдделлит не был обнаружен в нижележащих горизонтах почвы, что свидетельствует о поверхностном, современном характере его образования, не связанном с глубинными геохимическими процессами.

Сравнение двух соседних почвенных разрезов (Р-29 и Р-29/1), находящихся в сходных геоморфологических условиях, выявило принципиальную особенность: интенсивное оксалатообразование наблюдалось только на участке с явными признаками угнетения лишайниковой биоты. Это позволяет рассматривать данный феномен не как фоновый биоминеральный процесс, а как специфический индикатор экологического неблагополучия. На исследуемом участке совпадают несколько потенциальных стрессовых факторов: близость к объектам инфраструктуры ГОКа (пульпопровод, хвостохранилище), расположение над полигоном захоронения высокоминерализованных рассолов, а также следы разлива пульпы, зафиксированные в год отбора проб. Важно различать характер воздействия этих факторов. Длительное захоронение высокоминерализованных хлоридно-кальциевых рассолов в подмерзлотный коллектор, расположенный непосредственно под участком исследований, создает хронический химический стресс. Эти рассолы, характеризующиеся высокой минерализацией и избытком ионов Ca²⁺, Na⁺ и Cl⁻ (Легостаева и др., 2019), могут мигрировать по зонам нарушений или подниматься капиллярно в деятельный слой при сезонном оттаивании мерзлоты, формируя фоновое засоление и подготавливая условия для реакции лишайниковой биоты. В отличие от этого, разлив пульпы, визуально зафиксированный в год обнаружения налета (рис. 2), представляет собой острый разовый стрессовый фактор. По нашему мнению, именно он мог стать непосредственным катализатором, спровоцировавшим массовую защитную реакцию лишайников на фоне уже существующего хронического засоления. Источником кальция для реакции, вероятно, послужили как карбонаты материнской породы (доломит), так и потенциально сами техногенные потоки. Образование оксалатной пленки, по-видимому, является попыткой лишайников изолировать талломы от агрессивной среды, связывая избыточные ионы кальция в нерастворимую форму. Однако масштабы явления указывают на то, что защитный механизм был превышен, что привело к массовой кристаллизации минерала на поверхности и угнетению самих организмов.

Примечательно, что для территории Западной Якутии ранее не описывались столь масштабные поверхностные скопления уэдделлита, связанные с лишенобиотой. Таким образом, обнаруженное явление можно трактовать как индикаторную биоминеральную реакцию на локальный техногенный прессинг в условиях криолитозоны. Образование макроскопических скоплений уэдделлита сигнализирует о критической точке в устойчивости лишенобиоты к комплексному воздействию. Этот процесс рекомендуется учитывать при разработке систем экологического мониторинга в районах добычи полезных ископаемых на многолетнемерзлых породах, так как он представляет собой наглядный и легко диагностируемый маркер нарушения почвенно-растительного покрова. Следует отметить, что образование оксалатов в условиях техногенного стресса не является уникальным явлением для нашего региона. Ранее нами были описаны оксалаты кальция в почвах других промышленных районов Якутии (Vasileva et al., 2023; Васильева и др., 2024), а в литературе имеются обширные данные об оксалатообразовании лишайниками в экстремальных условиях, например, на вулкане Толбачик, на халькопиритовой руде и т. д. (Voropaev et al., 2025; Frank-Kamenetskaya et al., 2021). Это позволяет предположить, что описанный нами феномен может быть характерен для широкого круга экосистем, испытывающих химический стресс.

Заключение

Проведенные исследования показали, что образование обширного поверхностного налета уэдделлита на техногенно-преобразованном участке в районе Удачинского ГОКа имеет биогенную природу и связано с защитной реакцией лишайников (*Cladonia rangiferina*) на комплексное техногенное воздействие. Биогенное происхождение налета подтверждено данными ГХ-МС (наличие связанных оксалатов в биомассе лишайников при отсутствии свободной щавелевой кислоты в почве), минералогическим анализом (уэдделлит только в поверхностном горизонте разреза Р-29) и морфологическими критериями (дипирамидальная форма кристаллов, типичная для биогенных оксалатов).

Необходимыми предпосылками для оксалатообразования выступают природные факторы: повышенная влажность в микрозападине, слабощелочная среда (рН 7,4–7,8) и наличие карбонатного материала (доломит, кальцит), служащего источником ионов кальция. Однако запуск аномально интенсивного процесса кристаллизации связан с техногенным воздействием. Участок обнаружения налета характеризуется сочетанием потенциальных стрессовых факторов: расположением над полигоном захоронения высокоминерализованных хлоридно-кальциевых рассолов, близостью к объектам инфраструктуры ГОКа и следами разлива пульпы, зафиксированными в год отбора проб.

Образование макроскопических скоплений уэдделлита при одновременном угнетении лишайникового покрова предлагается рассматривать как диагностический признак нарушения экологического равновесия в криолитозоне, вызванного техногенным засолением. Всевозможные налеты оксалатов на растительности или лишайниках могут быть использованы в системах экологического мониторинга на территориях, подверженных воздействию горнодобывающей промышленности, в качестве наглядного и легко диагностируемого маркера критических уровней техногенной нагрузки.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке проектов государственного задания Минобрнауки РФ № FUFG-2024-0007 "Мантейный магматизм, эволюция литосферы и рудоносность восточной части Сибирской платформы, геоэкология недропользования".

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Васильева Т. И., Легостаева Я. Б., Шадринова О. В. Оксалаты кальция в системе почва – растение на территории промышленных месторождений алмазов и золота в Якутии // Актуальные проблемы экологической геохимии : сб. науч. тр. по материалам Всерос. науч.-практ. конф., Москва, 26–27 ноября 2024 г. М. : ИМГРЭ, 2024. С. 45–48.
- Головкин Т. К., Шелякин М. А., Захожий И. Г. [и др.]. Реакция лишайников на загрязнение среды при добыче бокситовой руды в таежной зоне // Теоретическая и прикладная экология. 2018. № 2. С. 44–53. DOI: <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2018-2-044/2-053/1>. EDN: UTYUMQ.
- Дроздов А. В., Попов В. Ф. Удаление дренажных рассолов в недра криолитозоны при разработке алмазных месторождений Якутии // Разведка и охрана недр. 2013. № 12. С. 44–48. EDN: ROTTKZ.
- Качинский Н. А. Механический и микроагрегатный состав почвы, методы его изучения. М. : Изд-во АН СССР, 1958. 192 с.
- Кораго А. А. Введение в биоминералогию. СПб. : Недра, 1992. 280 с.

- 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. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/9/3364>. EDN: PLXWDE.
- 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. DOI: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-4-58-63>. EDN: AGUHAN.
- Николин Е. Г., Якшина И. А. Распространение некоторых древесных видов на северном пределе в Усть-Ленском заповеднике (Якутия). Сообщение I. Лиственница Каяндера *Larix cajanderi* Mayr // Сибирский лесной журнал. 2019. № 2. С. 16–31. DOI: <https://doi.org/10.15372/sjfs20190202>. EDN: OAPRGK.
- Сайтова З. Р., Фархутдинов Р. Г. Видовой состав лишенобиоты Ишимбайского заказника Республики Башкортостан // Наука, образование, общество: проблемы и перспективы развития : сб. науч. тр. по материалам Междунар. науч.-практ. конф., Тамбов, 28 февраля 2014 г. Ч. 12. Тамбов, 2014. С. 157–158. EDN: SUATMF.
- Cuéllar-Cruz M., Pérez K. S., Mendoza M. E., Moreno A. Biocrystals in plants: A short review on biomineralization processes and the role of phototropins into the uptake of calcium // Crystals. 2020. Vol. 10, Iss. 7. Article number: 591. DOI: <https://doi.org/10.3390/cryst10070591>.
- Donkin R. A. The "Manna Lichen": *Lecanora Esculenta* // Anthropos. 1981. Vol. 76, N 3/4. P. 562–576. URL: <http://www.jstor.org/stable/40460968>.
- Du G., Zhou Y., Liu C., Ghorbanpour M. [et al.]. Rhizosphere characteristics combined with physiology and transcriptomics reveal key metabolic pathway responses in *Dendrobium officinale* upon exposure to calcium-rich karst environments // Environmental and Experimental Botany. 2025. Vol. 232. P. 106–115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2025.106115>.
- Echigo T., Kimata M. Crystal chemistry and genesis of organic minerals: A review of oxalate and polycyclic aromatic hydrocarbon minerals // The Canadian Mineralogist. 2010. Vol. 48, Iss. 6. P. 1329–1357. DOI: <https://doi.org/10.3749/canmin.48.5.1329>.
- Franceschi V. R., Nakata P. A. Calcium oxalate in plants: Formation and function // Annual Review of Plant Biology. 2005. Vol. 56. P. 41–71. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.56.032604.144106>.
- Frank-Kamemetskaya O., Rusakov A., Barinova E., Zelenskaya M. [et al.]. The formation of oxalate patina on the surface of carbonate rocks under the influence of microorganisms // Proceedings of the 10th Intern. Congress for Applied Mineralogy (ICAM) / eds.: M. Broekmans. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012. P. 213–220. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-27682-8_27.
- Frank-Kamenetskaya O. V., Ivanyuk G. Yu., Zelenskaya M. S., Izatulina A. R. [et al.]. Calcium oxalates in lichens on surface of apatite-nepheline ore (Kola Peninsula, Russia) // Minerals. 2019. Vol. 9, Iss. 11. Article number: 656. DOI: <https://doi.org/10.3390/min9110656>.
- Frank-Kamenetskaya O. V., Zelenskaya M. S., Izatulina A. R., Vereshchagin O. S. [et al.]. Copper oxalate formation by lichens and fungi // Scientific Reports. 2021. Vol. 11. Article number: 24239. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-03600-59>.
- Gadd G. M. Geomycology: Biogeochemical transformations of rocks, minerals, metals and radionuclides by fungi, bioweathering and bioremediation // Mycological Research. 2007. Vol. 111, Iss. 1. P. 3–49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mycres.2006.12.001>.
- Gadd G. M., Bahri-Esfahani J., Li Q., Rhee Y. J. [et al.]. Oxalate production by fungi: Significance in geomycology, biodeterioration and bioremediation // Fungal Biology Reviews. 2014. Vol. 28, Iss. 2–3. P. 36–55. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbr.2014.05.001>.
- Garty J. Biomonitoring heavy metal pollution with lichens // In: Protocols in Lichenology. Springer Lab Manuals / eds.: I. C. Kranner, R. P. Beckett, A. K. Varma. Springer, Berlin, Heidelberg, 2002. P. 458–482. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-56359-1_27.
- Gololobova A., Legostaeva Y., Popov V., Makarov V. [et al.]. Geochemical characteristics of soils to the impact of diamond mining in Siberia (Russia) // Minerals. 2022. Vol. 12, Iss. 12. Article number: 1518. DOI: <https://doi.org/10.3390/min12121518>.
- Gómez-Espinoza O., González-Ramírez D., Méndez-Gómez J., Guillén-Watson R. [et al.]. Calcium oxalate crystals in leaves of the extremophile plant *Colobanthus quitensis* (Kunth) Bartl. (Caryophyllaceae) // Plants. 2021. Vol. 10. P. 1787. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants10091787>.
- Krajanová V. Discoveries and identification methods of metal oxalates in lichens and their mineral associations: A review of past studies and analytical options for lichenologists // Fungal Biology Reviews. 2023. Vol. 43. Article number: 100287. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbr.2022.09.003>.
- Lucadamo L., Corapi A., Loppi S., Paoli L. [et al.]. Spatial variation of eco-physiological parameters in the lichen *Pseudevernia furfuracea* transplanted in an area surrounding a cement plant (S Italy) // Environmental Monitoring and Assessment. 2015. Vol. 187. Article number: 500. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4712-2>.

- Malainine M. E., Dufresne A., Dupeyre D., Vignon M. R. [et al.]. First evidence for the presence of weddellite crystallites in *Opuntia ficus indica* Parenchyma // *Zeitschrift für Naturforschung C*. 2003. Vol. 58, Iss. 11–12. P. 812–816. DOI: https://doi.org/10.1515/znc-2003-11-1211_2.
- Marques J., Gonçalves J., Oliveira C., Favero-Longo S. E. [et al.]. On the dual nature of lichen-induced rock surface weathering in contrasting micro-environments // *Ecology*. 2016. Vol. 97, Iss. 10. P. 2844–2857. DOI: <https://doi.org/10.1002/ecy.1525>.
- Nakata P. A. Advances in our understanding of calcium oxalate crystal formation and function in plants // *Plant Science*. 2003. Vol. 164, Iss. 6. P. 901–909. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(03\)00120-1](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(03)00120-1).
- Ručová D., Đorđević T., Baláž M., Weidinger M. [et al.]. Investigation of calcium forms in lichens from travertine sites // *Plants*. 2022. Vol. 11, Iss. 5. Article number: 620. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants11050620>.
- Rusakov A., Kuz'mina M., Frank-Kamenetskaya O. Biofilm medium chemistry and calcium oxalate morphogenesis // *Molecules*. 2021. Vol. 26, Iss. 16. Article number: 5030. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules26165030>.
- Sarret G., Manceau A., Cuny D., Van Haluwyn C. [et al.]. Mechanisms of lichen resistance to metallic pollution // *Environmental Science & Technology*. 1998. Vol. 32, Iss. 21. P. 3325–3330. DOI: <https://doi.org/10.1021/es970718n>.
- Syed S., Buddolla V., Lian B. Oxalate carbonate pathway – conversion and fixation of soil carbon – a potential scenario for sustainability // *Frontiers in Plant Science*. 2020. Vol. 11. Article number: 591297. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.591297>.
- Vasileva T. I., Legostaeva Y. B. Calcium oxalates in soils within disturbed landscapes and rock on the territory of Yakutia (Russia), formation conditions in a sharply continental cryoarid climate // *Minerals*. 2023. Vol. 13, Iss. 5. Article number: 659. DOI: <https://doi.org/10.3390/min13050659>.
- Voropaev S. A., Sevastyanov V. S., Dushenko N. V., Tkachenko E. A. [et al.]. Weathering of volcanic eruption products and rivers contamination in Kamchatka // *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*. 2025. Vol. 22, Iss. 1. P. 33–41. DOI: <https://doi.org/10.36922/ajwep.8113>.
- Wadsten T., Moberg R. Calcium oxalate hydrates on the surface of lichens // *The Lichenologist*. 1985. Vol. 17, Iss. 3. P. 239–245. DOI: <https://doi.org/10.1017/s0024282985000305>.
- Wakefield J. M., Bhattacharjee J. Effect of air pollution on chlorophyll content and lichen morphology in Northeastern Louisiana // *Evansia*. 2012. Vol. 29, Iss. 4. P. 104–114. DOI: <https://doi.org/10.1639/079.029.0404>.
- Wilson J. M., Jones D. Lichen weathering of minerals: Implications for pedogenesis. In: *Residual deposits: surface related weathering processes and material*. Ed. Wilson R. C. L. Special Publication of the Geological Society. Blackwell, London. 1983.
- Wilson M. J., Jones D., Russell J. D. Glushinskite, a naturally occurring magnesium oxalate // *Mineralogical Magazine*. 1980. Vol. 43, Iss. 331. P. 837–840. DOI: <https://doi.org/10.1180/minmag.1980.043.331.02>.

References

- Vasilieva, T. I., Legostaeva, Y. B., Shadrinova, O. V. 2024. Calcium oxalates in the soil – plant system in the territory of industrial diamond and gold deposits in Yakutia. Coll. of scientific papers based on the materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference *Current Problems of Environmental Geochemistry*, Moscow, November 26–27, 2024. Moscow, pp. 45–48. (In Russ.)
- Golovko, T. K., Shelyakin, M. A., Zakhozhiy, I. G. et al. 2018. Lichen response to environmental pollution during bauxite ore mining in the taiga zone. *Theoretical and Applied Ecology*, 2, pp. 44–53. DOI: <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2018-2-044/2-053/1>. EDN: UTYUMQ. (In Russ.)
- Drozdov, A. V., Popov, V. F. 2013. Removal of drainage brines into the permafrost strata during the development of diamond deposits in Yakutia. *Razvedka i Ohrana Nedr*, 12, pp. 44–48. EDN: ROTTKZ. (In Russ.)
- Kachinskiy, N. A. 1958. Mechanical and microaggregate composition of the soil, methods of its study. Moscow. (In Russ.)
- Korago, A. A. 1992. Introduction to biomineralogy. St. Petersburg. (In Russ.)
- Legostaeva, Ya. B., Gololobova, A. G. 2021. Features of trace elements distribution in soils of background and impact zones in diamond mining areas of the north-west of the Siberian platform. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 332(9), pp. 142–153. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/9/3364>. EDN: PLXWDE. (In Russ.)
- Legostaeva, Ya. B., Ksenofontova, M. I., Popov, V. F. 2019. Geoecological monitoring on the territory of underground disposal sites of highly mineralized waters in Western Yakutia. *Ecology and Industry of Russia*, 23(4), pp. 58–63. DOI: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-4-58-63>. EDN: AGUHAN. (In Russ.)
- Nikolin, E. G., Yakshina, I. A. 2019. Distribution of some tree species at the northern limit in the Ust-Lensky Reserve (Yakutia). Report I. Kayander's larch *Larix cajanderi* Mayr. *Sibirskij Lesnoj Zhurnal*, 2, pp. 16–31. DOI: <https://doi.org/10.15372/sjfs20190202>. EDN: OAPRGK. (In Russ.)

- Saitova, Z. R., Farkhutdinov, R. G. 2014. Lichenoidication of air quality in the Ishimbaysky nature reserve of the Republic of Bashkortostan. Coll. of scientific papers based on the materials of the Intern. scient. and pract. conf. *Science, Education, Society: Problems and Development Prospects*, Tambov, February 28, 2014. Part 12. Tambov, pp. 157–158. EDN: SUATMF. (In Russ.)
- Cuéllar-Cruz, M., Pérez, K. S., Mendoza, M. E., Moreno, A. 2020. Biocrystals in plants: A short review on biomineralization processes and the role of phototropins into the uptake of calcium. *Crystals*, 10(7). Article number: 591. DOI: <https://doi.org/10.3390/cryst10070591>.
- Donkin, R. A. 1981. The "Manna Lichen": *Lecanora Esculenta*. *Anthropos*, 76(3/4), pp. 562–576. URL: <http://www.jstor.org/stable/40460968>.
- Du, G., Zhou, Y., Liu, C., Ghorbanpour, M. et al. 2025. Rhizosphere characteristics combined with physiology and transcriptomics reveal key metabolic pathway responses in *Dendrobium officinale* upon exposure to calcium-rich karst environments. *Environmental and Experimental Botany*, 232, pp. 106–115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2025.106115>.
- Echigo, T., Kimata, M. 2010. Crystal chemistry and genesis of organic minerals: A review of oxalate and polycyclic aromatic hydrocarbon minerals. *The Canadian Mineralogist*, 48(6), pp. 1329–1357. DOI: <https://doi.org/10.3749/canmin.48.5.1329>.
- Franceschi, V. R., Nakata, P. A. 2005. Calcium oxalate in plants: Formation and function. *Annual Review of Plant Biology*, 56, pp. 41–71. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.56.032604.144106>.
- Frank-Kamemetskaya, O., Rusakov, A., Barinova, E., Zelenskaya, M. et al. 2012. The formation of oxalate patina on the surface of carbonate rocks under the influence of microorganisms. Proceedings of the 10th Intern. Congress for Applied Mineralogy (ICAM). Eds.: M. Broekmans. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 213–220. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-27682-8_27.
- Frank-Kamenetskaya, O. V., Ivanyuk, G. Yu., Zelenskaya, M. S., Izatulina, A. R. et al. 2019. Calcium oxalates in lichens on surface of apatite-nepheline ore (Kola Peninsula, Russia). *Minerals*, 9(11). Article number: 656. DOI: <https://doi.org/10.3390/min9110656>.
- Frank-Kamenetskaya, O. V., Zelenskaya, M. S., Izatulina, A. R., Vereshchagin, O. S. et al. 2021. Copper oxalate formation by lichens and fungi. *Scientific Reports*, 11. Article number: 24239. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-03600-59>.
- Gadd, G. M. 2007. Geomycology: Biogeochemical transformations of rocks, minerals, metals and radionuclides by fungi, bioweathering and bioremediation. *Mycological Research*, 111(1), pp. 3–49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mycres.2006.12.001>.
- Gadd, G. M., Bahri-Esfahani, J., Li, Q., Rhee, Y. J. et al. 2014. Oxalate production by fungi: Significance in geomycology, biodeterioration and bioremediation. *Fungal Biology Reviews*, 28(2–3), pp. 36–55. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbr.2014.05.001>.
- Garty, J. 2002. Biomonitoring heavy metal pollution with lichens. In *Protocols in Lichenology*. Springer Lab Manuals. Eds. I. C. Kranner, R. P. Beckett, A. K. Varma. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 458–482. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-56359-1_27.
- Golobova, A., Legostaeva, Y., Popov, V., Makarov, V. et al. 2022. Geochemical characteristics of soils to the impact of diamond mining in Siberia (Russia). *Minerals*, 12(12). Article number: 1518. DOI: <https://doi.org/10.3390/min12121518>.
- Gómez-Espinoza, O., González-Ramírez, D., Méndez-Gómez, J., Guillén-Watson, R. et al. 2021. Calcium oxalate crystals in leaves of the extremophile plant *Colobanthus quitensis* (Kunth) Bartl. (Caryophyllaceae). *Plants*, 10, pp. 1787. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants10091787>.
- Krajanová, V. 2023. Discoveries and identification methods of metal oxalates in lichens and their mineral associations: A review of past studies and analytical options for lichenologists. *Fungal Biology Reviews*, 43. Article number: 100287. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbr.2022.09.003>.
- Lucadamo, L., Corapi, A., Loppi, S., Paoli, L. et al. 2015. Spatial variation of eco-physiological parameters in the lichen *Pseudevernia furfuracea* transplanted in an area surrounding a cement plant (S Italy). *Environmental Monitoring and Assessment*, 187. Article number: 500. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4712-2>.
- Malainine, M. E., Dufresne, A., Dupeyre, D., Vignon, M. R. et al. 2003. First evidence for the presence of weddellite crystallites in *Opuntia ficus indica* Parenchyma. *Zeitschrift für Naturforschung C.*, 58(11–12), pp. 812–816. DOI: https://doi.org/10.1515/znc-2003-11-1211_2.
- Marques, J., Gonçalves, J., Oliveira, C., Favero-Longo, S. E. et al. 2016. On the dual nature of lichen-induced rock surface weathering in contrasting micro-environments. *Ecology*, 97(10), pp. 2844–2857. DOI: <https://doi.org/10.1002/ecy.1525>.
- Nakata, P. A. 2003. Advances in our understanding of calcium oxalate crystal formation and function in plants. *Plant Science*, 164(6), pp. 901–909. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(03\)00120-1](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(03)00120-1).
- Ručová, D., Đorđević, T., Baláž, M., Weidinger, M. et al. 2022. Investigation of calcium forms in lichens from travertine sites. *Plants*, 11(5). Article number: 620. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants11050620>.

- Rusakov, A., Kuz'mina, M., Frank-Kamenetskaya, O. 2021. Biofilm medium chemistry and calcium oxalate morphogenesis. *Molecules*, 26(16). Article number: 5030. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules26165030>.
- Sarret, G., Manceau, A., Cuny, D., Van Haluwyn, C. et al. 1998. Mechanisms of lichen resistance to metallic pollution. *Environmental Science & Technology*, 32(21), pp. 3325–3330. DOI: <https://doi.org/10.1021/es970718n>.
- Syed, S., Buddolla, V., Lian, B. 2020. Oxalate carbonate pathway – conversion and fixation of soil carbon – a potential scenario for sustainability. *Frontiers in Plant Science*, 11. Article number: 591297. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.591297>.
- Vasileva, T. I., Legostaeva, Y. B. 2023. Calcium oxalates in soils within disturbed landscapes and rock on the territory of Yakutia (Russia), formation conditions in a sharply continental cryoarid climate. *Minerals*, 13(5). Article number: 659. DOI: <https://doi.org/10.3390/min13050659>.
- Voropaev, S. A., Sevastyanov, V. S., Dushenko, N. V., Tkachenko, E. A. et al. 2025. Weathering of volcanic eruption products and rivers contamination in Kamchatka. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 22(1), pp. 33–41. DOI: <https://doi.org/10.36922/ajwep.8113>.
- Wadsten, T., Moberg, R. 1985. Calcium oxalate hydrates on the surface of lichens. *The Lichenologist*, 17(3), pp. 239–245. DOI: <https://doi.org/10.1017/s0024282985000305>.
- Wakefield, J. M., Bhattacharjee, J. 2012. Effect of air pollution on chlorophyll content and lichen morphology in Northeastern Louisiana. *Evansia*, 29(4), pp. 104–114. DOI: <https://doi.org/10.1639/079.029.0404>.
- Wilson, J. M., Jones, D. 1983. Lichen weathering of minerals: Implications for pedogenesis. In *Residual deposits: surface related weathering processes and material*. Ed. Wilson R. C. L. Special Publication of the Geological Society. Blackwell, London.
- Wilson, M. J., Jones, D., Russell, J. D. 1980. Glushinskite, a naturally occurring magnesium oxalate. *Mineralogical Magazine*, 43(331), pp. 837–840. DOI: <https://doi.org/10.1180/minmag.1980.043.331.02>.

Сведения об авторах

Васильева Татьяна Игнатьевна – пр. Ленина, 39, г. Якутск, Россия, 677000;
Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, канд. биол. наук, науч. сотрудник;
e-mail: vasilevatig@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9203-9193>

Tatiana I. Vasileva – 39 Lenina Ave., Yakutsk, Russia, 677000;
Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Cand. Sci. (Biology), Researcher;
e-mail: vasilevatig@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9203-9193>

Легостаева Яна Борисовна – пр. Ленина, 39, г. Якутск, Россия, 677000;
Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, канд. биол. наук, вед. науч. сотрудник;
e-mail: ylego@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1556-9182>

Yana B. Legostaeva – 39 Lenina Ave., Yakutsk, Russia, 677000;
Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher;
e-mail: ylego@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1556-9182>

Прокопьев Илья Андреевич – ул. Профессора Попова, 2, г. Санкт-Петербург, Россия, 197022;
Ботанический институт им. В. Л. Комарова, канд. биол. наук, ст. науч. сотрудник;
e-mail: ilya.a.prokopiev@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8755-7140>

Илья А. Prokopiev – 2 Prof. Popov Str., St. Petersburg, Russia, 197022;
Komarov Botanical Institute RAS, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher;
e-mail: ilya.a.prokopiev@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8755-7140>

Шадринова Олеся Владимировна – пр. Ленина, 39, г. Якутск, Россия, 677000;
Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, мл. науч. сотрудник;
e-mail: ovshadrinova@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4541-412X>

Olesya V. Shadrinova – 39 Lenina Ave., Yakutsk, Russia, 677000;
Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Researcher;
e-mail: ovshadrinova@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4541-412X>