



Выявление геохимических маркеров ореольной проекции глубокозалегающих рудных тел по результатам опробования снежного покрова (на примере Турунтаевского полиметаллического месторождения)

М. П. Тентюков^{1, 2}, И. С. Соболев⁴, Д. В. Камашев³, Г. В. Игнатьев³, Р. И. Шайбеков³,
В. И. Михайлов^{1, 5}, Е. Г. Язиков⁶, Р. Ю. Гаврилов⁶, В. С. Бучельников²

¹ Сыктывкарский государственный университет им. Питирима Сорокина, Сыктывкар, Россия; tentyukov@yandex.ru

² Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия; mpt@iao.ru; victor.buchelnikov@yandex.ru

³ Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия
kamashev@geo.komisc.ru; ignatiev.grigoriy@gmail.com; shaybekov@geo.komisc.ru

⁴ ООО «Гео Сервис», Томск, Россия; geolsob@yandex.ru

⁵ Институт химии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия; system14@rambler.ru

⁶ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия
yazikoveg@tpu.ru; gavrilovry@tpu.ru

Рассматривается возможность использования метода ступенчатого центрифугирования для выявления ореольной проекции глубокозалегающих рудных тел по геохимическим маркерам, в качестве которых выступают элементы-примеси из трех парагенетических групп: сульфобилы, сидеробилы, литобилы. Выявлен эффект концентрирования элементов-примесей, приуроченный к приконтактному с почвой слою кристаллов глубинной изморози, образование которого, в свою очередь, связано с существованием в нижней части снежной толщи особой кристаллообразующей среды. Устойчивость сигнала геохимической аномалии в этой части снежного разреза поддерживается постоянным диффузионным массопереносом легкорастворимых соединений элементов-примесей в составе почвенной влаги. Постулируется, что образование геохимической аномалии в слое глубинной изморози связано с образованием клатратов на поверхности ледяных кристаллов глубинной изморози. Их появление инициируется микропроцессами на границе раздела фаз (газ ↔ жидкость ↔ кристалл). Предложена феноменологическая модель эпитаксиального механизма формирования геохимических аномалий в снежной толще, позволяющая по-новому организовать проведение геохимических поисков глубокозалегающих рудных тел по снежному покрову.

Ключевые слова: геоаэрозоли, глубинные месторождения, геохимические поиски, снежный покров, центрифугирование, эпитаксия

Identification of geochemical markers of the halo projection of deep-seated ore bodies based on the results of sampling the snow cover (using the example of the Turuntaevsky polymetallic deposit)

M. P. Tentyukov^{1, 2}, I. S. Sobolev⁴, D. V. Kamashev³, G. V. Ignatiev³, R. I. Shaibekov³,
V. I. Mikhailov^{1, 5}, E. G. Yazikov⁶, R. Yu. Gavrilov⁶, V. S. Buchelnikov²

¹ Pitirim Sorokin Syktyvkar State University, Syktyvkar, Russia

² V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch RAS, Tomsk, Russia

³ Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar, Russia

⁴ Geo Service, Tomsk, Russia

⁵ Institute of Chemistry FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar, Russia

⁶ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

The paper considers the possibility of using the step centrifugation method to detect the halo projection of deep-lying ore bodies using geochemical markers, which are trace elements from three paragenetic groups: sulfophiles, siderophiles and lithophiles. The paper presents results of comparative studies of the distribution of trace elements in centrifugates of snow water samples obtained at different rotation speeds. The information content of the new method is assessed as applied to geochemical surveys of snow cover, taking into account the microphysical properties of snow. The epitaxial mechanism of amplification of the signal of trace element concentration in snow grains and the related features of the formation of geochemical anomalies in the snow mass are discussed.

Keywords: *geoaerosols, abyssal deposit, geochemical prospecting, snow cover, centrifugation, epitaxy*

Для цитирования: Тентюков М. П., Соболев И. С., Камашев Д. В., Игнатьев Г. В., Шайбеков Р. И., Михайлов В. И., Язиков Е. Г., Гаврилов Р. Ю., Бучельников В. С. Выявление геохимических маркеров ореольной проекции глубокозалегающих рудных тел по результатам опробования снежного покрова (на примере Турунтаевского полиметаллического месторождения) // Вестник геонаук. 2025. 1(361). С. 34–46. DOI: 10.19110/geov.2025.1.4

For citation: Tentyukov M. P., Sobolev I. S., Kamashev D. V., Ignatiev G. V., Shaibekov R. I., Mikhailov V. I., Yazikov E. G., Gavrilov R. Yu., Buchelnikov V. S. Identification of geochemical markers of the halo projection of deep-seated ore bodies based on the results of sampling the snow cover (using the example of the Turuntaevsky polymetallic deposit). Vestnik of Geosciences, 2025, 1(361), pp. 34–46, doi: 10.19110/geov.2025.1.4



Изучение процессов глубинного массопереноса вещества, и в частности миграции химических элементов, — важный аспект при решении фундаментальных вопросов дегазации Земли и прикладных геохимических исследований при поисках глубокозалегающих месторождений полезных ископаемых.

Известна гипотеза о возможности транспортировки металлов и ряда других химических элементов на поверхности микропузырьков природных газов (Etiope G., Martinelli, 2002; Kristiansson K., Malmqvist, 1982; Price, 1986). Согласно данной гипотезе, миграция глубинных газовых флюидов к дневной поверхности осуществляется по системам микротрещин и капилляров в виде потока пузырьков (геогаз) коллоидной размерности со скоростью, существенно превышающей диффузионное перемещение.

В рамках «микропузырькового» механизма геогаз рассматривается как восходящий из глубин Земли поток микропузырьков газа с включениями наночастиц, преимущественно представленными элементами-примесями. Микропузырьки геогаза образуют как химически активные соединения (H_2O , CO_2 , H_2S , NH_3 , H_2 и N_2), так и менее активные — метан, легкие и тяжелые углеводороды, включая благородные (He, Ar) и радиоактивные (Rn) газы (Etiope and Martinelli, 2002). Исследования переносимых геогазом наночастиц (Wei et al., 2013; Lu et al., 2023) показали, что их размер в основном колеблется в интервале от 10 до 300 нм. Последнее дает основание включить в «микропузырьковый» механизм переноса глубинных флюидов некоторые из положений наноминералогии.

Отмечается, что нанодисперсное состояние минерального вещества весьма характерно для верхних частей литосферы и продуктов геологической деятельности микроорганизмов, а также для аэрозольных частиц атмосферы и минеральных взвесей природных вод (Юшкин, 2005). По мнению Н. П. Юшкина, в этих природных системах могут формироваться не только наноагрегаты, но и особые минеральные микро- и нанопарагенезисы. Так, в работе Г. Н. Гамянина с соавторами (2000) приводятся сведения о необычной сфероидальной форме минералов, обнаруженных в золоторудном гидротермальном рудопроявлении. Часто эти сфероиды представлены самородными и интерметаллидными фазами, оксидными и сульфидными соединениями. Их поверхностное и внутреннее строение позволило авторам выдвинуть предположение, что они формируются в микрополостях внутри минеральных индивидов или агрегатов по автоклавному механизму, когда при избыточном давлении газовой фазы формировались ассоциации высокобарических минералов.

Но автоклавный принцип — не единственный механизм образования наноиндивидов и наноагрегатов. М. И. Новгородова с соавторами отводит ведущую роль в формировании сфероидов кавитационным эффектам (2000а, 2003б).

На сегодняшний день представительный микро- и наноразмерный материал, собранный над погребенными рудными месторождениями различных металлов, показывает, что над рудными зонами в почвенном воздухе присутствуют тонкодисперсные твердые фазы, по составу соответствующие рудным минералам (Wei et al., 2013; Sobolev 2018; Sobolev et al., 2022; Lu et al., 2023).

Важной, во многом определяющей научную новизну особенностью отмеченных научных исследований является комплексное изучение компонентного состава в системе «почвенный воздух — снежный покров» с акцентом на глубинный перенос вещества природными газами-носителями, в т. ч. в виде микро- и наноразмерных агломератов минеральных частиц, которые в рамках данной работы вслед за Kristiansson and Malmqvist (1987) мы предлагаем называть «геоаэрозоли». Учитывая парогазовый обмен веществом между снежным покровом и подстилающей почвой, качественную и количественную оценку геоаэрозолей считаем необходимым элементом исследований.

Результаты пока немногочисленных экспериментальных исследований в России и за рубежом свидетельствуют о наличии в зоне контакта «снег — почва» условий формирования проекции ореолов химических элементов над глубокозалегающими рудными объектами и залежами углеводородов (Колотов и др., 1967; Погребняк и др., 1979; Соболев, 2013; Jonasson, Allan, 1973; Kristiansson et al., 1990; Sobolev et al., 2018; Sobolev et al., 2022; Taivalkoski et al., 2019). Однако эти же результаты ставят ряд важных вопросов, без решения которых невозможно адекватно оценить информативность геохимического опробования снежного покрова при глубинном картировании. В частности, особенности телескопирования глубинных проекций рудных тел в снежную толщу и формирования геохимических ореолов в снежном покрове, изменение их контрастности, размеров, зональности, а также определение спектра наиболее устойчивых элементов-индикаторов глубинной эмиссии геоаэрозолей.

В этой связи важной составляющей изучения геоаэрозолей является установление зависимости элементного состава микро- и наноразмерных примесей от их гранулометрических характеристик. Такая информация может быть получена при ступенчатом центрифугировании снеговой воды, проб снежных разрезов. Задачей данного методического приема является разделение исходных твердофазных примесей, аккумулярованных в снежной толще, по их гранулометрическому составу на определенные размерные интервалы с последующим определением химического состава фракций в полученных центрифугатах.

Таким образом, цель данной работы — оценить информативность методики ступенчатого центрифугирования проб снеговой воды для выявления геохимических маркеров миграции геоаэрозолей в аспекте поисков глубокозалегающих минеральных скоплений.

Материалы и методы

Характеристика Турунтаевского рудного проявления свинца и цинка

Территория административно принадлежит Томскому району Томской области и расположена в 70 км на восток от Томска. Pb-Zn-руды Турунтаевского проявления залегают в породах нижнепалеозойского комплекса, слагающего Яйский горст фундамента (Парначев и др., 2010). Рудные тела Центральной зоны проявления локализованы на контакте вулканитов с филлитами в ореоле интенсивно измененных пород, интродуцированных дайками микродиоритов. Контакт между эффузивами и черносланцевой толщей пред-

ставлен мощной зоной дробления. По породам палеозойского фундамента развита кора выветривания, перекрытая чехлом горизонтально залегающих рыхлых отложений мощностью 75–90 м. Гидротермальные изменения проявляются главным образом в карбонизации, окварцевании и альбитизации. Главные рудные минералы — сфалерит, пирит, халькопирит, галенит. Зоны минерализации сопровождаются первичными ореолами рассеяния Zn – Pb – Cu – Sb – Ti – Zr – Bi с Ba в надрудной части гидротермальной колонны. Рудные интервалы характеризуются максимально высокими содержаниями Zn и Sb. Литохимической съемкой вторичные ореолы рассеяния в приповерхностном горизонте не выявлены. Полноценные геолого-разведочные работы прекращены в 1983 году. Небольшой объем буровых работ выполнен в 2022–2023 годах. Летом и зимой 2020 года по одному профилю, совпадающему с линией разведочного бурения, осуществлено опробование почвенного воздуха (активным способом) и снежного покрова. Над зоной минерализации в трех ловушках-коллекторах проведен пассивный сбор твердой фазы. В снеготалой воде и жидкости коллекторов над зоной минерализации определены повышенные концентрации Pb и Zn и ряда других компонентов (Sobolev et al., 2022; Гаврилов и др., 2023).

Надо отметить, что выбранный объект отвечает условиям, необходимым для разработки и тестирования методов глубинного геохимического картирования. Он характеризуется достаточной степенью геологической изученности, необходимой для адекватной интерпретации предполагаемых минералого-геохимических данных. Активной геолого-разведочной и иной хозяйственной деятельности в настоящее время на Турунтаевской площади нет.

Отбор послойных проб снега с помощью бороздового снегоотборника-плотномера конструкции М. П. Тентюкова

Данное устройство предназначено для изучения послойных изменений геохимических параметров снега, связанных с сублимационным метаморфизмом и загрязнением снежного покрова при его нарастании, а также для облегчения послойного отбора проб снега разной плотности при маршрутной снегосъемке (Патент..., 2023). Проверка устройства выполнена в разных ландшафтных условиях и при разной плотности снега (от 0.03 до 0.28 в тайге и до 0.52 г/см³ в тундре). Пример апробации бороздового снегоотборника в сопряжении со светопоглощающим экраном для визуализации стратиграфии снежной толщи показан на рис. 1.

Отбор проб снега

Снегоотбор в границах Турунтаевской площади производили из снежных разрезов перед началом снеготаяния 02.03.2024 (по достижении максимальной высоты снега). Шурф 2 заложен в пределах рудной зоны, а шурф 4 — на безрудном участке, высота снега в точках опробования составила 68 и 90 см соответственно. Размер полученного снежного бруска задавался параметрами снегоотборника-плотномера (5 × 9 × 28 см), что достаточно для получения 200–800 мл снеговой воды в широком интервале плотности снега. Полученные

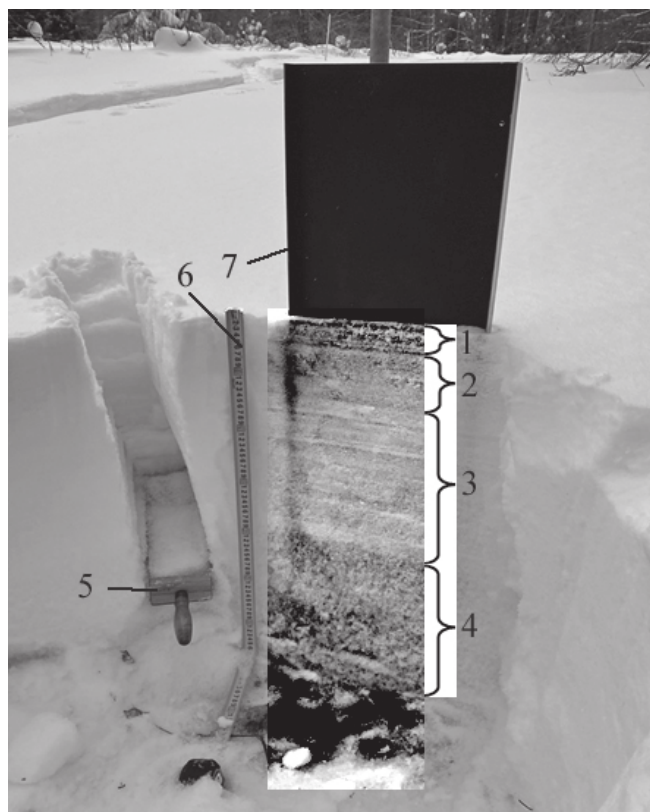


Рис. 1. Апробация бороздового снегоотборника-плотномера на ключевом участке «Ботсад СГУ» в сопряжении со светопоглощающим экраном для визуализации стратиграфии снежной толщи: 1 — свежесыпавший снег, 2 — мелкозернистый снег, 3 — среднезернистый снег, 4 — горизонт глубокой изморози, 5 — бороздовый снегоотборник-плотномер, 6 — рулетка, 7 — светопоглощающий экран

Fig. 1. Testing of a furrow snow sampler-densitometer at the key site of the SSU Botanical Garden in conjunction with a light-absorbing screen for visualizing the stratigraphy of the snow layer: 1 — freshly fallen snow, 2 — fine-grained snow, 3 — medium-grained snow, 4 — deep hoar horizon, 5 — furrow snow sampler-densitometer, 6 — tape measure, 7 — light-absorbing screen

таким образом бруски снега помещались в чистые полиэтиленовые пакеты.

Подготовка проб снега к анализу

Процедура пробоподготовки в день отбора заключалась в их взвешивании на электронных весах и расчете плотности снега (ρ , г/см³). После снег растапливали в закрытых пакетах при комнатной температуре. Перед анализом талая вода фильтровалась для удаления крупных взвешенных частиц через обеззоленные бумажные фильтры — «синюю ленту». Фильтры предварительно десятикратно отмывались деионизированной водой. В снеговой воде значения водородного показателя определяли потенциометрическим, а удельную электропроводность (ηS , мкСм/см) — кондуктометрическими методами.

Получение центрифугатов снеговой воды

С целью проведения исследований по установлению зависимости элементного состава примесей от их гранулометрических характеристик для проб глубокой изморози, взятых в нижней части шурфов, была



проведена процедура ступенчатого центрифугирования снеговой воды. Его задачей являлось разделение исходных твердофазных примесей геоаэрозолей по их гранулометрическому составу на определенные nano-интервалы.

Для этого из оттаявших проб снега отбирали аликвоту снеговой воды объемом 10 см³, которую затем последовательно подвергали ступенчатому центрифугированию при скорости вращения 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500 об/мин. Продолжительность каждого цикла центрифугирования составляла 60 минут. В конце цикла-ступени весь верхний слой, за исключением 1 см³ в придонной области пробирки, сливался в новую пробирку. Отобранный таким образом объем верхнего слоя подвергался дальнейшему центрифугированию, а полученный центрифугат, представляющий собой остаточную жидкость с осадком, передавался на химический анализ. Надо заметить, что после центрифугирования при 3500 об/мин верхний слой (с обозначением 3500>) также был передан на химический анализ.

Химический анализ центрифугатов

Определение концентрации элементов-примесей в центрифугатах проводили с помощью масс-спектрального метода с индуктивно связанной плазмой с использованием анализатора Agilent 7700x (Agilent Technologies США). Анализы проводились в ЦКП «Геонаука» ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН. Сравнительную оценку распределения элементов-примесей в центрифугатах проводили по трем группам, геохимически близким элементам-примесям: литофилам, сульффилам, сидерофилам. Результаты представлены в таблицах 1–4.

Гранулометрический анализ центрифугатов

Центрифугаты для проведения гранулометрического анализа получали способом, аналогичным для химического анализа. Полученные таким образом центрифугаты были исследованы методом динамического рассеяния света на приборе Malvern ZetaSizer Nano ZS (He/Ne-лазер, 4 мВт, 633 нм) при 25 °С в кювете DTS1070 для определения размеров содержащихся в них частиц твердой фазы (гидродинамический диаметр геоаэрозолей). Измерения проводились в ЦКП «Химия» Института химии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН.

Непосредственно перед измерением образцы были обработаны в ультразвуковой ванне в течение 5 минут для равномерного распределения дисперсной фазы в объеме. По каждому измерению объемного распределения частиц по размерам оптимальное время накопления корреляционной функции определялось программным обеспечением прибора автоматически. Соотношение размеров частиц показано в виде гистограмм распределения (рис. 2), имеющих ряд максимумов. Последнее обусловлено тем, что аэрозольное вещество, как правило, представляет собой сложную полидисперсную смесь. Объемное содержание фракций наночастиц в образцах рассчитано интегрально по соотношению (%) площади фигур, описывающих данные распределения частиц по размерам в линейных координатах.

Результаты и обсуждение

В начале данного раздела необходимо сделать некоторые пояснения. Принимается, что наночастицы (геоаэрозоли), поступающие в составе глубинных флюидов, могут влиять на особенности протекания

Таблица 1. Химический состав центрифугатов снеговой воды из шурфа 2, мкг/л (проба 2-9)

Table 1. Chemical composition of snow water centrifugates from pit 2, mkg/l (sample 2-9)

Элементы Elements	1	2	3	4	5	6	7	8
Литофилы / Lithophiles								
Rb	0.22	0.3	0.25	0.29	0.34	0.37	0.36	0.37
Sr	6.5	6.7	6.6	6.7	6.6	6.6	6.6	6.8
Ba	7.5	7.4	7.2	7.4	7.4	10	11	11
Ti	0.23	0.13	0.12	0.08	0.1	0	0	0
V	0.32	0.3	0.31	0.36	0.34	0.35	0.39	0.35
Сидерофилы / Siderophiles								
Cr	0.17	0.16	0.22	0.26	0.25	0.28	0.31	0.31
Mn	10	10	10	11	10	11	11	11
Co	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.09
Ni	0.52	0.93	0.81	0.67	0.77	0.78	0.77	0.82
Сульфифилы / Sulfophiles								
Cu	0.21	0.86	0.37	0.46	1.1	2.2	1.6	1.5
Zn	2.8	4.3	3.3	3.5	4.7	6.1	5	5.2
Sb	0.48	0.5	0.49	0.5	0.49	0.48	0.48	0.5
Pb	0.43	0.52	0.42	0.36	0.29	0.22	0.2	0.19

Примечание: колонки 1–7 характеризуют химический состав центрифугатов, полученных при скорости вращения центрифуги 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500 об/мин соответственно, а колонка 8 отражает химический состав жидкости, остающейся после завершения полного цикла ступенчатого центрифугирования.

Note: Columns 1–7 characterize the chemical composition of the centrifugates obtained at a centrifuge rotation speed of 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500 rpm, respectively, and column 8 reflects the chemical composition of the liquid remaining after completion of a full cycle of step centrifugation.

**Таблица 2.** Химический состав центрифугатов снеговой воды из шурфа 2, мкг/л (проба 2-12)**Table 2.** Chemical composition of snow water centrifugates from pit 2, mkg/l (sample 2-12)

Элементы Elements	1	2	3	4	5	6	7	8
Литофилы / Lithophiles								
Rb	0.15	0.16	0.15	0.17	0.25	0.2	0.22	0.24
Sr	2.1	2.1	2.1	2.1	2.6	2.1	2	2.3
Ba	2.2	2.2	2.3	2.2	14	2.3	2.6	3.1
Ti	0	0	0	0	0	0	0	0
V	0.13	0.12	0.12	0.11	0.09	0.11	0.08	0.11
Сидерофилы / Siderophiles								
Cr	0.2	0.18	0.17	0.15	0.26	0.17	0.14	0.17
Mn	2.3	2.3	2.3	2.3	3	2.5	2.3	2.6
Co	0	0	0	0	0	0	0	0
Ni	2.4	2.4	2.4	2.3	2.7	2.3	2.1	2.5
Сульфобилы / Sulfophiles								
Cu	0.43	0.49	0.43	0.37	0.85	0.95	0.63	0.89
Zn	4.4	4.4	4.2	4	10.2	5.4	5.2	5.9
Sb	0.38	0	0.34	0.37	0.35	0.36	0.33	0.39
Pb	0.3	0.27	0.33	0.29	0.28	0.23	0.24	0.4

Таблица 3. Химический состав центрифугатов снеговой воды из шурфа 4, мкг/л (проба 4-14)**Table 3.** Chemical composition of snow water centrifugates from pit 4, mkg/l (sample 4-14)

Элементы Elements	1	2	3	4	5	6	7	8
Литофилы / Lithophiles								
Rb	0.19	0.23	0.26	0.28	0.26	0.3	0.28	0.29
Sr	6.1	6.1	6.3	6.6	6.2	6.5	6.6	6.5
Ba	6.6	6.4	7.5	7.1	6.4	6.9	7.4	7.2
Ti	0.11	0.27	0.15	0.09	0.08	0	0	0
V	0.26	0.25	0.21	0.24	0.2	0.18	0.2	0.22
Сидерофилы / Siderophiles								
Cr	0.2	0.25	0.21	0.25	0.25	0.26	0.26	0.26
Mn	10	8.1	11	11	10	11	11	11
Co	0	0	0.07	0.07	0.07	0.09	0.08	0.08
Ni	0.38	0.6	0.6	0.53	0.51	0.75	0.78	0.71
Сульфобилы / Sulfophiles								
Cu	0	0.26	0.74	0.32	0.34	0.65	0	0.37
Zn	2.6	3.8	14	5.1	4.8	6.2	5.4	5.2
Sb	0.49	0.48	0.5	0.49	0.49	0.48	0.48	0.5
Pb	0.37	0.41	0.25	0.3	0.25	0.23	0.25	0.21

Таблица 4. Химический состав центрифугатов снеговой воды из шурфа 4, мкг/л (проба 4-16)**Table 4.** Chemical composition of snow water centrifugates from pit 4, mkg/l (sample 4-16)

Элементы Elements	1	2	3	4	5	6	7	8
Литофилы / Lithophiles								
Rb	0.09	0.11	0.12	0.1	0.11	0.12	0.12	0.13
Sr	1.5	1.5	1.6	1.4	1.5	1.5	1.6	1.5
Ba	1.9	1.9	2	1.7	2.2	2.5	3.7	3.5
Ti	0	0	0	0	0	0	0	0
V	0.1	0.11	0.1	0.1	0.1	0.07	0.08	0.09
Сидерофилы / Siderophiles								
Cr	0.29	0.26	0.26	0.22	0.22	0.19	0.21	0.22
Mn	2.7	2.8	2.9	2.6	2.8	2.8	2.9	2.8
Co	0	0	0	0	0	0	0	0
Ni	0.76	1	0.97	0.67	0.82	0.73	0.78	0.77
Сульфобилы / Sulfophiles								
Cu	0.05	0.19	0.13	0.12	0.16	0.5	0.24	0.28
Zn	1.7	2.6	2.4	2.1	2.4	2.6	2.7	2.7
Sb	0.27	0	0.16	0.06	0.31	0	0	0
Pb	0	0.12	0.1	0.07	0.06	0.09	0.08	0.1

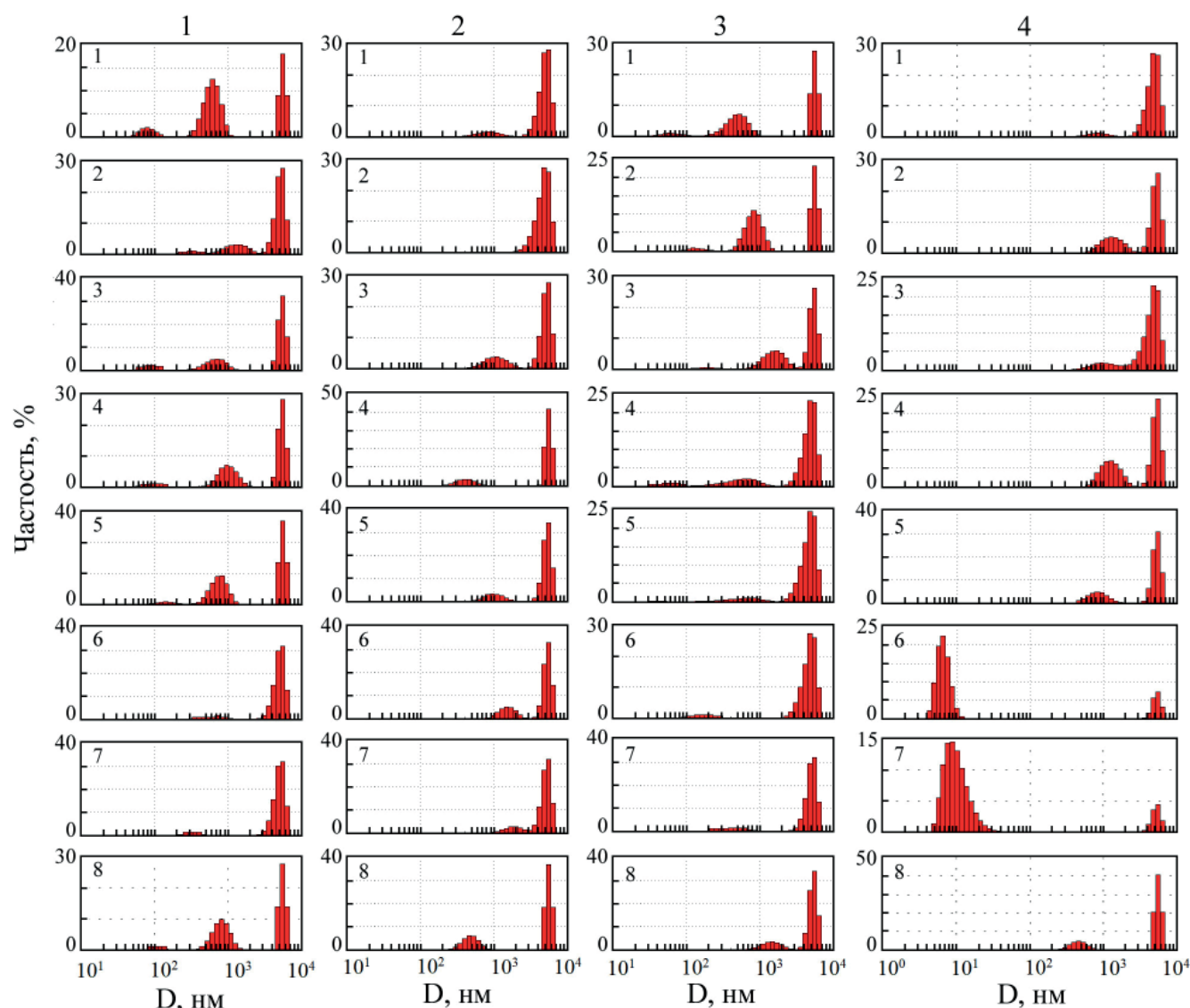


Рис. 2. Изменение соотношения гранулометрических фракций твердого вещества (получены методом динамического рассеяния света — ДРС) в центрифугатах проб снеговой воды в пределах рудной (1 и 2) и безрудной (3 и 4) зон. 1 и 2 — пробы 2-9 и 2-12; 3 и 4 — пробы 4-14 и 4-16; 1-7 — центрифугаты, полученные при скорости вращения центрифуги 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500 об/мин, 8 — остаточная жидкость после цикла центрифугирования

Fig. 2. Change in the ratio of granulometric fractions of solid matter (obtained by the dynamic light scattering — DLS method) in centrifugates of snow water samples within the ore (1 and 2) and barren (3 and 4) zones. Additional designations: 1 and 2 — samples 2-9 and 2-12; 3 and 4 — samples 4-14 and 4-16; 1-7 — centrifugates obtained at a centrifuge rotation speed of 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500 rpm, 8 — residual liquid after the centrifugation cycle

химических реакций с участием субохлажденной капиллярной влаги в снежной толще. Поскольку состав и реакционная способность геоаэрозолей могут сильно отличаться от осевших аэрозольных частиц, присутствие геоаэрозолей в снежной толще открывает новые аспекты в изучении условий формирования ореольной проекции глубокозалегающих рудных тел по результатам опробования снежного покрова.

Вероятно, важную роль также играют наноструктуры внутри более крупных частиц, которые часто содержат наноразмерные элементы, такие как агломераты минеральных зерен, наночастицы в полимерных структурах. Эти сложные морфологические особенности, вероятно, воздействуют на ряд свойств геоаэрозолей в снежной толще. Например, наноструктуры, по всей вероятности, влияют на процесс криогенного концентрирования элементов-примесей посредством капиллярной конденсации поровой влаги в снежной тол-

ще. Кроме этого, наноразмерные водные пленки на гранях ледяных кристаллов снежных зерен, а также наноразмерные активные центры на поверхностях геоаэрозолей в снежной толще могут служить средой для гетерогенной химии.

Надо заметить, что для наночастиц размер и связанное с этим параметром действие поверхностных сил имеет существенное значение. Отмечается, что размерные факторы заметно влияют на конституционные особенности и свойства наноминералов (Юшкин, 2005). В рамках современных представлений к ним относят элементарные минеральные структуры — наноиндивиды — с размерной границей 10–100 нм. По Н. П. Юшкину (2005), эти наноиндивиды сложены ограниченным числом структурообразующих частиц. Переход от минералообразующих сред к наноминеральным структурам характеризуется их фазовой гетерогенизацией. При этом сохраняется структурное



единство системы «дисперсная фаза – дисперсная среда», обусловленная ее агрегативной электростатической устойчивостью (Юшкин, 2005). Агрегация в данном случае происходит без их слияния, и при этом возможно появление нанокластеров и наноблоков, состоящих из нанокристаллов. Предполагается, что размеры таких нанообразований могут фиксироваться в более широком нанодиапазоне, чем 10–100 нм.

Распределение минеральных частиц по размерам в центрифугатах снеговой воды

Частотные графики распределения частиц по размерам, построенные для рудной и безрудной зон, приведены на рис. 2. Сравнительный анализ распределения частиц по размерам показывают, что, как правило, оно отражает смешение двух-трех совокупностей (фракций) частиц и характеризуется большой дисперсностью. Значения мод и процентное соотношение фракций приведены в табл. 5. Если принять, что размерные моды отражают различия в источниках частиц, то только частицы, попавшие в интервал 7–200 нм, могут быть связаны с геоаэрозолями. Более крупные (200–2000 нм) можно отнести к ультрадисперсным минеральным частицам и их агрегатам, а самые крупные — к минеральным индивидам и их блокам (2000–7500 нм). Хотя надо отметить, что эти крайние значения немного «не дотягивают» до нижней границы, проходящей в интервале 10–100 мкм, предложенном А. Г. Булахом (1989) для нижней границы минерального мира.

Особенности распределения частиц и соотношений фракций в центрифугатах в рудной зоне

При сравнении значений D_{cp} частиц в каждом из семи центрифугатов (табл. 5), установлено, что при относительно равных величинах D_{cp} (3093 для верхней пробы и 3021 для нижней) в остаточном растворе (>3500) после центрифугирования размер частиц в верхней пробе почти в два раза меньше, чем в нижней (1280 против 2844 нм соответственно). Сопоставление соотношений фракций показало, что в нижней пробе практически во всех центрифугатах значительно преобладает доля крупных частиц, тогда как для верхней пробы появление средних и мелких частиц существенно снижает долю крупных частиц, хотя какой-то зависимости от скорости центрифугирования не наблюдается.

Особенности распределения частиц и соотношений фракций в центрифугатах в безрудной зоне

Сопоставляя значения D_{cp} частиц в каждом из семи центрифугатов (табл. 5), можно заметить, что размер частиц в верхней пробе почти в два раза меньше, чем в нижней (1027 и 2252 нм соответственно). Различия наблюдаются также при сравнении соотношений фракций: доля крупной фракции в нижней пробе ниже, чем в верхней. Она становится еще заметнее, если сравнивать центрифугаты верхней и нижней проб, полученных при одной скорости вращения. Так, с увеличением скорости центрифуги после режима 2000 об/мин

Таблица 5. Количественные параметры соотношений гранулометрических фракций в центрифугатах проб снеговой воды

Table 5. Quantitative parameters of the ratios of granulometric fractions in centrifugates of snow water samples

Центрифугаты, об/мин Centrifugates, rpm	Dcp, нм	Отметка значения моды/ соотношение фракции (нм/%) Mode value mark/ fraction ratio (nm/%)			Dcp, нм	Отметка значения моды/ соотношение фракции (нм/%) Mode value mark/ fraction ratio (nm/%)		
		Мода 1 Mode 1	Мода 2 Mode 2	Мода 3 Mode 3		Мода 1 Mode 1	Мода 2 Mode 2	Мода 3 Mode 3
	Рудная зона / Ore zone							
	Разрез 2, проба 2-9 Section 2, sample 2-9				Разрез 2, проба 2-12 Section 2, sample 2-12			
500	1181	5590/36	618/56	81/8	1154	4961/90	872/10	–
1000	1247	4789/88	1053/12	–	2378	4760/99	–	171/1
1500	1059	5430/71	699/26	89/2	1953	5162/77	1116/23	–
2000	1200	5439/63	1027/35	85/2	2017	5579/83	414/17	–
2500	1053	5590/54	763/43	145/3	4892	5308/84	1024/16	–
3000	1600	5063/95	506/4	115/1	3452	5590/92	489/8	–
3500	1623	5035/98	343/2	–	4065	5167/86	1953/14	–
>3500	3093	5590/56	833/43	112/1	3021	5590/74	486/26	–
	Безрудная зона / Ore-free zone							
	Разрез 4, проба 4-14 Section 4, sample 4-14				Разрез 4, проба 4-16 Section 4, sample 4-16			
500	879	5590/55	501/40	66/5	2788	5590/32	677/68	–
1000	1006	5590/46	845/50	136/4	2233	5220/68	1382/32	–
1500	933	5330/63	1606/34	199/3	2168	4656/86	1108/14	–
2000	612	4829/81	604/16	49/3	2003	5296/59	1290/41	–
2500	996	4725/90	643/9	42/1	1618	5336/74	852/26	–
3000	1114	4779/98	246/1	119/1	1812	5328/17	–	7/82
3500	1649	5097/94	499/6	–	3148	5283/11	–	10/89
>3500	3063	5333/82	1479/17	166/1	3039	5590/81	458/19	–



доля крупных частиц в нижней пробе уменьшается в кратном размере. Для рудной зоны такой контрастности не выявлено (табл. 5).

Анализ динамики соотношений элементов-примесей в цикле центрифугирования: рудная зона

На рис. 3 показана изменчивость соотношений элементов-примесей в цикле центрифугирования, относящихся к трем группам: сидерофилам, сульфософилам и литофилам. Общее, что можно отметить в изменчивости соотношений элементов-примесей на каждом этапе центрифугирования, это то, что после 2000 об/мин в центрифугатах увеличивается содержание большинства проанализированных элементов. Сопоставление рис. 3 с данными из табл. 5 дает основание считать, что выявленный эффект связан с тем, что большинство элементов входит в состав средней и мелкой фракций.

На этом фоне несколько выделяется динамика содержания Ti в пробе 2-9. Для данного элемента наблюдается устойчивый тренд снижения концентрации в центрифугатах от 500 до 2500 об/мин, после чего он перестает фиксироваться в осадках, полученных при больших скоростях вращения центрифуги. Сопоставление динамики концентрации Ti в цикле центрифугирования

(рис. 3) с данными табл. 5 показывает, что в интервале скоростей вращения центрифуги 500–2500 об/мин доля крупных частиц с титаном в центрифугатах заметно снижается, при том что содержание Rd и V растет с уменьшением фракций.

Для элементов-сульфофилов характерен похожий тренд: до 2000 об/мин отмечается относительное снижение содержания в центрифугатах, затем резкое увеличение сигнала в центрифугате, полученном при 2500 об/мин. При этом во всех центрифугатах содержание Zn одинаково высокое. Если учесть, что в автомобильных выхлопах наряду со свинцом устойчиво фиксируется цинк (Геохимия..., 1990), то, возможно, усиление сигнала данного терморморфного элемента-индикатора рудной залежи связано с упомянутым обстоятельством.

Анализ динамики соотношений элементов-примесей в цикле центрифугирования: безрудная зона

На рис. 4 показана изменчивость соотношений элементов-примесей в цикле центрифугирования. Сопреженный анализ изменчивости соотношений элементов-примесей, относящихся к трем группам (сидерофилы, сульфософилы, литофилы), показал, что

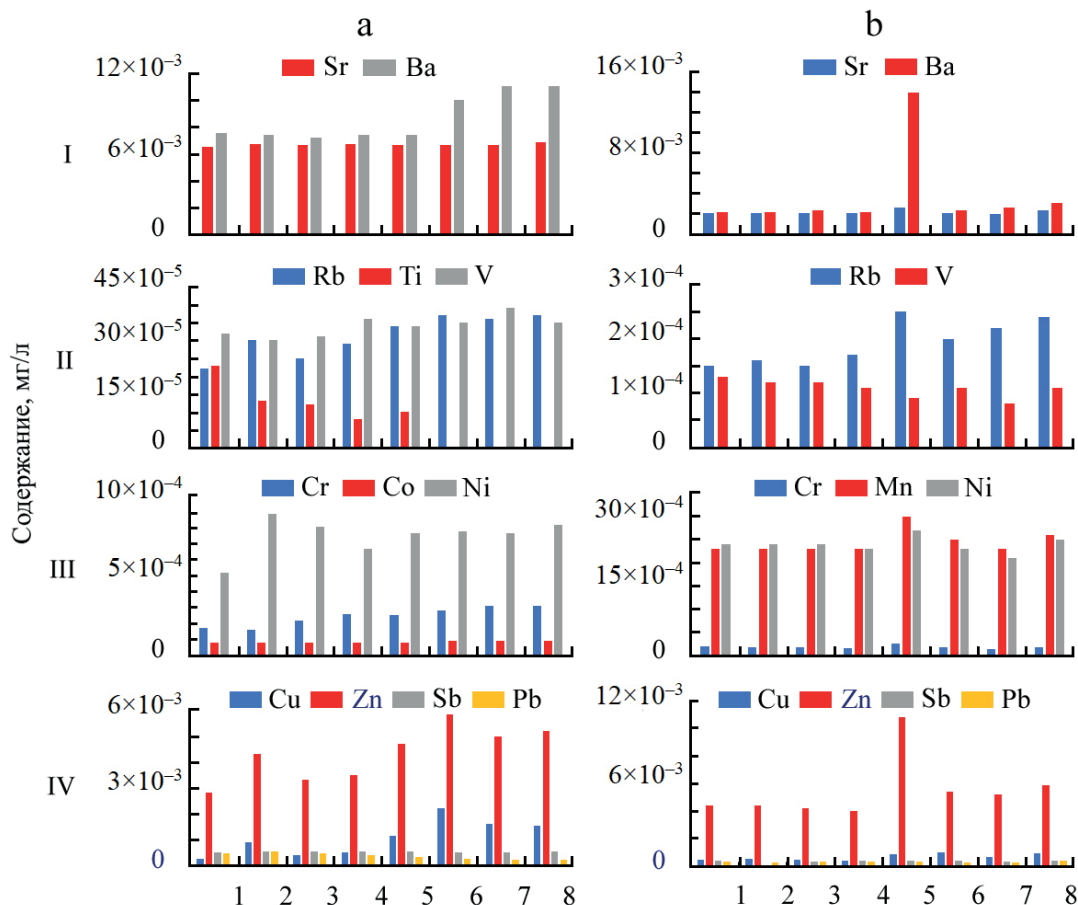


Рис. 3. Соотношение содержаний элементов-литофилов (I и II), элементов-сидерофилов (III) и элементов-сульфофилов (IV) в снеговой воде в рудной зоне. а и б — пробы 2-9 и 2-12, взятые на уровнях 23–28 и 8–13 см от почвенной поверхности соответственно; 1–7 — центрифугаты, полученные при разной скорости вращения центрифуги: 1 — 500, 2 — 1000, 3 — 1500, 4 — 2000, 5 — 2500, 6 — 3000, 7 — 3500 об/мин; 8 — остаточная жидкость после цикла центрифугирования

Fig. 3. Ratio of contents of lithophile elements (I and II), siderophile elements (III), sulfophile elements (IV) in snow water in the ore zone. а and б — samples 2-9 and 2-12 taken at levels of 23–28 and 8–13 cm from the soil surface, respectively; 1–7 — centrifugates obtained at different centrifuge rotation speeds, where: 1 — 500, 2 — 1000, 3 — 1500, 4 — 2000, 5 — 2500, 6 — 3000, 7 — 3500 rpm; 8 — residual liquid after the centrifugation cycle

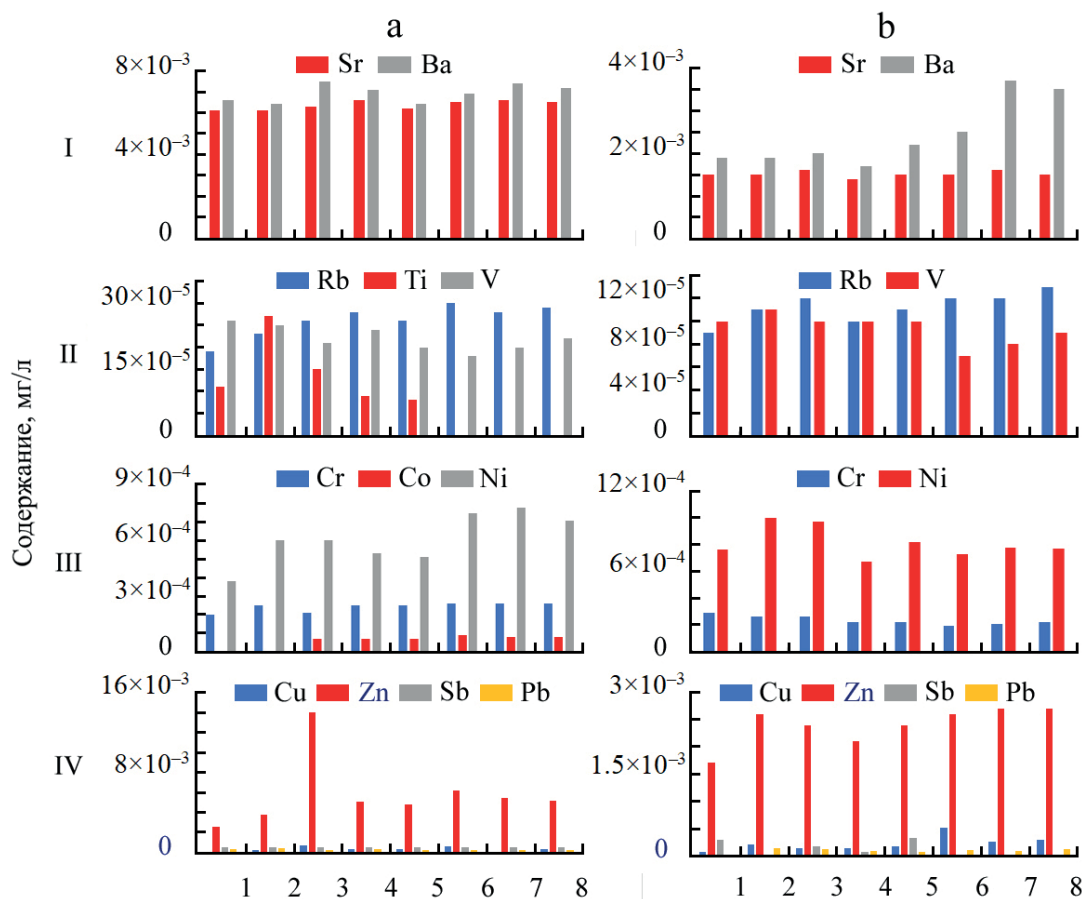


Рис. 4. Соотношение содержаний элементов-литофилов (I и II), элементов-сидерофилов (III) и элементов-сульфофилов (IV) в снеговой воде в безрудной зоне. а и б — пробы 4-14 и 4-16, взятые на уровнях 31–36 и 11–16 см от почвенной поверхности соответственно; 1–7 — центрифугаты, полученные при разной скорости вращения центрифуги: 1 — 500, 2 — 1000, 3 — 1500, 4 — 2000, 5 — 2500, 6 — 3000, 7 — 3500 об/мин; 8 — остаточная жидкость после цикла центрифугирования

Fig. 4. Ratio of lithophile elements (I and II), siderophile elements (III), and sulfophile elements (IV) in snow water in the ore-free zone. a and b — samples 4-14 and 4-16 taken at levels of 31–36 and 11–16 cm from the soil surface, respectively; 1–7 — centrifugates obtained at different centrifuge rotation speeds, where: 1 — 500, 2 — 1000, 3 — 1500, 4 — 2000, 5 — 2500, 6 — 3000, 7 — 3500 rpm; 8 — residual liquid after the centrifugation cycle

содержание Ba, Ni, Rb, Cu в центрифугатах проб 4-14 и 4-16 увеличивается с ростом вращения скорости центрифуги, при этом граница изменения содержания отмечается в центрифугатах начиная с отметки 2500 об/мин. И эти изменения, как и первом случае, связаны с увеличением в центрифугатах доли средней и мелкой фракций (табл. 5). При этом элементы-примеси, входящие в состав крупных фракций (например, Ti в пробе 4-14 и Sb в пробе 4-16), перестают фиксироваться в центрифугатах, полученных при больших скоростях вращения центрифуги.

Обращает на себя внимание динамика содержания Zn. Как и в пробах, взятых в пределах рудной зоны, высокие содержания данного элемента устойчиво фиксируются во всех центрифугатах со значительным превышением относительно других элементов-сульфофилов. Причина та же, что и в первом случае — усиление сигнала вызвано загрязнением снега автомобильными выхлопами.

Однако в целом можно сказать, что метод ступенчатого центрифугирования может рассматриваться как вспомогательный прием при сравнительной характеристике распределения элементов-примесей в снеговой воде при изучении химического состава снежного покрова, формирующегося в пределах рудного поля. Но при этом необходимо принять во внимание воз-

можность затухания полезного сигнала рудной аномалии наложением другого сигнала, связанного с атмосферным загрязнением снега. В связи с этим возникает проблема: как отличить полезный сигнал рудной аномалии от флуктуаций природного геохимического фона? При том что на эти флуктуации может оказывать влияние зимнее аэрозольное поле, формирование которого связано не только с дальним переносом влажностенных воздушных масс, но и с локальными переносом оловянной пыли (Евсеева и др., 2020). В рамках данной работы указанная проблема решается нормированием значений концентраций индикаторной группы элементов-примесей с использованием алюминия — тероморфного элемента литосферы (рис. 5).

Механизм концентрирования элементов-примесей кристаллами глубинной изморози

Следует заметить, что снежные разрезы закладывались в пределах рудной и безрудной зон. В каждом разрезе опробованию подвергался приконтактный с почвой снежный слой, в котором отбирались по две пробы: первая — в его верхней части, а вторая — в нижней. Сам слой опробования¹ отличается от вышележа-

¹ Обоснование выбора данного слоя приведено в работе (Тентюков и др., 2022)

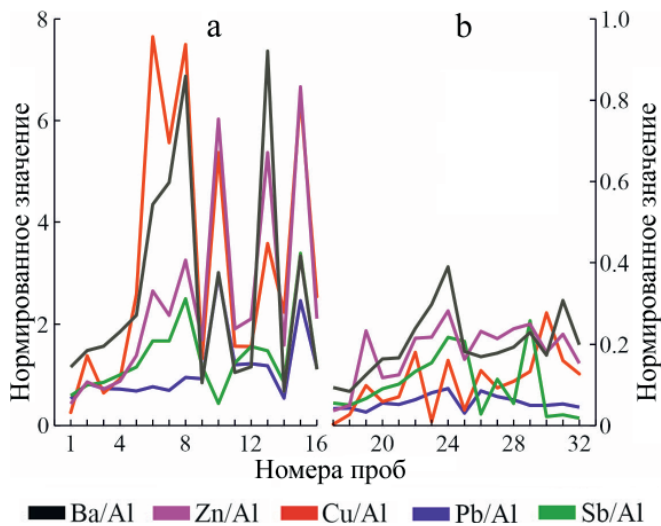


Рис. 5. Сравнение сигнала накопления рудных элементов в центрифугатах проб глубинной изморози, взятых в пределах рудной (а) и безрудной (б) зон на Турунтаевской площади

Fig. 5. Comparison of the signal of accumulation of ore elements in centrifugates of deep hoar samples taken within the ore (a) and ore-free (b) zones in the Turuntaevskaya area

щих наличием крупных кристаллов глубинной изморози (рис. 6).

Формирование кристаллов глубиной изморози в приконтактном с почвой снежном слое связано с существованием особой кристаллообразующей среды, для которой характерно наличие определенных параметров, обеспечивающих генерирование условий для зарождения данных кристаллов. Дальнейший рост кристаллов происходит в результате неоднократной перекристаллизации, поддерживаемой постоянным диффузионным массопереносом почвенной влаги. Процесс сопровождается относительным увеличением содержания легкорастворимых соединений элементов-примесей за счет их диффузионного переноса в составе паров почвенной влаги в приконтактный с почвой слой снега.

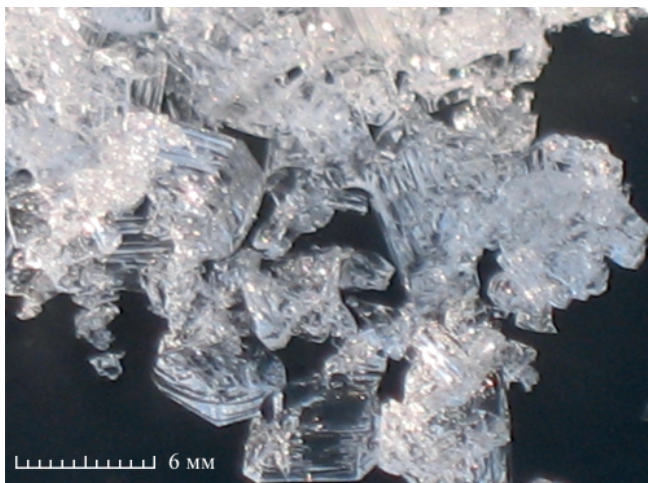


Рис. 6. Ледяные пирамидальные кристаллы глубинной изморози со штриховкой Фореля на гранях (фото М. П. Тентюкова)

Fig. 6. Ice pyramidal crystals of deep hoar frost with Forel's shading on the edges (photo by M. P. Tentyukov)

Но как при этом закрепляются элементы-примеси в ледяной матрице снежной толщи, когда в ней непрерывно протекают процессы сублимации и поры снега как ледяной осадочной породы всегда насыщены поровой влагой? При этом возможность проникновения элементов-примесей в кристаллическую структуру ледяной матрицы при фазовых переходах воды в процессе массообмена между ледяной матрицей снега, водяным паром и конденсированной (капиллярной) жидкостью полностью исключается.

Тогда как же формируются геохимические аномалии в снежной толще? Их появление связано с микрофизическими свойствами снега, которыми обладают эпитаксиальные пленки на поверхности ледяных кристаллов снежных зерен. Появление такой пленки инициируется микропроцессами на границе раздела фаз (газ $\leftrightarrow$ жидкость $\leftrightarrow$ кристалл), что усиливает сигнал концентрирования элементов-примесей в снежных зернах. Появление данного сигнала обусловлено наличием эпитаксиальной пленки, механизм формирования которой на поверхности ледяных зерен вызван следующим.

Известно, что в соответствии с законом Рауля присутствие растворенного вещества будет снижать точку замерзания воды пропорционально молярной концентрации растворенного вещества. Охлаждение разбавленного раствора при температуре ниже 0 °C вызовет кристаллизацию льда и фазовое разделение раствора. Последнее инициирует начало и развитие процесса криохимического фракционирования раствора. При дальнейшем снижении температуры количество объемного льда увеличивается, а вместе с ним растет и концентрация растворенного вещества. Процесс фазового разделения идет до тех пор, пока не будет достигнута эвтектическая концентрация и температура. В данной точке растворенное вещество и остальной растворитель кристаллизуются и выпадают в осадок в виде взаимопроникающих областей растворенного вещества и льда, т. е. образуют *клатратное соединение* (Глинка, 1987). В связи с этим надо заметить, что при формировании геохимической аномалии в снежной толще в этом взаимодействии важным является то, что в криогенном новообразовании определяющую роль играет не реакционная способность компонентов, а пространственное соответствие областей (комплементарность) окристаллизованного растворенного вещества и чистого объемного льда ледяной матрице. Предполагается, что клатраты на поверхности ледяного кристалла снега могут образовывать клатратный эпитаксиальный слой.

Эпитаксия и формирование геохимических аномалий в снежном покрове

Эпитаксия — это закономерное срастание кристаллов веществ различного состава, связанное с близостью строения их кристаллических структур (Геологический словарь, 1978). Термин «эпитаксия» был введен в 1928 году Л. Руае (L. Royer) для обозначения ориентированного нарастания одного вещества на кристаллической поверхности другого (Палатник, Папилов, 1964; Stress and Strain in Epitaxy..., 2001). В современной литературе эпитаксию часто классифицируют исходя из кристаллографических параметров подложки и пленки, при этом последнюю называют

эпитаксиальной. Если материал и кристаллическая структура подложки и пленки идентичны, процесс называют автоэпитаксиальным или гомоэпитаксиальным.

Автоэпитаксия является также частным случаем параллельного срастания кристаллов. При автоэпитаксиальном срастании на взрослом кристалле зарождаются и растут кристаллы нового поколения, но того же самого минерала, что и подложка. Примером могут быть сростки кристаллов поверхностного инея при образовании пирамидальных (рис. 7, а) и игольчатых (рис. 7, б) форм.

Если же химический состав подложки отличается от состава эпитаксиальной пленки, то они обусловлены гетероэпитаксиальным процессом. Но и в этом случае структуры решеток пленки и подложки должны быть сходными для обеспечения роста монокристаллического слоя на поверхности подложки (Палатник, Папилов, 1971). Можно предполагать, что в обоих случаях и появление, и рост эпитаксиальной пленки будет обеспечиваться клатратами.

Заметим, что эпитаксия относится к такому типу осаждения вещества, когда новые кристаллические слои формируются с определенной ориентацией по отношению к кристаллической подложке (ледяной матрице). Во время этого процесса на границе растущего слоя возможна имплантация примесей с низкой растворимостью. Поскольку образование клатратов происходит при криогенной дегидратации субохлажденного раствора, то эпитаксиальная клатратная пленка представляет собой двухфазную систему, состоящую из тонкой смеси кристаллов солей и льда. При этом оптическая плотность чистого объемного льда и эвтектической смеси из взаимопроникающих областей окристаллизованного растворенного вещества и льда будет разной. На поверхности граней ледяных кристаллов изморози в отраженном свете эти зоны наблюдаются в виде чередования полосок — штриховки Фореля (рис. 7, с).

Закключение

В ходе проведения снегометрической съемки в пределах Турунтаевского рудопоявления по установлению зависимости элементного состава примесей от их гранулометрических характеристик для проб глубинной изморози, взятых в нижней части шурфов, бы-

ла проведена процедура ступенчатого центрифугирования снеговой воды. Изучение изменчивости элементного состава центрифугатов снеговой воды, полученных при разных скоростях вращения центрифуги, выявило определенную зависимость состава элементов-примесей от их гранулометрических характеристик. Анализ соотношения размерных фракций в пробах глубинной изморози, взятых над рудной зоной, показал, что практически во всех центрифугатах сильно преобладает доля крупных частиц. В то же время для безрудной зоны в центрифугатах после режима 2000 об/мин доля крупных частиц относительно центрифугатов, полученных при меньших скоростях вращения, уменьшается в кратном размере. В целом можно считать, что ступенчатое центрифугирование снеговой воды в сопряжении с методами динамического рассеяния света и МС-ИСП может рассматриваться как дополнительный методический прием, позволяющий повысить информативность результатов геохимического пробования снежного покрова при поисках глубокозалегающих рудных тел.

Исследования механизма концентрирования элементов-примесей кристаллами глубинной изморози показали, что особенности формирования данных кристаллов в приконтактном с почвой снежном слое связано с существованием особой кристаллообразующей среды, для которой характерно наличие определенных параметров, обеспечивающих генерирование условий для зарождения таких кристаллов. Дальнейший рост кристаллов глубинной изморози происходит в результате неоднократной перекристаллизации ледяных кристаллов, поддерживаемой постоянным диффузионным массопереносом почвенной влаги. При этом усиление сигнала геохимической аномалии, формирующейся в нижней части снежной толщи, обусловлено относительным ростом легкорастворимых соединений элементов-примесей за счет их диффузионного переноса в составе паров почвенной влаги в приконтактный с почвой слой снега.

Иначе говоря, особенности концентрирования элементов-индикаторов рудной залежи в приконтактном с почвой в слое глубинной изморози во многом определяются микрофизическими свойствами снега, а усиление геохимической аномалии — активностью фазовых переходов (газ ↔ жидкость ↔ кристалл) при формировании кристаллов глубинной изморози в зоне контакта «снег — почва».

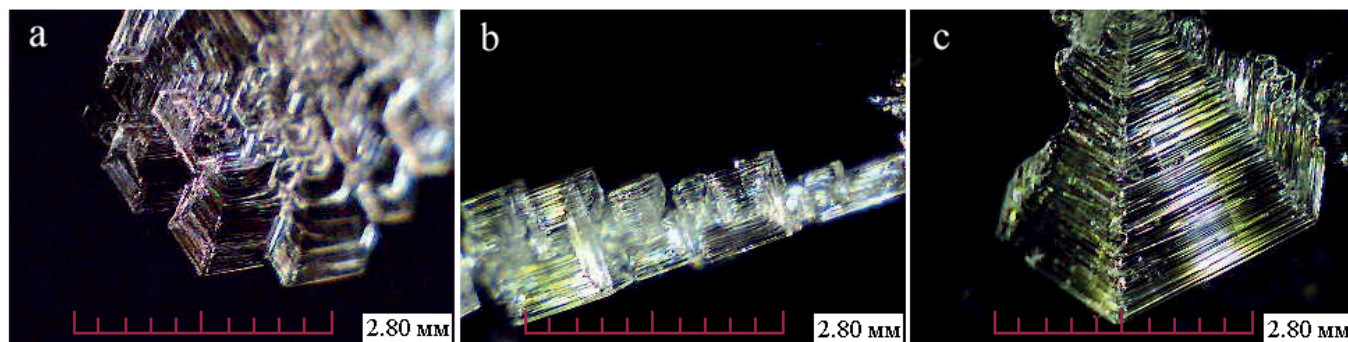


Рис. 7. Морфология пирамидальных (а) и игольчатых (б) агрегатов, образованных сростками кристаллов поверхностного инея. Отдельный пирамидальный кристалл (с) со штриховкой Фореля на гранях (микрофото М. П. Тентюкова)

Fig. 7. Morphology of pyramidal (a) and needle-shaped (b) aggregates formed by intergrowths of surface frost crystals. A separate pyramidal crystal (c) with Forel's shading on the edges (microphoto by M. P. Tentyukov)



Установлено, что устойчивость сигнала геохимической аномалии в слое глубинной изморози обусловлена наличием криогенного новообразования — клатратного соединения, формирующегося на поверхности ледяного кристалла. Данное образование представляет собой эвтектическую смесь в виде взаимопроникающих областей растворенного вещества и льда. Обоснованно постулируется, что клатраты на поверхности ледяного кристалла снега могут образовывать клатратный эпитаксиальный слой. Предложена феноменологическая модель эпитаксиального механизма формирования геохимических аномалий в снежной толще, позволяющая по-новому организовать проведение геохимических поисков глубокозалегающих рудных тел по снежному покрову.

Литература / References

- Булах А. Г. Микромир минералов: границы, объекты, явления // Записки ВМО. 1998. № 5. С. 124–134.
Bulakh A. G. Microworld of minerals: boundaries, objects, phenomena. Proc. RMS. 1998, No. 5, pp. 124–134. (in Russian)
- Гаврилов Р. Ю., Соболев И. С., Соболева Н. П., Ворошилов В. Г., Тентюков М. П. Апробация снежной и атмогеохимической съемок для картирования ореолов рассеяния погребенной полиметаллической минерализации на примере Турунтаевского рудопоявления (Томская область) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 1. С. 126–135.
Gavrilov R. Yu., Sobolev I. S., Soboleva N. P., Voroshilov V. G., Tentyukov M. P. Testing of snow and atmogeochemical surveys for mapping dispersion halos of buried polymetallic mineralization using the example of the Turuntaevskoye ore occurrence (Tomsk region). Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering. 2023, V. 334, No. 1, pp. 126–135. (in Russian)
- Гамянин Г. Н., Жданов Ю. Я., Моисеенко В. Г. Природные и техногенные сфероиды минералов // Тихоокеанская геология. 2000. Т. 19. № 4. С. 52–60. URL: https://repository.geologyscience.ru/bitstream/handle/123456789/23424/Gamyan_00.pdf.
Gamyranin G. N., Zhdanov Yu. Ya., Moiseenko V. G. Natural and technogenic mineral spheroids. Pacific Geology, 2000. V. 19, No. 4, pp. 52–60. URL: https://repository.geologyscience.ru/bitstream/handle/123456789/23424/Gamyan_00.pdf (in Russian).
- Евсеева Н. С., Язиков Е. Г., Квасникова З. Н., Батманова А. С., Бучельников В. С. Современный эоловый морфолито-генез: изученность, региональные проявления // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 11. С. 96–107.
Evseeva N. S., Yazikov E. G., Kvasnikova Z. N., Bat'manova A. S., Buchel'nikov V. S. Modern aeolian morpholithogenesis: state of study, regional manifestations. Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering, 2020, V. 331, No. 11, pp. 96–107. (in Russian)
- Колотов Б. А., Киселева Е. А., Рубейкин В. З. К вопросу о вторичном рассеянии рудных месторождений // Геохимия. 1965. № 7. С. 878–880.
Kolotov B. A., Kiseleva E. A., Rubeykin V. Z. Secondary dispersion of ore deposits. Geochemistry, 1965, No. 7, pp. 878–880. (in Russian)
- Новгородова М. И., Андреев С. Н., Самохин А. А., Гамянин Г. Н. Кавитационные эффекты в образовании минеральных микросферул в гидротермальных растворах // Доклады академии наук. 2003б. Т. 389(5). С. 669–671.
Novgorodova M. I., Andreev S. N., Samokhin A. A., Gamyranin G. N. Cavitation effects in the formation of mineral microspherules in hydrothermal solutions. Doklady Earth Sciences, 2003b, V. 389(5), pp. 669–671. (in Russian)
- Новгородова М. И., Гамянин Г. Н., Жданов Ю. Я., Агаханов А. А., Дикая Т. В. Микросферулы алюмосиликатных стёкол в золотых рудах // Геохимия. 2003а. № 1. С. 83–93.
Novgorodova M. I., Gamyranin G. N., Zhdanov Yu. Ya., Agakhanov A. A., Dikaya T. V. Microspherules of aluminosilicate glasses in gold ores. Geochemistry, 2003a, No. 1, pp. 83–93. (in Russian)
- Патент на полезную модель № 220628. Российская Федерация, МПК G01N 1/04 (2006.01). Устройство для отбора проб снега: № 2023116507: заявл. 23.06.2023: опубл. 26.09.2023. Бюлл. № 27 / Гаврилов Р. Ю., Соболев И. С., Тентюков М. П., Язиков Е. Г.; заявитель ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». 8 с.
Patent for Utility Model No. 220628 Russian Federation, IPC G01N 1/04 (2006.01). Snow sampling device: No. 2023116507: declared 23.06.2023: published 26.09.2023. Bulletin No. 27. Gavrilov R. Yu., Sobolev I. S., Tentyukov M. P., Yazikov E. G.; applicant National Research Tomsk Polytechnic University, 8 p. (in Russian)
- Палатник Л. С., Папилов И. И. Эпитаксиальные пленки. М.: Наука, 1971. 480 с.
Palatnik L. S., Papirov I. I. Epitaxial films. Moscow: Nauka. 1971, 480 p. (in Russian)
- Палатник Л. С., Папилов И. И. Ориентированная кристаллизация. М.: Металлургия, 1964. 408 с.
Palatnik L. S., Papirov I. I. Oriented crystallization. Moscow: Metallurgy, 1964, 408 p. (in Russian)
- Парначев В. П., Парначев С. В. Геология и полезные ископаемые окрестностей г. Томска. Томск: Томский государственный университет, 2010. 144 с.
Parnachev V. P., Parnachev S. V. Geology and useful minerals of the environs of Tomsk. Tomsk State University, Tomsk, 2010, 144 p. (in Russian)
- Погребняк Ю. Ф., Татьянакина Э. М., Толочко В. В. Ореолы рассеяния золота в снежном покрове на поверхности рудопоявления // Доклады АН СССР. 1979. Т. 245. № 4. С. 953–955.
Pogrebnyak Yu. F., Tatyankina E. M., Tolochko V. V. Gold dispersion halos in snow cover on the surface of an ore occurrence. Doklady Earth Sciences, 1979, V. 245, No. 4, pp. 953–955. (in Russian)
- Соболев И. С. О возможности изучения элементного состава снежного покрова при геохимическом картировании зон и областей внедрения глубинных флюидов (нефтегазопроисходный аспект) // Геология нефти и газа. 2013. № 1. С. 68–77.
Sobolev I. S. The possibility of studying the elemental composition of snow cover during geochemical mapping of zones and areas of deep fluid introduction (oil and gas exploration aspect). Geology of oil and gas, 2013, No. 1, pp. 68–77. (in Russian)
- Тентюков М. П., Игнатьев Г. В., Соболев И. С., Гаврилов Р. Ю. Физические свойства снежного покрова и механизм формирования геохимических барьеров в снежной

- толще // Вестник геонаук. 2022. 5(329). С. 26–37. DOI: 10.19110/geov.2022.5.4.
- Tentyukov M. P., Ignatiev G. V., Sobolev I. S., Gavrilov R. Yu. Physical properties of snow cover and the mechanism of formation of geochemical barriers in the snow layer. *Vestnik of Geosciences*, 2022, 5(329), pp. 26–37. DOI: 10.19110/geov.2022.5.4. (in Russian)
- Юшкин Н. П. Ультра- и микродисперсное состояние минерального вещества и проблемы наноминералогии // Наноминералогия. Ультра- и микродисперсное состояние минерального вещества. СПб., 2005. С. 10–61.
- Yushkin N. P. Ultra- and microdispersed state of mineral matter and problems of nanomineralogy. *Nanomineralogy. Ultra- and microdispersed state of mineral matter*. St. Petersburg, 2005, pp. 10–61. (in Russian)
- Etiopie G., Martinelli G. Migration of carrier and trace gases in the geosphere: an overview. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2002. № 12. P. 185–204
- Jonasson I. R., Allan R. J. Snow: a sampling medium in hydrogeochemical prospecting in temperature and permafrost regions. In Jones, M. J. (Ed.), *Geochemical Exploration 1972*. London, Institution of Mining and Metallurgy. 1973. P. 161–176.
- Kristiansson K., Malmqvist L. Evidence for nondiffusive transport of ^{222}Rn in the ground and new physical model for the transport. *Geophysics*. 1982. V. 47 (10). P. 1444–1452.
- Kristiansson K., Malmqvist L. Trace elements in the geogas and their relation to bedrock composition. *Geoexploration*. 1987. V. 24, P. 517–534.
- Kristiansson K., Malmqvist L., Persson W. Geogas prospecting: a new tool in the search for concealed mineralizations. *Endeavour, New Series*. 1990. V. 14 (1), P. 28–35.
- Lu M., Cao J., Hu G., Wang Z., Ma S. Widespread nearly or nanoscale natural amorphous particles in critical zones from ore deposits. *Ore Geology Reviews*. 2023. Vol. 157. 105454.
- Nanoparticles and the Environment* // Ed. J.F. Banfield, A Navrotsky // *Rev. Miner. A geo chem*. 2001. V. 44.
- Price L. C. A critical overview and proposed working model of surface geochemical exploration. In: Davidson, M. J. (Ed.), *Unconventional Methods in Exploration for Petroleum and Natural Gas*. Southern Methodist University Press, Dallas, TX. 1986. P. 254–304.
- Sobolev I. S., Bredikhin N. P., Bratec T., Falk A. Yu., Tolkachev O. S., Rikhvanov L. P., Tishin P. A. Chemical diagenesis in near-surface zone above oil fields in geochemical exploration. *Applied Geochemistry*. 2018. V. 95. P. 33–44.
- Sobolev I. S., Gavrilov R. Yu., Isupova A. A., Khvashevskaya A. A., Tolkachev O. S., Baranovskaya N. V., Soboleva N. P. Geochemical studies of snow over mineral accumulations under conditions of their overlap by sedimentary rocks of the platform cover. *Journal of Geochemical Explorations*. 2022. V. 234. 106940.
- Stress and Strain in Epitaxy: Theoretical Concepts, Measurements and Applications* / Edited by M. Hanbücken, J.-P. Deville. Elsevier Science, 2001. 326 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-50865-2.X5000-4>.
- Taivalkoski A., Sarala P., Lukkari S., Sutherland D. Snow in mineral exploration — examples and practices in glaciated terrain. *Journal of Geochemical Explorations*. 2019. V. 200 (5). P. 1–12.
- Wei X., Cao J., Holub R. F., Hopke P. K., Zhao S. TEM study of geogas-transported nanoparticles from the Fankou lead-zinc deposit, Guangdong Province, South China. *Journal of Geochemical Exploration*. 2013. V. 128, P. 124–135.

Поступила в редакцию / Received 09.08.2024