



Физические свойства снежного покрова и механизм формирования геохимических барьеров в снежной толще

М. П. Тентюков^{1, 2}, Г. В. Игнатъев³, И. С. Соболев⁴, Р. Ю. Гаврилов⁵

¹Сыктывкарский госуниверситет имени Питирима Сорокина, Сыктывкар; tentukov@yandex.ru

²Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, Томск

³Институт геологии им. Н. П. Юшкина ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар; ignatiev.grigoriy@gmail.com

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

⁵Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск; gavrilovry@tpu.ru

Приведены результаты сравнительных исследований вертикальной изменчивости химического состава снежных слоев, хронологически привязанных к периодам выпадения стратиграфически значимых снегопадов. Показаны особенности концентрирования элементов-примесей на геохимических барьерах в снежной толще. Обсуждается механизм их формирования в сезонном снежном покрове.

Ключевые слова: снежный покров, геохимические барьеры, глубинная изморозь, кристаллообразование, элементы-примеси.

Physical properties of snow cover and the mechanism of formation of geochemical barriers in snow mass

M. P. Tentyukov^{1, 2}, G. V. Ignatjev³, I. S. Sobolev⁴, R. Yu. Gavrilov⁵

¹Pitirim Sorokin Syktyvkar State University, Syktyvkar

²V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of SB RAS, Tomsk

³Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar

⁴LLC «Geo Service», Tomsk

⁵National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk

The results of vertical variability comparative studies of the chemical snow layers composition, chronologically linked to the stratigraphically significant snowfall periods, have been presented. The features of the impurity elements concentration on geochemical barriers in the snow mass have been shown. The formation mechanism in the seasonal snow cover has been discussed.

Keywords: snow cover, geochemical barriers, deep frost, crystal formation, impurity elements.

Введение

Свойства капиллярной влаги, влияющие на геохимическую активность снежного покрова. Сезонный снежный покров — это уникальная осадочная ледяная пористая порода, в которой вода находится одновременно во всех своих фазовых состояниях (твердом, жидком, газообразном) [27]. При этом лед образует стенки пор, обеспечивая прочностную структуру снежной толщи. Из-за постоянно протекающих процессов сублимации поры снега, в отличие от других пористых веществ, всегда насыщены водяным паром [24]. Его конденсация на ледяных стенках пор приводит к образованию субохлажденной пленочной капиллярной влаги, которая при больших размерах пор «выстилает» их поверхность, а в узких образует капиллярную жидкость.

Возможность образования субохлажденной пленочной жидкости на поверхности ледяных кристаллов теоретически показана Б. П. Вейнбергом [7], а экспериментально — В. И. Квиливидзе с соавторами [19]. В связи с этим следует заметить, что наличие жидкой фазы воды в снежном покрове при отрицательных температурах не является чем-то экстраординарным.

Эксперименты с замерзанием воды в капиллярах с диаметром < 10 мкм показали, что вода в них оставалась жидкой до температуры –10 °С. При этом свойства капиллярной жидкости оставались обычными [28]. Иными словами, если при замерзании с переходом температуры через 0 °С термодинамические параметры криогенной системы разрываются с выделением скрытой теплоты — фазовый переход первого рода [3, 34], то в случае с субохлажденной влагой таких разрывов нет. Эффект снижения температуры в этом случае проявляется только в уменьшении скорости реакций, изменении вязкости и диффузии.

Считается, что миграция влаги в промерзающих пористых телах осуществляется путем действия трех механизмов: диффузия пара, перемещение незамерзающих пленок воды по поверхности частиц, течение незамерзающих прослоек влаги между льдом и твердой поверхностью [9]. Незамерзание пленок объясняется влиянием поверхностных сил, изменяющих структуру граничных слоев воды. В отличие от обычных водных пленок, растекающихся на поверхности твердого тела, незамерзающие прослойки влаги представляют собой граничную фазу льда, структура которого под

Для цитирования: Тентюков М. П., Игнатъев 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.

For citation: Tentyukov M. P., Ignatjev G. V., Sobolev I. S., Gavrilov R. Yu. Physical properties of snow cover and the mechanism of formation of geochemical barriers in snow mass. Vestnik of Geosciences, 2022, 5(329), pp. 26–37, doi: 10.19110/geov.2022.5.4.



действием соседней поверхности так сильно изменена, что возникают условия для перехода из кристаллического в жидкое аморфное (квазижидкое) состояние [16]. Известно, что такая квазижидкая пленка влаги обладает растворяющими свойствами [31], что определенным образом может влиять на особенности послойного распределения элементов-примесей в снежной толще.

Сезонный снежный покров как объект геохимических исследований. А. И. Воейков в 1871 г. опубликовал работу, в которой впервые обратил внимание научного сообщества на снежный покров, играющий важную роль в природных процессах [10]. Можно считать, что со времени появления этой пионерной работы сформировались основные направления исследований снежного покрова, традиционно развивающиеся и сегодня. Их тематика связана с изучением роли снежного покрова в физико-географическом процессе; получением информации о физико-механических свойствах снега, процессах его формирования и таяния; составлением методик борьбы со снежными заносами и лавинами.

Между тем сезонный снежный покров является уникальным природным субстратом, способным хранить информацию об атмосферных выпадениях, накапливая и обеспечивая их почти полную сохранность в течение зимнего периода. Вследствие этого в рамках изучения территориального распределения характеристик снежного покрова сформировалось научное направление, связанное с геохимическими исследованиями снежного покрова. Их начало было обозначено в двух работах, где снежный покров рассматривался как депонирующий субстрат для естественной [8] и техногенной пыли [6]. Дальнейшие геохимические исследования депонирующих свойств снежного покрова были продолжены в работе П. В. Елпатьевского [17] при выявлении техногенного аэрозольного загрязнения ландшафтов. Как геохимический фактор в почвообразовательных процессах, снежный покров был обозначен в работах М. А. Глазовской [12] и И. Н. Степанова [30]. С конца XX века геохимическое изучение снежного покрова стало активно развиваться в рамках экологических исследований для индикации техногенного загрязнения [1, 13], при оценке трансграничного переноса сульфатов [4, 5] и связанного с ним загрязнения поверхностных вод [2]. В настоящее время геохимические исследования сезонного снежного покрова являются неотъемлемой частью мониторинга загрязнения атмосферного воздуха [35] и активно используются при изучении экологического состояния урбанизированных территорий [18, 23].

В качестве самостоятельного объекта геохимического опробования снег впервые был использован при изучении ореолов рассеяния рудных месторождений [21]. В последующем этот метод был успешно развит применительно к нефтегазопроисловым работам [11, 29] и продолжает активно развиваться при поиске рудных месторождений [26, 36, 37].

Между тем во всех рассмотренных публикациях при анализе данных геохимического опробования и выделения аномалий в сезонном снежном покрове авторы опираются на результаты статистической обработки, из которых применительно к нефтегазопроисловым наиболее информативным оказалось построение ги-

стограмм распределения. Но при этом при оценке пространственной неоднородности выявленных аномалий в расчет принимались только факторы, связанные с литохимической и геохимической неоднородностью подстилающей поверхности, в частности масштаб образования и сорбции газов в породах, диффузионная проницаемость пород и их трещиноватость, неравномерность газообразования и рассеивания газового потока в почвах. Физические же свойства снега как фактор, влияющий на особенности миграции и концентрации химических элементов в снежной толще, оставались вне круга научных интересов исследователей.

В связи с этим в данной работе рассматриваются особенности механизма геохимического барьерообразования и его влияние на послойное распределение элементов-примесей в снежной толще.

Метод исследования

Для изучения послойной изменчивости распределения элементов-примесей в снежном покрове был выполнен послойный отбор проб снега (28 февраля 2021 г.). Разрез заложен на снегомерной площадке во внутреннем сквере Института геологии им. Н. П. Юшкина ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (Сыктывкар). Мощность снежного покрова на момент пробоотбора составила 71 см. Пробоотбор осуществляли с помощью специального снегоотборника [25] (рис. 1), в перерыве между снегопадами. За это время на поверхности снега наблюдался небольшой прирост снежной массы за счет осаждения поверхностной изморози (инея). Толщина новообразованного слоя определялась как разность между измерениями высоты снежного покрова в период между снегопадами. Полученная величина этого новообразованного рыхлого слоя к моменту снегоотбора составила немногим более 1 см.

Послойный снегоотборник. На рис. 1, а представлено устройство для послойного отбора снега с регулируемым шагом опробования снежной толщи. Оно включает прямоугольную призму, стенки которой (1) выполнены из химически инертного к атмосферным компонентам материала, депонированного в снежной толще. Пластины-стенки (1) призмы крепятся к ребрам жесткости (2). Отбор проб снега производится с помощью ножа-пластины (3), представляющего собой съемную переднюю стенку призмы. Устройство содержит платформу-консоль (4), устанавливаемую на передние ребра жесткости. Платформа-консоль снабжена зажимами (5), обеспечивающими ее фиксацию на нужной глубине, что позволяет регулировать шаг опробования с учетом стратиграфического строения снежной толщи.

Методика пробоотбора. Перед началом опробования призму снегоотборника вертикально погружают в снежную толщу (рис. 1, б). Затем отрывают снежный шурф так, чтобы лицевая стенка (3) призмы была свободна от снега (рис. 1, в). После её снимают, на передние ребра жесткости (2) устанавливают подвижную платформу-консоль (4) и фиксируют на требуемой толщине снежного брикета. После этого с помощью зажимов (5) закрепляют платформу (рис. 1, д). Для отбора пробы на платформу-консоль (4) кладется передняя пластина призмы (3) и поступательным движением вдвигается в прямоугольный снежный керн, ограни-

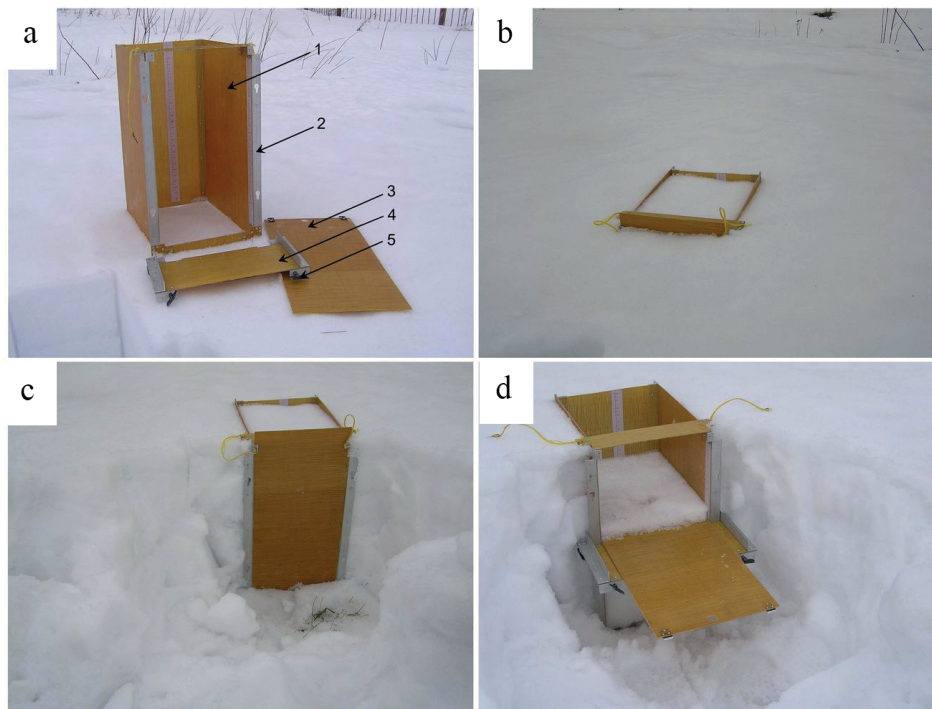


Рис. 1. Устройство для послойного отбора снега и пример его использования (пояснения в тексте)

Fig. 1. A device for layer-by-layer selection of snow and an example of its use (explanations in the text)

ченный с трех сторон стенками призмы. Полученный таким образом снежный брикет помещается в полиэтиленовый пакет пластмассовым совком.

Подготовка проб снега к анализу в день отбора заключалась в их взвешивании на электронных весах и расчете плотности снега (ρ , г/см³). После снег растапливали при комнатной температуре. В снеговой воде значения водородного показателя определяли потенциометрическим, а удельную электропроводность (ηS , мкСм/см) — кондуктометрическим методами.

Для количественного химического анализа использовали предварительно отцентрифугированные с целью удаления взвешенных частиц пробы снеговой воды. Химический анализ 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 послойного распределения элементов-примесей в снежной толще проводили по трем группам, геохимически близким элементам-примесям: литофилам, сульффилам, сидерофилам (табл. 1).

Результаты и обсуждение

Особенности формирования снежного покрова зимой 2020/21 г.

Первый снег выпал 31.10, при этом высота снега составила 4 см. Но 03.11 установилась относительно теплая погода со среднесуточной температурой +3 °С и с перемежающимися осадками в виде дождя и мокрого снега, что обусловило медленный прирост снега: 08.11 высота снежного покрова составила 6 см (рис. 2, А).

В последующие дни, несмотря на снегопады, прирост снежного покрова шел медленно — из-за плюсо-

вой дневной температуры выпавший за ночь снег подтаивал и проседал. Устойчивый прирост снежного покрова возобновился с началом холодной погоды после 20.11. и уже к 27.11 его высота достигла 11 см. В дальнейшем по причине редких и маломощных снегопадов (рис. 2, В) увеличение мощности снежного покрова шло медленно, и к моменту начала периода первого потепления (21–23.12) высота снега составила 29 см. В этот период установилась относительно теплая погода (со среднесуточной температурой около 0 °С) с осадками в виде мокрого снега с дождем, что обусловило, несмотря на обильные снегопады (рис. 2, В), проседание снежной толщи до 28 см. Но после 23.12 сильно подморозило (с 0 до –13 °С). Установившаяся затем зимняя морозная погода и частые снегопады обеспечили быстрое нарастание снежного покрова, и к началу второго периода потепления (25–28.01) его высота составила 54 см. Следует заметить, что при втором потеплении максимальная температура воздуха колебалась в интервале +1/3...–1/3 °С. Осадки выпадали в виде мокрого снега с моросью. В этот период потепления высота снега с 54 см снизилась до 49 см. Но затем тренд снегонакопления принял зимний характер и его нарастание не прерывалось, и ко времени закладки разреза для изучения постседиментационных преобразований аэрозольного вещества, аккумулярованного в снежной толще, мощность снежного покрова составила 71 см.

Межслоевая изменчивость геохимических показателей в снежной толще

Водородный показатель относится к интегральным геохимическим показателям. Колебания водородного показателя (рН) в снеговой воде варьируют в диапазоне от 6.2 до 7.3 (рис. 3).

Обращает внимание послойная изменчивость единичных значений кислотности в средней части снеж-

Таблица 1. Химический состав аэрозольного вещества в снежных слоях, хронологически привязанных к периодам выпадения стратиграфически значимых снегопадов

Table 1. The chemical composition of the settled aerosol substance in snow layers, chronologically tied to the periods of stratigraphically significant snowfalls

Элементы Elements	Содержание элементов-примесей в снежных слоях, мг/л (обозначение слоев даны на рис. 2) Admixture elements in snow layers mg/l (designations of layers are in Fig. 2)											
	m	l	k	i	h	g	f	e	d	c	b	a
Литофилы / Lithophiles												
Li×10 ⁻⁴	2.8±0.8	10±1.3	0.8±0.1	2.2±0.2	0.9±0.1	1.9±0.1	1.1±0.02	0.8±0.02	0.7±0.09	0.5±0.03	0.9±0.2	1.1±0.08
Rb×10 ⁻⁴	11±0.3	3.9±0.05	1.7±0.05	1.8±0.06	1.7±0.07	1.2±0.09	1.8±0.1	0.9±0.04	1.4±0.02	0.5±0.04	1.6±0.04	2.4±0.1
Sr×10 ⁻³	6.9±0.05	1.7±0.05	2.4±0.05	32.0±0.2	1.2±0.02	30.0±0.2	2.4±0.04	1.7±0.04	0.9±0.05	0.8±0.05	3.3±0.1	3.5±0.1
Ba×10 ⁻³	<0.5	4.7±0.05	4.0±0.15	3.8±0.08	2.0±0.07	3.5±0.04	2.0±0.01	7.4±0.01	1.9±0.06	2.5±0.06	5.3±0.10	5.8±0.6
Be×10 ⁻⁴	0.6±0.2	0.3±0.07	0.2±0.05	0.2±0.05	0.5±0.1	0.2±0.05	0.4±0.10	0.1±0.02	0.2±0.05	0.2±0.06	0.1±0.03	0.2±0.05
V×10 ⁻³	5.3±0.2	1.4±0.05	1.1±0.01	3.0±0.10	0.9±0.09	2.1±0.04	0.8±0.04	0.6±0.03	0.9±0.05	0.4±0.02	0.9±0.03	0.9±0.05
P×10 ⁻²	6.7±0.2	5.8±0.1	5.8±0.1	7.9±0.09	5.6±0.09	5.6±0.03	5.4±0.04	5.6±0.04	6.3±0.04	5.8±0.03	5.8±0.3	5.6±0.5
Sc×10 ⁻⁴	6.2±0.2	6.0±0.07	6.0±0.1	6.4±0.09	6.1±0.04	6.3±0.1	6.0±0.1	5.7±0.1	5.9±0.2	5.5±0.1	6.1±0.3	6.3±0.1
Ga×10 ⁻⁴	0.2±0.06	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Ge×10 ⁻⁴	2.9±0.9	3.5±0.2	3.4±0.1	3.6±0.1	3.6±0.2	3.8±0.1	3.5±0.4	3.6±0.3	3.9±0.2	3.8±0.3	3.5±0.4	3.7±0.2
Y×10 ⁻⁴	0.2±0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Ti×10 ⁻⁴	8.5±0.3	3.7±0.3	4.2±0.4	4.0±0.7	3.6±0.8	4.3±0.5	3.7±0.3	3.4±1.0	3.9±0.6	4.1±0.5	3.9±0.2	4.1±0.5
V×10 ⁻⁴	5.7±0.2	2.8±0.1	3.8±0.2	5.2±0.1	6.4±0.2	5.3±0.2	14.0±0.5	10.0±0.2	3.8±0.02	2.8±0.1	6.0±0.1	5.3±0.3
Mo×10 ⁻⁴	1.9±0.6	0.4±0.02	0.3±0.09	0.9±0.08	0.4±0.04	0.8±0.08	0.5±0.08	0.4±0.1	0.2±0.09	0.3±0.07	0.5±0.02	0.5±0.03
Sn×10 ⁻⁴	0.2±0.07	0.2±0.04	<0.1	0.2±0.06	0.2±0.05	<0.1	<0.1	0.2±0.05	0.2±0.06	0.2±0.03	0.2±0.05	0.2±0.02
W×10 ⁻⁴	5.1±0.2	0.4±0.1	0.2±0.02	0.4±0.09	0.4±0.06	0.2±0.02	0.2±0.03	0.3±0.02	0.2±0.03	1.4±0.1	0.6±0.06	0.8±0.1
Сульфиды / Sulphophiles												
Cu×10 ⁻⁴	15±0.5	5.8±0.3	2.2±0.06	5.9±0.09	5.3±0.2	1.8±0.07	12.0±0.6	12±0.4	9.9±0.3	2.0±0.1	7.3±0.1	8.3±0.1
Zn×10 ⁻³	20±0.6	8.4±0.2	17±0.2	6.5±0.3	6.6±0.2	0.9±0.05	7.0±0.07	14±0.08	9.9±0.2	7.5±0.2	6.5±0.3	9.7±0.3
Cd×10 ⁻⁴	0.3±0.09	0.6±0.09	0.3±0.08	0.3±0.06	0.3±0.03	0.3±0.01	0.4±0.07	0.6±0.05	0.6±0.2	0.3±0.05	0.9±0.1	1.0±0.1
Sb×10 ⁻⁴	<0.5	4.0±0.09	2.0±0.09	4.4±0.2	3.7±0.2	3.2±0.1	3.7±0.1	3.3±0.2	3.8±0.08	3.4±0.2	3.9±0.1	3.9±0.1
Pb×10 ⁻⁴	0.3±0.1	0.2±0.05	<0.1	<0.1	0.2±0.05	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Сидерофилы / Syderophiles												
Cr×10 ⁻⁴	15±0.5	9.1±0.3	11±0.2	12±0.3	8.9±0.07	12±0.2	8.4±0.4	11±0.3	11±0.5	11±0.2	13±0.03	12±0.3
Mn×10 ⁻²	14±0.4	2.0±0.05	1.6±0.05	1.2±0.05	0.6±0.05	0.5±0.05	1.1±0.05	0.6±0.05	0.6±0.05	0.3±0.05	0.8±0.05	0.7±0.05
Co×10 ⁻⁴	5.1±0.2	1.0±0.02	0.9±0.03	1.2±0.07	0.6±0.07	0.7±0.07	0.6±0.04	0.5±0.06	0.5±0.03	0.4±0.03	1.0±0.04	1.1±0.04
Ni×10 ⁻⁴	11±0.3	6.3±0.2	6.3±0.5	7.6±0.4	8.1±0.4	6.3±0.2	9.0±0.3	8.6±0.5	8.2±0.4	5.0±0.2	6.7±0.2	6.6±0.2
Pd×10 ⁻⁴	0.4±0.1	0.2±0.1	0.2±0.1	2.0±0.1	<0.1	1.8±0.1	0.2±0.05	<0.1	<0.1	<0.1	0.2±0.06	0.3±0.02

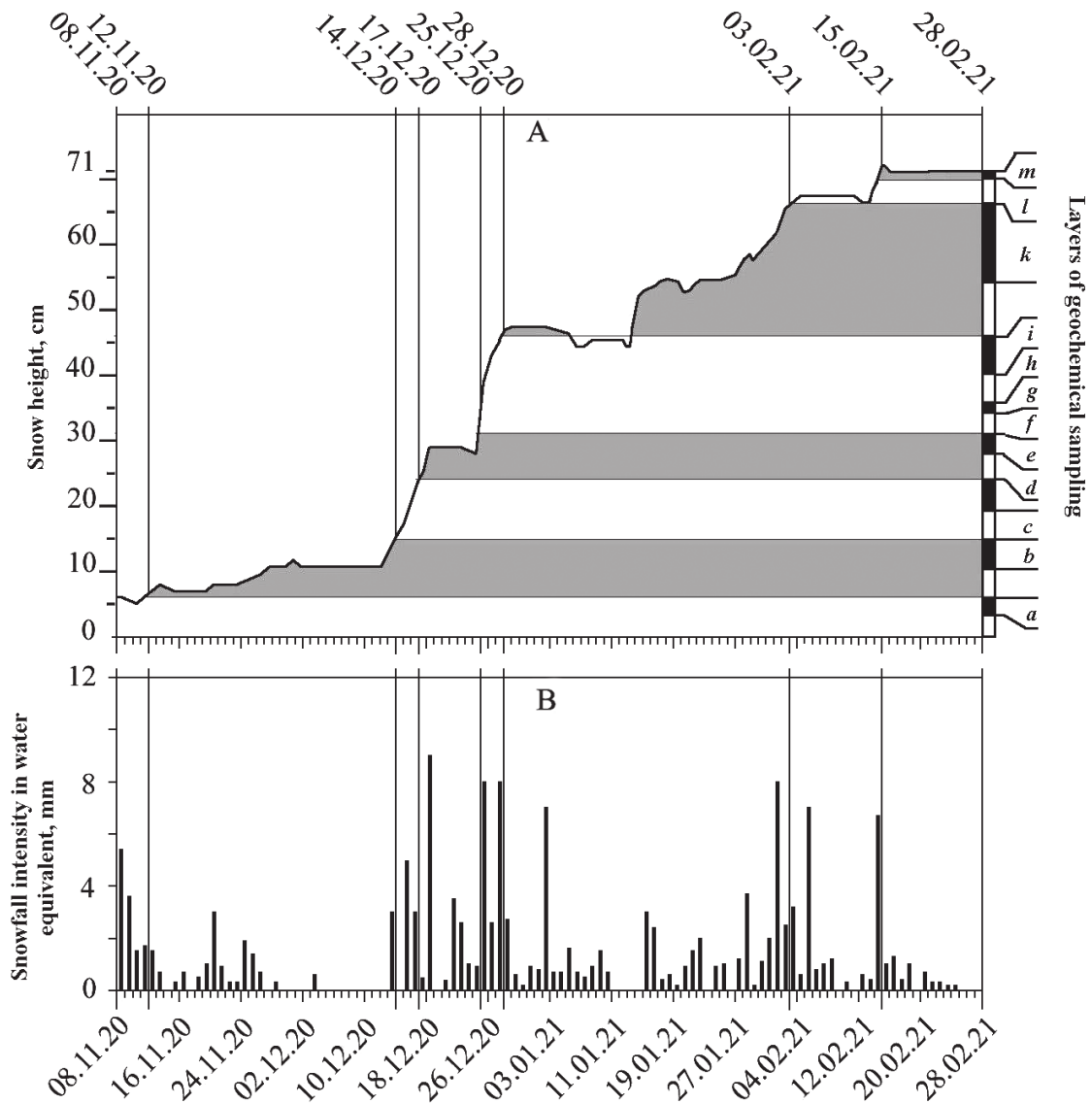


Рис. 2. Временной ряд интенсивности нарастания снежного покрова в сопряжении со слоями геохимического опробования снежной толщи (A), хронологически привязанных к датам выпадения стратиграфически значимых снегопадов (B) (по данным м/с «Сыктывкар»). Доп. обозн.: Временные периоды образования снежных слоев геохимического опробования: а – 08–12.11.20; b – 12.11–14.12.20; c – 14–17.12.20; d, e – 17–25.12.20; f, g, h, i – 25–28.12.20; k – 28.12.20–03.02.21; l – 03–15.02.21; m – 15–28.02.21

Fig. 2. Time series of growth intensity of snow cover in conjunction with layers of geochemical sampling of the snow mass (A), chronologically tied to the dates of stratigraphically significant snowfalls (B) (according to the Syktyvkar m/s). Additional designations: Time periods of formation of snow layers of geochemical sampling: a – 08–12.11.20; b – 12.11–14.12.20; c – 14–17.12.20; d, e – December 17–25, 2020; f, g, h, i – 25–28.12.20; k – 28.12.20–03.02.21; l – 03–15.02.21; m – 15–28.02.21

ной толщи. Разница между значениями pH в слое *f* и слое *g* составляет единицу. Ниже и выше этой зоны по профилю межслойные различия значений pH колеблются в пределах десятых долей с трендом смещения от слабокислых к нейтральным. Следует заметить, что максимальные значения pH наряду со слоем *m* фиксируются также в слоях *g* и *i*, приуроченных к верхнему капиллярному барьеру. Средний и нижний капиллярные барьеры в снежном профиле менее заметны. Следует заметить, что наблюдаемая динамика изменений водородного показателя дает мало информации о геохимических условиях, формирующихся в снежной толще, поскольку pH отражает интегральную характеристику всей совокупности щелочно-кислотных взаимодействий в снежном покрове. Представляется, что анализ электропроводности снеговой воды

может оказаться более информативным в условиях подщелачивания снежной толщи осаждающимся аэрозольным веществом.

Электропроводность снеговой воды измеряли кондуктометрическим методом. Анализ вертикального распределения значений электропроводности снега выявил два пика (рис. 3). Оба они фиксируются в снежных слоях в средней части снежного разреза, прилегающих к капиллярному барьеру. Синхронный ход кривой распределения значений концентрации Na и электропроводности в этой зоне свидетельствует о том, что изменение электропроводности определяется в первую очередь изменением концентрации натрия на геохимических барьерах.

Не исключается также и то, что источником натрия может быть ветровой перенос антигололедных

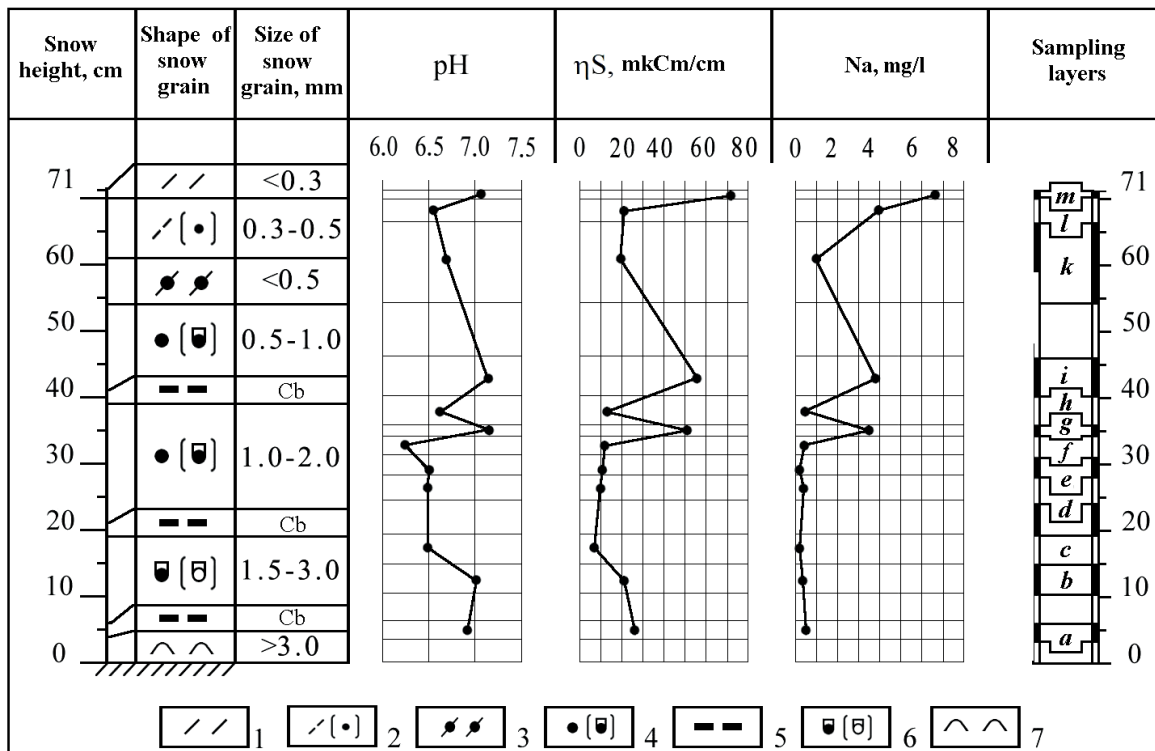


Рис. 3. Послойное распределение интегральных показателей геохимической активности снежного покрова: водородный показатель (pH), электропроводность (ηS , $\mu kCm/cm$). Услов. обозн.: 1 – свежеснеживший снег (иней) (PP); 2 – недавно отложенный снег (DFbk) с округлыми зернами (RGsr); 3 – ветровая упаковка мелкозернистых частиц снега (RGwp); 4 – округлые снежные зерна и округлые частицы с гранями (RGlR/RGxf); 5 – горизонтальный оледенелый слой из агрегатов крупных снежных зерен (IFil), осуществляющий функции капиллярного геохимического барьера (Кб); 6 – округлые частицы с гранями и округляющиеся снежные зерна с гранями (RGxf/FCxr); 7 – глубинная изморозь (DHxr) (классификация форм зерен дана по [33])

Fig. 3. Layer-by-layer integral indicators of the snow cover geochemical activity: hydrogen index (pH), electrical conductivity (ηS , $\mu kCm/cm$). Legend: 1 – new-fallen snow (hoarfrost) (PP); 2 – recently deposited snow (DFbk) with rounded grains (RGsr); 3 – wind packing of fine-grained snow particles (RGwp); 4 – rounded snow grains and rounded particles with edges (RGlR/RGxf); 5 – horizontal glaciated layer of large snow aggregate grains (IFil), acting as a capillary geochemical barrier (Cb); 6 – rounded particles with edges and rounded snow grains with edges (RGxf/FCxr); 7 – deep frost (DHxr) (classification of grain shapes (F) is given according to [33])

препаратов. Возможно, что их осаждение на поверхность снега совместно с аэрозолями увеличивает содержание легкогидролизуемых соединений. Участие данных соединений в реакциях низкотемпературного (криогенного) комплексообразования инициирует увеличение концентрации свободных ионов и усиление электропроводности в зоне геохимических барьеров. Вместе с тем измерение электропроводности в средней части снежной толщи выявило малоизвестный факт – наличие между слоями с высокими значениями электропроводности слой с низкими показателями измеренного параметра. Такое контрастное снижение электропроводности в зоне капиллярного барьера возможно при наличии разнонаправленной миграции аэрозольного вещества в составе поровой капиллярной влаги. Но данное предположение требует дополнительной проверки.

Концентрирование элементов-примесей на геохимических барьерах на поверхности снега и снежной толще

По данным количественного масс-спектрального анализа были построены графики послойного распределения содержаний химических элементов в снежном профиле (рис. 4). Из данного рисунка следует, что

в снежной толще выделяются три зоны накопления элементов-примесей.

Первая зона фиксируется в слое *m* и характеризуется широким спектром элементов-примесей (табл. 1), накапливающихся на поверхностном термодиффузионном геохимическом барьере (рис. 4). Его проявление в зоне контакта «снег – атмосфера» обусловлено зимними особенностями осаждения сухих аэрозолей. Снежный покров в любых условиях, даже при самой низкой температуре, излучает длинноволновую радиацию (собственное тепло), а также имеет высокую способность отражать солнечную радиацию. Последнее способствует сильному выхолаживанию снежного покрова и возникновению инверсии температур («снеговая инверсия» [27]. Кроме того, поверхность снежного покрова не только характеризуется высокой отражательной и излучательной способностью [22], но и оказывает иссушающее влияние на приземный слой воздуха [22]. В условиях наличия градиента температур и влажности снежный покров, вбирая в себя из приземного слоя воздуха избыток влаги, инициирует нисходящую миграцию воздуха. В результате формируется устойчивый массоперенос водяных паров по направлению к снежному покрову. Данное обстоятельство вызывает сток аэрозольного вещества из призем-

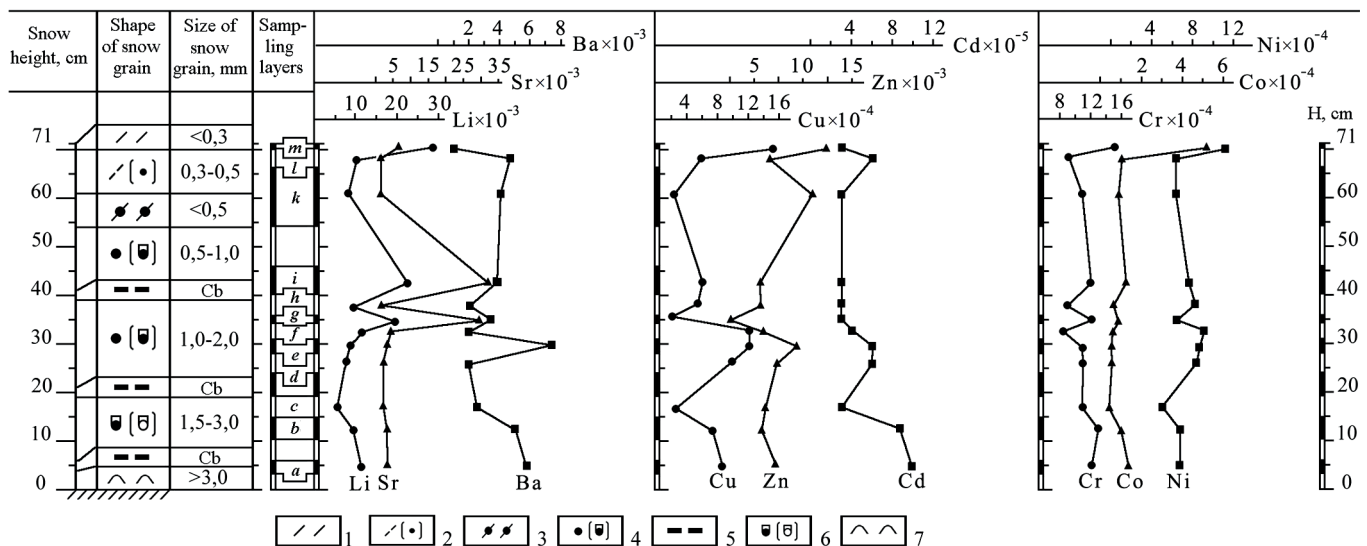


Рис. 4. Накопление элементов-примесей на геохимических барьерах в сезонном снежном покрове (снегомерная площадка во внутреннем сквере Института геологии им. Н. П. Юшкина ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, разрез 27). Услов. обозн.: 1 – свежесвыпавший снег (иней) (PP); 2 – недавно отложенный снег (DFbk) с округлыми зернами (RGsr); 3 – ветровая упаковка мелкозернистых частиц снега (RGwp); 4 – округлые снежные зерна и округлые частицы с гранями (RGlR/RGxf); 5 – горизонтальный оледенелый слой из агрегатов крупных снежных зерен (IFil), осуществляющий функции капиллярного геохимического барьера (Кб); 6 – округлые частицы с гранями и округляющиеся снежные зерна с гранями (RGxf/FCxr); 7 – глубинная изморозь (DHxr) (классификация форм зерен дана по [43])

Fig. 4. Accumulation of impurity elements on geochemical barriers in the seasonal snow cover (snow measuring site was located in the inner park of the Institute of Geology named after N. P. Yushkin, FRC Komi Science Center, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, section 27). Symbols: 1 – freshly fallen snow (hoarfrost) (PP); 2 – recently deposited snow (DFbk) with rounded grains (RGsr); 3 – wind packing of fine-grained snow particles (RGwp); 4 – rounded snow grains and rounded particles with edges (RGlR/RGxf); 5 – horizontal glaciated layer of aggregates of large snow grains (IFil), acting as a capillary geochemical barrier (Cb); 6 – rounded particles with faces and rounded snow grains with faces (RGxf/FCxr); 7 – deep frost (DHxr) (classification of grain shapes is given according to [43])

ной атмосферы. Процесс сопровождается увеличением концентрации элементов-примесей в верхней части снежного разреза (рис. 4).

Вторая зона накопления элементов-примесей совпадает со слоями *e, f, g, h* и по своему положению находится в средней части снежного профиля. В пределах данной зоны выделяется механический капиллярный барьер, который, в свою очередь, сформировался в оледенелом прослое снега, образовавшегося во время оттепелей. В снежной толще его положение индицируется наличием комплексной геохимической аномалии. Заметим, что правильность определения положения аномалии коррелировалась совпадением пиков элементов-примесей, образующих парагенную геохимическую ассоциацию, что отражает реальные снегохимические процессы, обеспечивающие особенности внутриснежной концентрации элементов-примесей на механическом капиллярном геохимическом барьере.

Предполагается, что механизм образования внутриснежных аномалий элементов-примесей связан с образованием клатратов. Известно, что переход воды из жидкого в кристаллическое состояние происходит при строго определенной температуре – при 0 °С. Однако присутствие растворенного вещества понижает точку замерзания воды. Точка замерзания в соответствии с законом Рауля снижается пропорционально молярной концентрации растворенного вещества. Охлаждение разбавленного раствора при температуре ниже 0 °С вызовет кристаллизацию льда и фазовое

разделение. При дальнейшем снижении температуры количество объемного льда увеличивается, а остаточный раствор становится более концентрированным, 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 [14]. Известно, что при его образовании определяющую роль играет не реакционная способность компонентов, а пространственное соответствие областей окристаллизованного растворенного вещества и чистого объемного льда (комплементарность). Предполагается, что их оптическая плотность различна. Поэтому на микрофотографиях эти взаимопроникающие области окристаллизованного растворенного вещества и чистого объемного льда на поверхности граней ледяных кристаллов в отраженном свете образуют чередование полосок, так называемую штриховку Фореля (рис. 5 *a, b*). Такая штриховка чаще всего фиксируется на пирамидальных кристаллах. Это преимущественная форма кристаллов глубинной изморози, и она возникает в условиях ускоренного роста, когда фронт кристаллизации локализуется вдоль ребер или вершин кристаллов (рис. 5 *c, d*).

Заметим, что в гляциологическом словаре (<http://www.slovopedia.com/26/216/1661801.html>) штриховка Фореля описывается как «тонкая прямолинейная ребристость на поверхностях ледяных кристаллов, связанная с выходами базисных плоскостей. Возникает

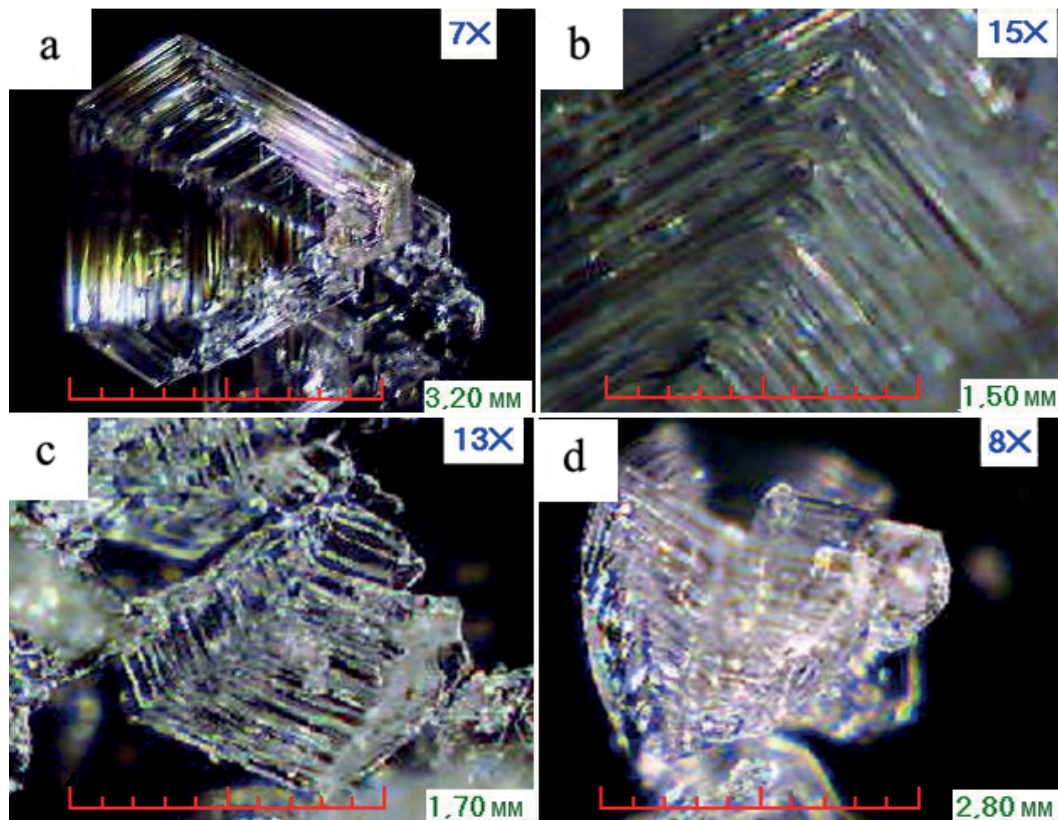


Рис. 5. Штриховка Фореля на кристаллах глубинной изморози в припочвенном слое снега: а, б — «закладка» штриховки Фореля на гранях растущего пирамидального кристалла; с, д — пирамидальные кристаллы глубинной изморози со штриховкой Фореля (микрофотографии М. П. Тентюкова — съемка 11.12.2012 г.)

Fig. 5. Forel hatching on crystals of deep hoarfrost in the subsoil layer of snow: а, б — «bookmark» of Forel hatching on the faces of a growing pyramidal crystal, с, д — pyramidal crystals of deep hoarfrost with Forel hatching. (Microphotographs by M. P. Tentyukov, taken on December 11, 2012)

при возгонке льда или в условиях слабого таяния с медленным испарением талой воды, отражая разницу в скорости таяния и возгонки льда в пределах базисных плоскостей и в промежутках между ними. Ш. Ф. наблюдается на кристаллах льда любого генезиса, однако ярче всего выступает при кристаллизации воды, богатой растворимыми примесями. Впервые зарисована Л. Агассисом в 1847 г.; названа именем Ф. Фореля, снявшего со штриховки отпечаток на воск». Однако в таком контексте невозможно объяснить наличие штриховки у воронкообразных антискелетных форм кристаллов глубинной изморози (см. рис. 5). Такие кристаллы образуются, когда гранные формы роста опережают разрастание вершинных и реберных форм роста. Данная разновидность скелетных кристаллов формируется в условиях, когда вещество в результате влияния внешней среды, в частности резкой разницы скоростей роста по различным направлениям, заполняет не все тело многогранника, а только часть его.

Поэтому мы считаем, что штриховка Фореля отражает не столько разницу в скорости таяния и возгонки льда в пределах базисных плоскостей и в промежутках между ними, сколько процесс образования клатратов при росте ледяных кристаллов глубинной изморози. Процесс сопровождается внутриснежным концентрированием элементов-примесей.

Третья зона накопления элементов-примесей фиксируется в слое *a*, приуроченном к нижней части снежного разреза, и так же, как и во второй зоне, накопление элементов-примесей происходит на капил-

лярном геохимическом барьере. Однако механизм его формирования отличается. Так, известно, что плотность почвы и, следовательно, её объемная теплоемкость в несколько раз больше аналогичных показателей для снега [15]. Это приводит к тому, что в зоне контакта, «снег — почва» температура припочвенного слоя снега ниже, чем в вышележащих снежных слоях. Подобное усиление контрастности температурного градиента в нижней части снежной толщи вызывает приток субохлажденных поровых почвенных растворов, что, в свою очередь, вызывает перекристаллизацию ранее выпавших снежных зерен и формирование кристаллов глубинной изморози. Их дальнейший рост происходит в результате неоднократной перекристаллизации, поддерживаемой постоянным диффузионным массопереносом почвенной влаги.

Следовательно, в нижней части сезонной снежной толщи существует своеобразная кристаллообразующая среда, для которой характерно наличие определенных параметров, обеспечивающих генерирование условий для зарождения и роста кристаллов глубинной изморози. К ним относится изменение термодинамических и физико-химических параметров среды. К наиболее информативным можно отнести показатели кислотности и электропроводимости, а также плотность снежного слоя в приконтактной зоне (рис. 2). А поскольку наибольшая диффузия пара и самые высокие температуры снега фиксируются, как правило, в нижней части снежной толщи [20], то именно в приконтактном слое снега с относительно невысокой плот-



ностью происходит ускоренный рост и перекристаллизация ледяных кристаллов глубинной изморози с образованием клатратов, процесс сопровождается активным накоплением элементов-примесей в этой части снежного профиля (рис. 4).

Следовательно, барьерообразование и относительное увеличение содержания элементов-примесей в нижней части сезонной снежной толщи обеспечиваются существованием в этой переходной зоне особой кристаллообразующей среды. При этом поступление элементов-примесей в эту зону из сезоннопромерзающих почв обеспечивается за счет диффузиофореза почвенной влаги, обусловленной различиями в теплоемкости сезоннопромерзающих почв и снежного покрова [15]. Необходимо отметить, что интенсивность и направление диффузиофореза почвенной влаги в зимний период контролируется физическими свойствами сезонного снежного покрова. Они обеспечивают существование в самой снежной толще и в верхней части снежного разреза не только градиента упругости водяного пара, но и температурного градиента. Синергизм последних двух поддерживает вертикальную миграцию легкорастворимых солей металлов в сезоннопромерзающих почвах, в отличие от сезонных мерзлотных почв [32]*, в течение всей зимы. В итоге в приповерхностной части сезоннопромерзающих почв формируется криогенный солевой ореол из легкорастворимых форм элементов-примесей за счет их диффузионного переноса в составе паров почвенной влаги в приконтактный слой снега. Именно с данным процессом связано элементное обогащение кристаллов глубинной изморози.

Заключение

Особенности накопления элементов-примесей на геохимических барьерах в снежном покрове обусловлены поступлением вещества как сверху, так и снизу. При этом образование поверхностных аномалий связано с осаждением аэрозольного вещества, а нижних аномалий — поступлением растворимых форм элементов-примесей в результате термодиффузиофореза с участием почвенной влаги.

Механизм геохимического барьерообразования контролируется физическими свойствами снежного покрова. Из-за аблимации (возгонки) снежных зерен температура поверхности снега всегда ниже температуры приснежного слоя воздуха. В результате снеговой инверсии температур в приземном слое воздуха по направлению к снежному покрову формируется устойчивый массоперенос водяных паров и осадение аэрозолей. Процесс сопровождается формированием поверхностного термодиффузионного геохимического барьера, который индицируется повышенным содержанием элементов-примесей в этой части снежного профиля. Вместе с тем накопление элементов-примесей в средней части снежного разреза приурочено к механическому капилляр-

ному барьеру, который, в свою очередь, сформировался в оледенелом прослое снега, образовавшемся во время оттепелей. В то же время в нижней части снежной толщи из-за разной теплоемкости снежного покрова и сезоннопромерзающих почв в зоне контакта «снег — почва» возникает устойчивый термодиффузиофорез растворимых форм элементов-примесей в составе паров почвенной влаги, в результате которого формируется криогенный термодиффузионный геохимический барьер, обуславливающий накопление в ледяных кристаллах глубинной изморози легкорастворимых форм элементов-примесей. Их диффузионный перенос в сезоннопромерзающих почвах в составе паров почвенной влаги в приконтактный слой глубинной изморози, в отличие от сезонных мерзлотных почв, обеспечивает устойчивость геохимического барьера в течение всей зимы, что позволяет рекомендовать глубинную изморозь в качестве объекта опробования при геохимических поисках по солевым криогенным ореолам.

Предполагается, что появление внутриснежных геохимических аномалий связано с образованием клатратов, которые в ледяных кристаллах представляют собой осадок в виде взаимопроникающих областей растворенного вещества и льда. При этом оптическая плотность окристаллизованного растворенного вещества и чистого объёмного льда неодинаковы. И на поверхности граней пирамидальных ледяных кристаллов данные области в отражённом свете образуют чередование полосок, так называемую штриховку Фореля. Она чаще всего фиксируется на пирамидальных кристаллах. Такая преимущественная форма кристаллов глубинной изморози, когда фронт кристаллизации локализуется вдоль ребер или вершин кристаллов, свидетельствует о наличии в приконтактном слое снега условий ускоренного роста ледяных кристаллов.

Таким образом, представлен обзор физических свойств сезонного снежного покрова, контролирующих условия геохимического барьерообразования в снежной толще. Особенности формирования глубинной изморози позволяют рекомендовать её в качестве объекта геохимического опробования при проведении зимних геохимических поисков для выявления солевых криогенных ореолов.

Литература

1. Беликова Т. В., Василенко В. Н., Назаров И. М. Характеристика фонового загрязнения сульфатами снежного покрова на территории СССР // Метеорология и гидрология. 1984. № 9. С. 47–55.
2. Бреслав Е. И., Черногаева Г. М., Василенко В. Н., Назаров И. М., Фридман Ш. Д. Роль снежного покрова в загрязнении сульфатами поверхностных вод // Метеорология и гидрология. 1985. № 5. С. 108–111.
3. Буторин Г. Т., Скрипов В. П. Кристаллизация переохлажденной воды // Кристаллография. 1974. Т. 19. № 3. С. 613–618.
4. Василенко В. Н., Назаров И. М., Фридман Ш. Д. Изучение сульфатного загрязнения территории ЕТС // Метеорология и гидрология. 1983. № 9. С. 64–71.
5. Василенко В. Н., Назаров И. М., Фридман Ш. Д. Исследование дальнего переноса сульфатов в Советской Арктике

*В указанной работе отмечается, что для почв, развивающихся в зоне многолетней мерзлоты, отмечается два оптимальных периода активизации вертикальной миграции легкорастворимых солей металлов – осенний периодический и весенний постоянный.



по загрязнению снежного покрова // Метеорология и гидрология. 1985. № 4. С. 114–117.

6. Вашков В. И., Постников П. А., Симонов В. И. Определение загрязнения местности промышленными отходами по исследованию снежного покрова // Гигиена и санитария. 1936. № 9. С. 18–27.

7. Вейнберг Б. П. Лед. Свойства, возникновение и исчезновение льда. М.-Л.: Гос. издательство технико-теорет. лит. 1940. 522 с.

8. Влодавец В. И. Заметки о навеванном минеральном осадке на льдах // Труды Арктического научно-исследовательского института. Вып. 33. Л., 1936. С. 24–32.

9. Вода и водные растворы при температурах ниже 0 °С / Пер. с англ. под ред. Ф. Франкса. Киев: Наукова думка, 1985. Р. 338 с.

10. Воейков А. И. Влияние снеговой поверхности на климат: Избр. сочинения. Л.-М.: Изд-во АН СССР, 1949. Т. 2. 531 с.

11. Вышемирский В. С., Шугуров В. Ф. Газовая съемка по снегу на юге Западной Сибири // Геология и геофизика. 1987. № 6. С. 17–22.

12. Глазовская М. А. Эоловые мелкоземистые накопления на ледниках Терской-Алатау // Тр. Ин-та географии АН СССР. 1952. Вып. 49. С. 18–22.

13. Глазовский Н. Ф. Злобина А. И., Учватов В. П. Химический состав снежного покрова некоторых районов Верхнеокского бассейна // Региональный экологический мониторинг (на примере Верхнеокского бассейна). М.: Наука, 1983, с. 67–86.

14. Глинка Н. Л. Общая химия: Учеб. пособие для вузов. Л.: Химия, 1987. 704 с.

15. Гуртовя Е. Е. Некоторые вопросы температурного режима снежного покрова. Роль снежного покрова в природных процессах. М.: Изд-во АН СССР, 1961. С. 121–131.

16. Дерягин Б. В., Киселева О. А., Соболев В. Д., Чураев Н. В. Течение незамерзающей воды в пористых телах. Вода в дисперсных системах. М.: Химия, 1989. С. 101–116.

17. Елпатьевский П. В. Химический состав снеговых вод и его изменение техногенными факторами // Геохимия зоны гипергенеза и техническая деятельность человека. Владивосток, 1976. С. 45–63.

18. Касимов Н. С., Власов Д. В., Кошелева Н. Е., Никифорова Е. М. Геохимия ландшафтов Восточной Москвы. М.: АПР, 2016. 276 с.

19. Квиливидзе В. И., Киселев В. Ф., Ушакова Л. А. О существовании квазижидкой пленки на поверхности льда // Доклады АН СССР. 1970. Т. 191. № 5. С. 1125–1127.

20. Коломыц Э. Г. Теория эволюции в структурном снеговедении. М.: Геос. 2013. 482 с.

21. Колотов Б. А., Киселева Е. А., Рубейкин В. З. К вопросу о вторичном рассеянии рудных месторождений // Геохимия. 1965. № 7. С. 878–880.

22. Кузьмин П. П. Физические свойства снежного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1957. 179 с.

23. Московченко Д. В., Пожитков Р. Ю., Соромотин А. В. Геохимическая характеристика снежного покрова г. Тобольск // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 5. С. 156–169. DOI: 10.18799/24131830/2021/05/3195.

24. Окуджава А. М. Теплопроводность влажного снега. Снег и талые воды. М.: Изд-во АН СССР, 1956. С. 22–30.

25. Патент № 2411487 Российская Федерация, МПК8 G01N1/04 (2006.01). (2011) Снегоотборник Тентюкова / Тентюков М. П.; заявитель и патентообладатель: Институт

биологии Коми НЦ УрО РАН — № 2009131266/05; заявл. 17.08.2009; опубл. 10.02.2011; Бюл. № 4. 10 с. URL: <https://ib.komisc.ru/files/innov/2411487.pdf>. (дата обращения 19.02.2022).

26. Погребняк Ю. Ф., Татьянкина Э. М., Толочко В. В. Ореолы рассеяния золота в снежном покрове на поверхности рудопроявления // Докл. АН СССР. 1979. Т. 245. № 4. С. 953–955.

27. Рихтер Г. Д. Роль снежного покрова в физико-географическом процессе // Труды Института географии АН СССР. Вып. 40. М.-Л.: Изд-во АН СССР. 1948. 171 с.

28. Савицкий А. Н. Замерзание и плавление воды в стеклянных капиллярах // Коллоидный журнал. 1968. Т. 30. № 1. С. 119–123.

29. Стадник Е. В., Могилевский Г. А., Богданова В. М., Телегина З. П., Юрин Г. А., Тон М. С., Оборин А. А., Лапчинская Л. В., Либерман Г. И., Седых Л. А. Нефтегазопроисковая газобиохимическая съемка по снежному покрову // Известия высших учебных заведений: Геология и разведка. 1978. № 3. С. 81–92.

30. Степанов И. Н. Снежный покров и формирование почв // Почвоведение. 1962. № 3. С. 44–51.

31. Федосеева В. И., Федосеев Н. Ф. Сорбция молибдат-анионов квазижидкой пленкой на поверхности дисперсного льда // Коллоидный журнал. 2010. Т. 72. № 4. С. 574–576.

32. Федосеева В. И. Физико-химические закономерности миграции химических элементов в мерзлых грунтах и снеге. Якутск: Ин-т мерзловедения СО РАН, 2003. 138 с.

33. Фирц Ш., Армстронг Р. Л., Дюран И., Этхеви П., Грин И., МакКланг Д. М., Нишимура К., Сатъявали П. К., Сократов С. А. Международная классификация для сезонно-выпадающего снега (руководство к описанию снежной толщи и снежного покрова) // Материалы гляциологических исследований. 2012. № 2. 80 с.

34. Hobbs P.V. Ice physics. Oxford: University Press. 1974. 495 p.

35. Salo H., Berisha A. K., Mäkinen J. Seasonal comparison of moss bag technique against vertical snow samples for monitoring atmospheric pollution. Journal of Environmental Sciences. 2016. Т. 41. С. 128–137. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2015.04.021> (дата обращения: 18.11.2021).

36. Sobolev I. S., Gavrillov R. Yu., Isupova A. A., Khvashchenskaya 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 Exploration. 2022. V. 234. N 3. 106940. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2021.106940>.

37. Taivalkoski A., Sarala P., Lahaye Y., Lukkari S., Sutherland D. Snow in mineral exploration — Examples and practices in glaciated terrain // Journal of Geochemical Exploration. 2019. V. 200. N 5. P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.01.006>.

References

1. Belikova T. V., Vasilenko V. N., Nazarov I. M. *Harakteristika fonovogo zagryazneniya sul'fatami snezhnogo pokrova na territorii SSSR* (Characteristics of background sulfate pollution of snow cover on the territory of the USSR). Meteorology and hydrology. 1984, No. 9, pp. 47–55.

2. Breslav E. I. Chernogaeva G. M., Vasilenko V. N., Nazarov I. M., Fridman S. D. *Rol' snezhnogo pokrova v zagryaznenii sul'fatami poverhnostnykh vod* (The role of snow cover in sulfate pollution of surface waters). Meteorology and hydrology, 1985, No. 5. pp. 108–111.



3. Butorin G. T., Skripov V. P. *Kristallizaciya pereohlazhdennoj vody* (Crystallization of supercooled water). Soviet Physics. Crystallography, 1974, V. 19, No. 3. pp. 613–618.
4. Vasilenko V. N., Nazarov I. M., Fridman Sh. D. *Izuchenie sul'fatnogo zagryazneniya territorii ETS* (Study of sulfate pollution of the ETS territory). Meteorology and hydrology, 1983, No. 9, pp. 64–71.
5. Vasilenko V. N., Nazarov I. M., Fridman Sh. D. *Issledovanie dal'nego perenosa sul'fatov v Sovetskoj Arktike po zagryazneniyu snezhnogo pokrova* (Investigation of long-range transport of sulfates in the Soviet Arctic by pollution of the snow cover). Meteorology and hydrology, 1985, No. 4, pp. 114–117.
6. Vashkov V. I., Postnikov P. A., Simonov V. I. *Issledovanie dal'nego perenosa sul'fatov v Sovetskoj Arktike po zagryazneniyu snezhnogo pokrova* (Determination of pollution of the area by industrial waste from the study of snow cover). Hygiene and sanitation, 1936, No. 9, pp. 18–27.
7. Weinberg B. P. *Svoystva, vozniknovenie i ischeznovenie l'da.Led* (Properties, appearance and disappearance of ice). Moscow-Leningrad, State publishing house of technical and theoretical literature, 1940, 522 p.
8. Vlodavets V. I. *Zametki o naveyannom mineral'nom osadke na l'dah* (Notes on inspired mineral deposits on ices). Proceedings of the Arctic Research Institute. Issue 33, Leningrad: 1936, pp. 24–32.
9. *Voda i vodnye rastvory pri temperaturah nizhe 0 °C* (Water and aqueous solutions at temperatures below 0 °C). Kyiv: Science thought, 1985, R. 338 p.
10. Voeikov A.I. *Vliyanie snegovoj poverhnosti na klimat* (Influence of the snow surface on the climate: fav. essays. T. 2). Leningrad-Moscow: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1949, 531 p.
11. Vyshemirsky V. S., Shugurov V. F. *Gazovaya s'emka po snegu na yuge Zapadnoj Sibiri* (Gas survey in the snow in the south of Western Siberia). Geology and Geophysics, 1987, No. 6, pp. 17–22.
12. Glazovskaya, M. A. *Eolovye melkozemistye nakopleniya na lednikah Terskej-Alatau* (Eolian fine-earth accumulations on the Terskey-Alatau glaciers), Proceedings of Institute of Geography of the Academy of Sciences of the USSR, 1952, Issue 49, pp. 18–22.
13. Glazovsky N. F. Zlobina A. I., Uchvatov V. P. *Himicheskij sostav snezhnogo pokrova nekotoryh rajonov Verhneokskogo bassejna* (Chemical composition of snow cover in some areas of the Upper Oka basin), Regional environmental monitoring (on the example of the Upper Oka basin). Moscow: Nauka. 1983, pp. 67–86.
14. Glinka N. L. *Obshchaya himiya: uchebnoe posobie dlya vuzov* (General chemistry: textbook. allowance for universities). Leningrad: Chemistry, 1987, 704 p.
15. Gurtovaya E. E. *Nekotorye voprosy temperaturnogo rezhima snezhnogo pokrova. Rol' snezhnogo pokrova v prirodnyh processah* (Some questions of the temperature regime of the snow cover. The role of snow cover in natural processes). Moscow: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1961, pp. 121–131.
16. Deryagin B. V., Kiseleva O. A., Sobolev V. D., Churaev N. V. *Techenie nezamerzayushchej vody v poristyh telah. Voda v dispersnyh sistemah* (The flow of non-freezing water in porous bodies. Water in disperse systems). Moscow: Chemistry, 1989, pp. 101–116.
17. Elpatievskiy P. V. *Himicheskij sostav snegovykh vod i ego izmenenie tekhnogennymi faktorami* (Chemical composition of snow waters and its change by technogenic factors), Geochemistry of the hypergenesis zone and human technical activity. Vladivostok, 1976, pp. 45–63.
18. Kasimov N. S., Vlasov D. V., Kosheleva N. E., Nikiforova E. M. *Geohimiya landshaftov Vostochnoj Moskvy* (Geochemistry of landscapes of Eastern Moscow). Moscow: APR, 2016, 276 p.
19. Kvilividze V. I., Kiselev V. F., Ushakova L. A. *O sushchestvovanii kvazizhidkoj plenki na poverhnosti l'da* (On the existence of a quasi-liquid film on the surface of ice), Reports of the Academy of Sciences of the USSR. 1970, V. 191, No. 5, pp. 1125–1127.
20. Kolomyts E. G. *Teoriya evolyucii v strukturnom snego-vedenii* (The theory of evolution in structural snow science). Moscow: Geos, 2013, 482 p.
21. Kolotov B. A., Kiseleva E. A., Rubeykin V. Z. *K voprosu o vtorichnom rasseyanii rudnykh mestorozhdenij* (On the issue of secondary dispersion of ore deposits), Geochemistry. 1965, No. 7, pp. 878–880.
22. Kuzmin P. P. *Fizicheskie svoystva snezhnogo pokrova* (Physical properties of snow cover). Leningrad: Gidrometeoizdat, 1957, 179 p.
23. Moskovchenko D. V., Pozhitkov R. Yu., Soromotin A. V. *Geohimicheskaya harakteristika snezhnogo pokrova g. Tobol'sk* (Geochemical characteristics of the snow cover in Tobolsk town). Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources. 2021, V. 332, No. 5, pp. 156–169. DOI 10.18799/24131830/2021/05/3195.
24. Okudzhava A. M. *Teploprovodnost' vlazhnogo snega. Sneg i talye vody* (Thermal conductivity of wet snow. Snow and melt water). Moscow: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1956, pp. 22–30.
25. Patent 2411487 Russian Federation, MPK8 G01N1/04 (2006.01). (2011) *Snegootbornik Tentyukova* (Snow blower Tentyukov) / Tentyukov M.P.; applicant and patent holder Institute of Biology, Komi Scientific Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences — No. 2009131266/05; dec. 08.17.2009; publ. 02.10.2011; Bull. No.4. 10 p. URL: <https://ib.komisc.ru/files/innov/2411487.pdf>. (date of access: 19.02.2022).
26. Pogrebnyak Yu. F., Tatyankina E. M., Tolochko V. V. *Oreoly rasseyaniya zolota v snezhnom pokrove na poverhnosti rudoproyavleniya* (Halos of gold dispersion in snow cover on the surface of an ore occurrence). Report. Academy of Sciences of the USSR, 1979, V. 245, No. 4, pp. 953–955.
27. Richter G. D. *Rol' snezhnogo pokrova v fiziko-geograficheskom processe* (The role of snow cover in the physical and geographical process). Proceedings of the Institute of Geography of the Academy of Sciences of the USSR. Issue. 40. Moscow-Leningrad: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1948, 171 p.
28. Savitsky A. N. *Zamerzanie i plavlenie vody v steklyannykh kapillyarah* (Freezing and melting of water in glass capillaries). colloid magazine, 1968, V. 30, No. 1, pp. 119–123.
29. Stadnik E. V., Mogilevsky G. A., Bogdanova V. M., Telegina Z. P., Yurin G. A., Ton M. S., Oborin A. A., Lapchinskaya L. V., Lieberman G. .I., Sedykh L. A. *Neftegazoposkovaya gazobiohimicheskaya s'emka po snezhnomu pokrovu* (Oil and gas prospecting gas-biochemical survey on the snow cover). News of higher educational institutions: Geology and exploration, 1978, No. 3, pp. 81–92.
30. Stepanov, I. N. *Snezhnyj pokrov i formirovanie pochv* (Snow cover and soil formation). Eurasian Soil Science. 1962, No. 3, pp. 44–51.
31. Fedoseeva V. I., Fedoseev N. F. *Sorbciya molibdat-anionov kvazizhidkoj plenki na poverhnosti dispersnogo l'da*



(Sorption of molybdate anions by a quasi-liquid film on the surface of dispersed ice). Colloid magazine, 2010, V. 72, No. 4, pp. 574–576.

32. Fedoseeva V. I. *Fiziko-khimicheskiye zakonomernosti migratsii khimicheskikh elementov v merzlykh gruntakh i snege* (Physical and chemical regularities of migration of chemical elements in frozen soils and snow). Yakutsk: Publishing House of the Institute of Permafrost Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2003, 138 p.

33. Firtz S., Armstrong R. L., Duran I., Ethevy P., Greene I., McClung D. M., Nishimura K., Satyawali P. K., Sokratov S. A. *Mezhdunarodnaya klassifikatsiya dlya sezonno-vypadayushchego snega (rukovodstvo k opisaniyu snezhnoj tolshchi i snezhnogo pokrova)* (International Classification for Seasonally Falling Snow (Guidelines for Describing Snow Thickness and Snow Cover)). Materials of glaciological studies, 2012, No. 2, 80 p.

34. Hobbs P.V. Ice physics. Oxford: University Press, 1974, 495 p.

35. Salo H., Berisha A. K., Mäkinen J. Seasonal comparison of moss bag technique against vertical snow samples for monitoring atmospheric pollution. Journal of Environmental Sciences, 2016, V. 41, P. 128–137. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2015.04.021> (Date of access: 11.18.2021).

36. Sobolev I. S., Gavrilov R. Yu., Isupova A. A., Khvashchenskaya 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 Exploration, 2022, V. 234, N 3. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2021.106940>.

37. Taivalkoski A., Sarala P., Lahaye Y., Lukkari S., Sutherland D. Snow in mineral exploration — Examples and practices in glaciated terrain. Journal of Geochemical Exploration, 2019, V. 200, N 5, P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.01.006>.

Поступила в редакцию / Received 04.04.2022