

## МЕХАНИЗМ МИГРАЦИИ ИОНОВ ИЗ МАТЕРИАЛА СУБСТРАТА В СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ В КОНЦЕ ХОЛОДНОГО ПЕРИОДА

© 2024 г. В. И. Федосеева<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Якутск, Россия;

<sup>2</sup>Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия

e-mail: vifgoreva@gmail.com

Поступила 18 сентября 2023 г.

После доработки 21 января 2024 г.

Принята к печати 10 апреля 2024 г.

Миграция ионов из подстилающего субстрата в приконтактный слой снежного покрова в конце холодного периода уже заметна при температуре на уровне контакта  $-13^{\circ}\text{C}$  и выше. Основная роль в миграции принадлежит квазижидким пленкам неравновесной толщины. На восходящей ветви «весеннего» максимума минерализации приконтактного слоя снежного покрова наблюдается линейная взаимосвязь содержания мигрирующих ионов и градиента плотности паров воды.

**Ключевые слова:** миграция ионов, снежный покров, геохимические поиски, квазижидкие пленки

**DOI:** 10.31857/S2076673424020062

### ВВЕДЕНИЕ

В приконтактном слое снега (0–5 см) обменные процессы протекают наиболее активно. На основании результатов комплексных исследований (Федосеева, 2003) можно было объяснить появление так называемого «весеннего» максимума минерализации, наблюдаемого ежегодно, увеличением количества среды миграции за счёт изменения микрорельефа поверхности частиц снега и формирования квазижидких плёнок неравновесной толщины. На основании литературных данных показано (Федосеева, 2003), что при температурах, наблюдаемых в толще снега в этот период, в условиях термодинамического равновесия толщина квазижидкой пленки составляет несколько нанометров, что не может способствовать заметной миграции веществ. Образование плёнок неравновесной толщины должно быть следствием движения и сверху, и снизу потоков пара, который конденсируется на поверхности кристаллов снега. В условиях общего прогревания системы толщина их может только возрасть. В определённый момент при неуклонном прогревании минерализация в слое снега, достигнув максимума, начинает снижаться, по-видимому, из-за образования на поверхности кристаллов слоёв переохлаждённой воды слишком большой толщины. По этой причине возникают условия для гравитационного «вымывания» веществ. Именно в этот период в естественных условиях при ещё отрицательных температурах начинается период усадки снежного покрова, обусловленной

«слипанием» частиц из-за возрастания толщины квазижидкой плёнки и, соответственно, увеличение плотности снега. Последнее выявляется при анализе справочных данных Госкомгидромета, как, например, для обсуждаемого ниже процесса миграции золота (Метеорологический..., 1987).

Физико-химические процессы – основы явлений, наблюдаемых в окружающей среде. В системе, включающей снежную толщу и контактирующий с ней материал субстрата, они обуславливают возможность практического применения геохимического опробования снежного покрова при поисках месторождений полезных ископаемых и для оценки экологических последствий загрязнения окружающей среды теми или иными веществами (Лукашев и др., 1987; Макаров, 1998).

Суть происходящего заключается в том, что химические вещества мигрируют из субстрата (почва или лёд) в приконтактный слой снега под влиянием градиента концентрации. Это происходит благодаря наличию в субстрате незамерзших плёнок воды и квазижидкой плёнки на поверхности кристаллов снега. Они могут образоваться на кристаллах снега в начале холодного периода в результате импульсного подтока паров воды из субстрата при резком понижении температуры воздуха, если снег только начал отлагаться на ещё «тёплую» почву (Федосеева, 2003), или благодаря потоку пара в период прогревания снежной толщи в конце холодного, так называемого «весеннего» периода.

Возможно, что для получения эффективного результата геохимического опробования время отбора проб снега (конец холодного периода) было выявлено эмпирически с опорой на период максимального влагозапаса (Василенко и др., 1985). По-видимому, в этот период в снежной толще создаются благоприятные температурно-влажностные условия, определяющие заметную миграцию веществ из субстрата в снег. Механизм этого процесса пока не ясен, но миграция может происходить только при наличии жидкой (квазижидкой) фазы, возможность наличия, свойств и роли которой следует оценить. В работе проведён анализ данных по динамике температуры, обуславливающей направление и величину градиента плотности пара в приконтактном слое снега, с целью получить количественные закономерности, характеризующие миграцию растворимых соединений из субстрата в снежный покров.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

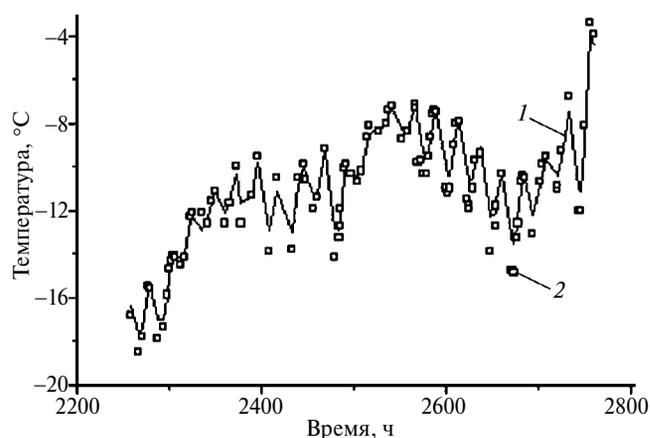
На основании некоторого опыта лабораторного исследования физико-химических свойств поверхности дисперсного льда авторами в течение нескольких лет на стационарной площадке в Центральной Якутии на базе Института мерзлотоведения СО РАН проводился комплекс натуральных исследований по выявлению основных факторов, которые способствуют миграции веществ из субстрата (почва или лёд) в снежный покров (Макаров и др., 1990; Федосеева, 2003). С целью более тесного контакта снега с почвой перед началом отложения снега с поверхности почвы удалялась растительность. Была проведена качественная интерпретация результатов исследований с надёжным обоснованием выводов о том, что миграция веществ из субстрата в приконтактный слой снега происходит по квазижидким плёнкам, возможно, неравновесной толщины.

Для получения более выразительных результатов проведены эксперименты, когда в качестве субстрата использовались замороженные блоки растворов, содержащих как макро-, так и микрокомпоненты (Fedoseeva, 2002). Для проведения искусственного эксперимента в качестве субстрата использовали замороженные блоки растворов, наполненные песком (при исследовании миграции тиосульфатных комплексных ионов золота) или полистиролом (при изучении миграции молибдат-анионов, катионов меди и им сопутствующих ионов). Состав использованных растворов был следующим:  $10^{-4}$  моль/л  $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$  +  $10^{-2}$  моль/л  $\text{NaCl}$ ;  $10^{-2}$  моль/л  $\text{MoO}_4^{2-}$  +  $10^{-2}$  моль/л  $\text{KCl}$  +  $10^{-1}$  моль/л  $\text{NaCl}$ ;  $10^{-2}$  моль/л  $\text{CuCl}_2$  +  $10^{-2}$  моль/л  $\text{HCl}$  +  $10^{-2}$  моль/л  $\text{KCl}$  +  $10^{-1}$  моль/л  $\text{NaCl}$ . Присутствие дополнительных ионов и их концентрации были обусловлены необходимостью стабилизации химических форм наблюдаемых ионов.

Замороженные блоки устанавливались заблаговременно в подошве снежного покрова. Температуру

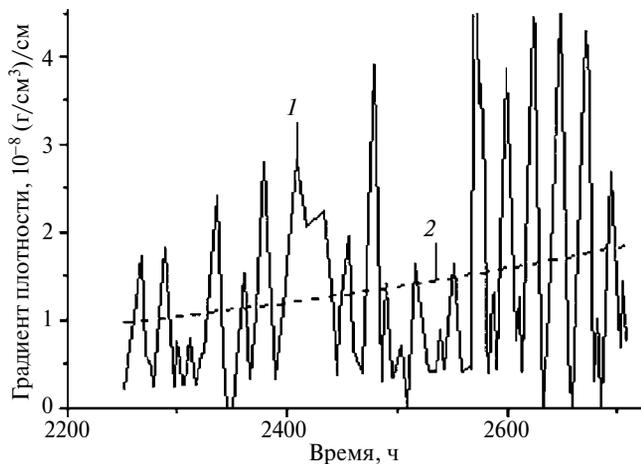
измеряли несколько раз в сутки с помощью терморезисторов, установленных на уровне контакта снега с субстратом и на высоте 5 см в течение всего эксперимента. Из приконтактного слоя (0–5 см) снега отбирали пробы для определения концентрации ионов с применением разных методов. Золото определяли атомно-абсорбционным методом на спектрофотометре АА-6200, молибден и медь – спектральным методом на приборе ДФС-8, натрий и калий анализировали методом фотометрии пламени на приборе Флафо-4, ионы водорода определяли потенциометрическим методом на иономере И-120.2, хлорид-анионы анализировали с помощью объёмного меркуриметрического метода.

Анализ результатов искусственных экспериментов в конце холодного периода с акцентом на возможное выявление количественной взаимосвязи динамики миграции ионов с температурно-влажностными условиями на границе толщи снега и материала субстрата ранее сделан не был. Массив данных по температуре при систематическом её измерении в приконтактном слое снега на уровнях 0 и 5 см в трёх экспериментах достаточно большой, поэтому в качестве примера на графике (рис. 1) представлены температуры в приконтактном слое снега (на высоте 0 и 5 см от поверхности субстрата) в интервале времени, совпадающем с периодом активной миграции тиосульфатных ионов золота из субстрата в прилегающий слой снега – с 4 по 25 апреля 1987 г. В соответствии со справочными данными (Справочники...) определялась плотность



**Рис. 1.** Изменение температуры в приконтактном слое снега в период с 4 по 25 апреля 1987 г., связанный с активной миграцией ионов  $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$  из субстрата в снег в конце холодного периода при прогревании толщи в «весеннее» время. Температура снега: 1 – на уровне контакта снега с субстратом, 0 см; 2 – на высоте 5 см. Отсчёт времени от 01 января 1987 г.

**Fig. 1.** Changes in temperature in the contact layer of snow in the period from April 4 to April 25, 1987, associated with the active migration of  $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$  ions from the substrate into the snow at the end of the cold period when the layer warms up in the “spring” time. Snow temperature: 1 – at the level of contact of snow with the substrate, 0 cm; 2 – at a height of 5 cm. The time countdown is shown from January 1, 1987



**Рис. 2.** Градиент плотности водяного пара: 1 — в приконтактном слое снега (0–5 см); 2 — тренд. Отсчёт времени от 1 января 1987 г.

**Fig. 2.** Water vapor density gradient: 1 — in the near-contact layer of snow (0–5 cm); 2 — trend. Countdown from January 1, 1987

паров воды на этих уровнях с последующим расчётом значений градиента плотности, изменение которого во времени показано на рис. 2. Такой же подход к анализу температурно-влажностных условий использовался в двух других экспериментах. Все графики в работе выполнены с помощью программы Origin (Исакова и др., 2009). Содержание анализируемых микро- и макрокомпонентов в приконтактном слое снега (0–5 см) в период наблюдений сопоставляли с величиной градиента плотности пара в нём. Значения последнего на момент отбора проб снега отсчитывали по кривым (трендам), аппроксимирующим зависимости градиента плотности пара от времени наблюдения (см. рис. 2).

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

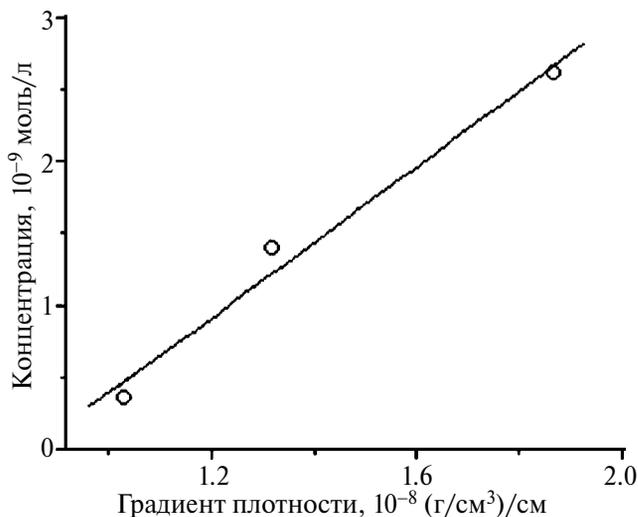
На границе слоя снега (0–5 см) с подстилающим субстратом обменные процессы должны протекать наиболее активно. Как было сказано выше, на основании результатов комплексных исследований (Федосеева, 2003) можно было объяснить появление так называемого «весеннего» максимума минерализации, наблюдаемого ежегодно, увеличением количества среды миграции за счет образования микрорельефа на поверхности частиц снега и формирования квазжидких плёнок неравновесной толщины. На это указывали выявленное увеличение удельной поверхности частиц снега и, собственно, сам факт повышения минерализации в слое снега, возможного только вследствие миграции веществ из субстрата посредством квазжидких пленок с толщиной, превышающей равновесное (несколько нанометров) значение при достаточно низких отрицательных температурах (см. рис. 1). Всё это формируется в результате движения потоков пара в условиях общего прогревания толщи снега при изменении направления и величины температурного

градиента и, соответственно, градиента плотности пара в слое снега в течение суток (см. рис. 1–2).

В определённый момент при неуклонном прогревании системы минерализация в слое, достигнув максимального значения, начинает снижаться, по-видимому, из-за образования на поверхности кристаллов слоёв воды слишком большой толщины. По этой причине возникают условия для гравитационного «вымывания» веществ. Именно в этот период, как указано выше, и начинается осадка снежного покрова. В соответствии с этим всё внимание при проведении и обработке экспериментальных данных было сосредоточено на периоде, предшествующем быстротечным процессам при неуклонном повышении температуры в приконтактном слое снега, тем более при приближении её к нулю.

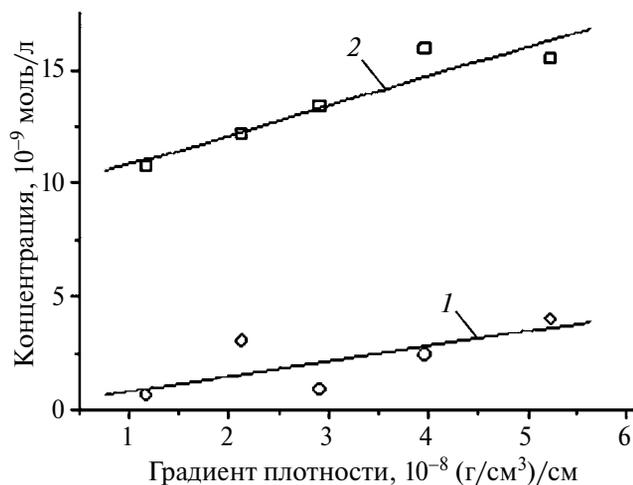
Основной фактор, определяющий миграцию веществ, — это градиент концентрации. Их поступление из субстрата в приконтактный слой может возникать только посредством квазжидких плёнок в субстрате и на поверхности частиц снега, причём толщина пленок с ростом температуры в целом должна возрастать.

Анализ изменения температуры в снеге и, соответственно, разности плотности пара в его воздушном пространстве на высоте 5 см и на уровне его контакта с субстратом во всех трёх экспериментах привёл к выводу, что в «весенний» период динамика содержания ионов в приконтактном слое снега коррелирует с изменением градиента плотности паров воды в воздушном пространстве приконтактного слоя снега (рис. 3–5). Надо добавить, что разность плотности, а также упругости водяного пара



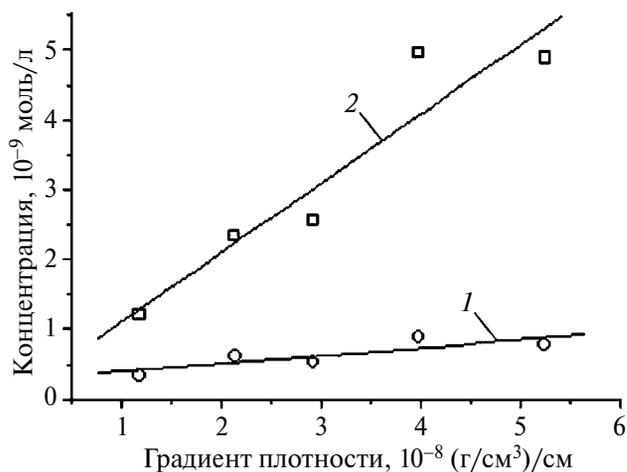
**Рис. 3.** Зависимость концентрации тиосульфатных ионов золота  $Au(S_2O_3)_2^{3-}$  от градиента плотности водяного пара в слое снега 0–5 см на восходящей ветви «весеннего» максимума минерализации

**Fig. 3.** Dependence of the concentration of gold thiosulfate ions  $Au(S_2O_3)_2^{3-}$  on the water vapor density gradient in a 0–5 cm layer of snow on the ascending branch of the “spring” maximum mineralization



**Рис. 4.** Зависимость концентрации ионов меди  $\text{Cu}^{2+}$  (1) и водорода  $\text{H}^+$  (2) от градиента плотности водяного пара в слое снега 0–5 см на восходящей ветви «весеннего» максимума минерализации

**Fig. 4.** Dependence of the concentration of copper ions  $\text{Cu}^{2+}$  (1) and hydrogen  $\text{H}^+$  (2) on the water vapor density gradient in a 0–5 cm layer of snow on the ascending branch of the “spring” maximum of mineralization



**Рис. 5.** Зависимость концентрации ионов натрия  $\text{Na}^+$  (1), хлора  $\text{Cl}^-$  (2) от градиента плотности водяного пара в слое снега 0–5 см на восходящей ветви «весеннего» максимума минерализации

**Fig. 5.** Dependence of the concentration of sodium ions  $\text{Na}^+$  (1), chloride  $\text{Cl}^-$  (2) on the density gradient of water vapor in a layer of snow 0–5 cm on the ascending branch of the “spring” maximum of mineralization

оценивали по справочным данным (Справочники...), которые характеризуют систему в условиях термодинамического равновесия. Однако в порах снега даже в изотермических условиях упругость пара может превышать эту величину на 3–8% (Голубев, Фролов, 2015). Смещённое по какой-либо причине равновесие устанавливается в зависимости от температуры в течение 60–80 часов.

Таким образом, в естественных условиях при изменяющемся в течение суток и всего рассматриваемого периода температурном режиме равновесие по плотности пара в системе не достигается, при том что воздух в порах снега бывает пересыщен влагой (Голубев, Фролов, 2015). Отмечено, что коэффициент диффузии пара в снеге ( $0.54 \text{ см}^2/\text{с}$ ) намного превышает коэффициент диффузии пара в воздухе ( $0.22 \text{ см}^2/\text{с}$ ) как раз вследствие того, что к его миграции в воздушном пространстве толщ добавляется процесс конденсации пара на обращённой к потоку части поверхности кристаллов снега с последующей его возгонкой с противоположной части (Павлов, 1979). Таким образом, при миграции пара под влиянием градиента плотности пара, по-видимому, определённой величины и его конденсации на поверхности частиц снега может образоваться плёнка неравновесно бóльшей толщины, не достигающей равновесного значения из-за меняющегося в течение суток температурно-влажностного режима. В результате складываются условия, благоприятные для миграции ионов из субстрата при наличии градиента концентрации.

Общее для всех процессов заключается в том, что миграция начинается, когда при наблюдаемом прогревании системы температура на границе снега и субстрата приближается к  $-13 \div -12 \text{ }^\circ\text{C}$ . Миграция веществ по квазижидким плёнкам при таких температурах в равновесных условиях в принципе невозможна из-за малой толщины плёнок (Федосеева, 2003). Однако при этих температурах упругость пара над переохлаждённой водой выше, чем над поверхностью льда (Баттан, 1965), т. е. существование плёнок такой воды в этих температурных условиях возможно. Начало заметной миграции может служить косвенным подтверждением начала формирования, развития и сохранения плёнок переохлаждённой воды в неравновесных условиях под влиянием потоков пара. Квазижидкая плёнка на кристаллах льда исчезает, возможно, при достаточно низких температурах, об этом известно давно. В работе (Федосеева, 2003) в ходе лабораторных сорбционных экспериментов установлено, что эта форма воды полностью исчезает только после длительного (более двух месяцев) выдерживания образцов снега при температуре ниже  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Отмечено, что установление какой-либо закономерной взаимосвязи количества микрокомпонентов в приконтактном слое снега и градиента плотности пара в столь динамичном процессе массообмена будет корректным, если рассматривать значения величин, которые относятся к периоду достижения максимума содержания ионов, т. е. монотонному возрастанию минерализации в приконтактном слое снега. (см. рис. 3–5; таблица). Температуры в приконтактном

слое снега в этот период остаются ещё достаточно низкими (см. рис. 1), и основным типом переноса влаги будет перенос в виде пара. При последующем повышении температуры в целом процессы усложняются, так как появляется возможность миграции плёночной влаги при резких ночных понижениях температуры воздуха (Лебедеко, 1989), следовательно, и в снежной толще, а также образования объёмной фазы воды, что способствует «стеканию» плёночных растворов.

Из рис. 3–5 видно, что соответствие содержания ионов в приконтактном слое снежного покрова и градиента плотности пара описывается линейными зависимостями: для тиосульфатного комплекса золота:  $[Au(S_2O_3)_2^{3-}] = 0.26 \cdot \Delta e - 2.23 \cdot 10^{-9}$ , где  $\Delta e$  — градиент плотности пара (Павлов, 1979), с величиной достоверности аппроксимации 0.98; для ионов меди:  $[Cu^{2+}] = 0.65 \cdot \Delta e + 2 \cdot 10^{-9}$  с величиной достоверности аппроксимации 0.52; для ионов водорода:  $[H^+] = 1.30 \cdot \Delta e + 1 \cdot 10^{-7}$  с величиной достоверности аппроксимации 0.88; для ионов натрия:  $[Na^+] = 114.4 \cdot \Delta e + 3 \cdot 10^{-6}$  с величиной достоверности аппроксимации 0.69; для хлорид-анионов:  $[Cl^-] = 998.6 \cdot \Delta e + 1 \cdot 10^{-6}$  с величиной достоверности аппроксимации 0.89.

Из приведённых данных видно, что модель линейной взаимосвязи концентрации мигрирующих ионов в приконтактном слое снега с градиентом плотности пара в нём вполне правомерна. Предположено, что различие величины достоверности аппроксимации (заметной: 0.52 и 0.69, высокой: 0.88 и 0.89 и весьма высокой — 0.98) для разных ионов в какой-то мере обусловлено их адсорбционным взаимодействием разной степени с материалом наполнителя в субстрате. Самая высокая достоверность линейной аппроксимации наблюдается для отрицательно заряженных тиосульфатных комплексных ионов золота, по-видимому, оттого, что они слабо сорбируются поверхностью частиц наполнителя (речного песка), которая имеет, как известно, тоже отрицательный заряд.

В эксперименте по изучению миграции молибдат-анионов на восходящей ветви весеннего максимума минерализации оказались только две точки, поэтому результаты представлены в виде таблицы.

**Таблица.** Концентрация молибдат-анионов  $[MoO_4^{2-}]$  и ионов калия  $[K^+]$  при разной величине градиента плотности водяного пара ( $\Delta e$ ) в приконтактном слое снега на восходящей ветви «весеннего» максимума

Дата	$\Delta e$ , $10^{-8}$ (г/см <sup>3</sup> )/ см	$[MoO_4^{2-}]$ , $10^{-6}$ моль/л	$[K^+]$ , $10^{-5}$ моль/л
31.03.1991	0.8	0.5	0.12
08.04.1991	3.6	1.85	0.70

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Детальный анализ температурно-влажностного режима в приконтактном слое снежного покрова в весеннее время привёл к выводу, что активная миграция микроэлементов из субстрата в снег начинается по достижении температуры на границе контакта  $-12 \div -13$  °С и развивается при умеренном прогревании благодаря образованию квазижидкой плёнки на кристаллах снега с толщиной, превышающей равновесное значение (несколько нанометров) для наблюдаемых температурных условий. Сведения о том, что упругость паров над переохлаждённой водой при этих температурах заметно выше, чем над поверхностью льда, и сам факт миграции ионов предполагают появление таких плёнок в системе. А движущим фактором для начала миграции при относительно низких температурах безусловно является градиент концентрации ионов микроэлемента в незамёрзших плёнках субстрата и в квазижидких плёнках поверхности кристаллов снега. Формирование пленок связано с миграцией паров воды. Чем интенсивнее поток пара, тем больше толщина неравновесных пленок переохлажденной воды. Это способствует миграции ионов из субстрата в приконтактный слой снега, поэтому закономерно получена линейная зависимость содержания в нём мигрирующих ионов от градиента упругости пара.

При активном повышении температуры окружающей среды возможно формирование в системе плёнок переохлаждённой воды такой толщины, которые, по-видимому, вместе с меняющимся в течение суток температурным режимом могут способствовать и конвективному переносу жидкой фазы из субстрата в приконтактный слой снега. При дальнейшем неуклонном прогревании снежной толщи появляется подвижная объёмная фаза воды, которая гравитационно поступает в субстрат, попутно «вымывая» заметную часть ионов микроэлементов из приконтактного слоя снега. Это обстоятельство может снижать контрастность геохимических ореолов в снежном покрове и, соответственно, эффективность поисков месторождений полезных ископаемых по снегу, проводимых в этот период времени.

Таким образом, результат детального анализа температурного режима в приконтактном слое снега и связанного с ним влажностного, а также характера массообмена на границе снежного покрова с субстратом в весеннее время даёт обоснование эффективности геохимического опробования снежного покрова при поисках месторождений полезных ископаемых, если оно ограничивается слоем снега в подошве снежного покрова толщиной 5 см или больше (в зависимости от региональных особенностей климата). Сроки проведения опробования должны быть тесно сопряжены с моментом начала резкого возрастания плотности снежного покрова в конце холодного периода, что может быть установлено по ежегодным данным Госкомгидромета для каждого региона.

**Благодарности.** Автор выражает глубокую признательность Н. Ф. Федосееву за техническое обеспечение проведения экспериментов, Г. В. Звонаревой и Р. И. Русаковой за выполнение химического и спектрального анализа образцов снега.

**Acknowledgments.** The author expresses his deep gratitude to N. F. Fedoseev for technical support of the experiments, G. V. Zvonareva and R. I. Rusakova for performing chemical and spectral analysis of snow samples.

## ЛИТЕРАТУРА

- Батман Л. Дж.* Человек будет изменять погоду. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 112 с.
- Василенко В. М., Назаров И. М., Фридман Ш. Д.* Мониторинг загрязнения снежного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 192 с.
- Голубев В. Н., Фролов Д. М.* Особенности миграции водяного пара на границах раздела атмосфера — снежный покров и снежный покров — подстилающий грунт // Криосфера Земли. 2015. Т. XIX. № 1. С. 22–29.
- Исакова О. П., Тарасевич Ю. Ю., Юзюк Ю. И.* Обработка и визуализация данных физических экспериментов с помощью пакета программ Origin. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. 136 с.
- Лебеденко Ю. П.* Криогенная миграция ионов и связанной влаги в льдонасыщенных дисперсных породах // Инженерная геология. 1989. № 4. С. 21–30.
- Лукашев В. К., Никитина Р. А., Васильева Л. И., Лесковец Г. В.* Использование снега при геохимических поисках // Доклады АН БССР. 1987. Т. 31. Вып. 4. С. 161–176.
- Макаров В. Н.* Геохимические поля в криолитозоне. Якутск: Изд-во Ин-та мерзлотоведения СО РАН, 1998. 116 с.
- Макаров В. Н., Федосеева В. И., Федосеев Н. Ф.* Геохимия снежного покрова Якутии. Якутск: Изд-во Ин-та мерзлотоведения СО АН СССР, 1990. 148 с.
- Метеорологический ежемесячник.* Ч. 2. Вып. 24. № 1–4. Якутск, 1987. 73 с.
- Павлов А. В.* Теплофизика ландшафтов. Новосибирск: Наука, 1979. 285 с.
- Справочники TeHTab.ru // Электронный ресурс.* <http://tehtab.ru/Guide/GuidePhysics/Humidity/SaturatedOverIce/> (Дата обращения: 18.09.2023).
- Федосеева В. И.* Физико-химические закономерности миграции элементов в мерзлых грунтах и снеге. Якутск: Изд-во Ин-та мерзлотоведения СО РАН, 2003. 138 с.
- Fedoseeva V. I.* Cyclic migration of chemical elements at the soil-snow interface // Материалы гляциол. исследований. 2002. Вып. 92. С. 192–194.

---

Citation: Fedoseeva V.I. Mechanism of ion migration from the substrate material into snow cover at the end of the cold period. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2024, 64 (2): 231–237. [In Russian]. doi 10.31857/S2076673424020062

---

## Mechanism of ion migration from the substrate material into snow cover at the end of the cold period

V. I. Fedoseeva<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia;*

<sup>2</sup>*P.I. Melnikov Permafrost Institute of Siberian Branch of the RAS, Yakutsk, Russia*  
e-mail: [vifgoreva@gmail.com](mailto:vifgoreva@gmail.com)

Received September 18, 2023 / Revised January 21, 2024 / Accepted April 10, 2024

Earlier, it was established that maximum mineralization of the contact layer of snow occurs in spring at the interface with substrates (soil or ice). This study analyzes the temperature and moisture conditions during this period at the interface of the contact layer of snow with substrates by examining frozen sand blocks saturated with a solution containing complex gold ions, or blocks filled with polystyrene containing ions of molybdenum, copper, etc. It is assumed that the migration of ions from the underlying substrate into the contact layer of snow cover in spring occurs along quasi-liquid films on the surface of snow crystals, the thickness of which exceeds the equilibrium one. Migration becomes noticeable when the temperature at the snow–substrate contact reaches  $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$  and above. The appearance of quasi-liquid films on the surface of snow particles under variable temperature and moisture conditions is possible due to the condensation of water vapor, which during the day, with general heating of the system, can enter

the contact layer of snow both from above and below. With an increase in snow density in the spring, the mineralization of the near-contact layer of snow cover increases. At the same time, linear relationships were revealed between the content of substrate components migrating into the near-contact layer of snow and the gradient of water vapor density in it. The reliability of the approximation of these dependencies for the gold thiosulfate complex is 0.98; for copper ions – 0.52; for hydrogen ions – 0.88; for sodium ions – 0.69, for chloride anions – 0.89. The results of the study substantiate the increased efficiency of geochemical prospecting for mineral deposits using snow cover in the spring.

**Keywords:** ion migration, snow cover, geochemical searches, quasi-liquid films

## REFERENCES

- Battan L. J.* Chelovek budet izmenjat' prirodu. Man will change the weather. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1965: 112 p. [In Russian].
- Vasilenko V. M., Nazarov I. M., Fridman Sh. D.* Monitoring zagryazneniya snezhnogo pokrova. Snow cover pollution monitoring. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1985: 192 p. [In Russian].
- Golubev V. N., Frolov D. M.* Water vapor flows across snow-air and snow-soil interfaces. *Kriosfera Zemli*. Cryosphere of the Earth. 2015, 19 (1): 20–25.
- Isakova O. P., Tarasevich Ju. Yu., Juzjuk Ju. I.* Obrabotka i vizualizatsiya dannyh fizicheskikh eksperimentov s pomoshch'yu paketa Oridin. Processing and visualization of data from physical experiments using the Origin software package. Moscow: Book house "LIBRO-COM", 2009: 136 p. [In Russian].
- Lebedenko Ju. P.* Cryogenic migration of ions and bound moisture in ice-saturated dispersed rocks. *Inzhenernaja Geologija*. Engineering geology. 1989, 4: 21–30. [In Russian].
- Lukashev V. K., Nikitina R. A., Vasilieva L. I., Leskovets G. V.* Use of snow in geochemical prospecting. *Doklady Belarusskoj Akademii nauk*. Reports of the Belarusian Academy of Science. 1987, 31 (4): 161–176. [In Russian].
- Makarov V. N.* Geokhimicheskije polja v kriolitozone. Geochemical fields in permafrost. Yakutsk: IMZ SO RAN, 1998: 116 p. [In Russian].
- Makarov V. N., Fedoseeva V. I., Fedoseev N. F.* Geokhimija snezhnogo pokrova Jakutii. Geochemistry of the snow cover of Yakutia. Yakutsk: IMZ SB USSR AN, 1990: 148 p. [In Russian].
- Meteorologicheskij ezhesjajchnik*. Chast' 2. Meteorological monthly. Part 2. Issue 24. № 1–4. Yakutsk, 1987: 73 p. [In Russian].
- Pavlov A. V.* Teplofizika landshaftov. Thermophysics of landscapes. Novosibirsk: Nauka, 1979: 285 p. [In Russian].
- Spravochniki TehTab.ru Retrieved from: <http://tehtab.ru/Guide/GuidePhysics/Humidity/SaturatedOverIce/> (Last access: 18 September 2023). [In Russian].
- Fedoseeva V. I.* Fiziko-khimicheskije zakonomernosti migratsii khimicheskikh elementov v mjorzlykh gruntakh i snege. Physico-chemical regularities of chemical element migration in frozen soils and snow. Yakutsk: IMZ SB RAN, 2003: 138 p. [In Russian].
- Fedoseeva V. I.* Cyclic migration of chemical elements at the soil-snow interface. *Materialy Gljatsiologicheskikh Issledovanij*. Data of Glaciological Studies. 2002, 92: 192–194.