

Визуализация структурно-текстурных изменений в новообразующемся снежном слое при длительном снегопаде

© 2021 г. М.П. Тентюков

Сыктывкарский государственный университет им. Питирима Сорокина, Сыктывкар, Россия;
Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия
tentukov@yandex.ru

Visualization of structural and textural changes in the newly formed snow layer during prolonged snowfall

M.P. Tentyukov

Pitirim Sorokin Syktyvkar State University, Syktyvkar, Russia;
V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch, Russian Academy of Science, Tomsk, Russia
tentukov@yandex.ru

Received September 11, 2020 / Revised January 24, 2021 / Accepted March 19, 2021

Keywords: *snow structure, snow texture, snow micromorphology, snow stratigraphy, optical anisotropy, diffuse light reflection.*

Summary

Observations were made on the dynamics of structural and textural transformations in the newly fallen snow layer during its transition to a stratigraphically significant snow accumulation layer. To visualize the structural and textural transformations during a prolonged snowfall and post-sedimentation changes in it after the snowfall stopped, a reflective screen was used in combination with photomicrography of solid precipitation and snow grains. Observations were made for seven days. Already on the third day, with the thickness of the newly formed snow layer of 12 cm, the primary texture in the form of internal layering, due to the microstructure of freshly fallen snow, began to differ in it. In the process of post-sedimentation transformations, the primary stratification in the newly formed stratigraphically significant snow layer was preserved, but became less noticeable. Micrographs showed that the deposited snowflakes were transformed by sublimation metamorphism to form small rounded *RGsr* particles, which differed little from the snow grains in the underlying layer. It is assumed that the structural and textural post-sedimentation transformations of solid precipitation in the upper part of the snow thickness are more controlled by the depth of penetration of the air temperature gradient. Lower boundary of this upper part is well distinguished in the snow profile owing to the optical anisotropy of the snow horizons composed of *RGsr* snow grains and *FCso* and *DHla* facet crystals. The performed studies demonstrated that the light-reflecting screen can be used in snow science as a simple tool for optical monitoring of structural heterogeneities of seasonal snow cover and visualization of post-sedimentation processes that occur during its growth.

Citation: Tentyukov M.P. Visualization of structural and textural changes in the newly formed snow layer during prolonged snowfall. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2021. 61 (2): 222–231. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673421020083.

Поступила 11 сентября 2020 г. / После доработки 24 января 2021 г. / Принята к печати 19 марта 2021 г.

Ключевые слова: *структура снега, текстура снега, микроморфология снега, стратиграфия снега, оптическая анизотропия, диффузное отражение света.*

На примере наблюдений нарастания снежной толщи во время длительного снегопада охарактеризованы особенности проявления структурно-текстурных неоднородностей в новообразующемся снежном слое по диффузному отражению света в оптическом диапазоне спектра. Показана область практического приложения оптической диагностики в видимом диапазоне спектра при изучении стратиграфии снежного покрова.

Введение

Текстура снежного слоя – важный структурный признак снежного покрова. Структурно-текстурные особенности строения снежной толщи представляют собой весомую компоненту при моделировании стратиграфии снежного покрова [1], а также при различных классифи-

кационных построениях [2, 3]. Современное состояние структурных исследований в России и за рубежом детально описано в обзоре С.А. Сокрытова и Е.С. Трошкиной [4]. Структура и текстура обычно тесно взаимосвязаны. К структурным признакам относятся форма и размер снежных зёрен, слагающих снежный слой, а также межслоевые различия (мелко-, средне- и

крупнозернистый). Текстура снежного слоя характеризует черты его внутреннего строения, которые обусловлены пространственным взаимоотношением элементарных единиц (снежные зёрна, ледяные кристаллы) и их ориентировкой по отношению к поверхности наслоения. Главный текстурный признак снежной толщи — слоистость, а элементарная стратиграфическая единица — слой снегонакопления, который образуется при интенсивности снегопада более $0,01 \text{ г/см}^2$ в сутки. При меньшей интенсивности выпадения твёрдых осадков формирование отдельного слоя едва ли возможно, так как в зоне с холодным климатом указанное количество свежеснег выпавшего снега испаряется менее чем за сутки [5, 6]. Текстура снежного слоя определяет устойчивость снежного покрова [7], поэтому наблюдения за динамикой структурно-текстурных преобразований в свежеснег выпавшем слое снега при его переходе в стратиграфически значимый слой снегонакопления представляют собой определённый интерес.

Методика

Характеристика района и объекта исследования. Исследования проводились на северо-востоке Европейской части России в пределах Мезенско-Вычегодской равнины. Ключевой участок выбран на засеянном многолетними

травами поле, расположенном на высокой террасе в долине р. Сысола в 4 км к западу от г. Сыктывкар. Наблюдения проводили с 9 января 2013 г. по 18 января 2013 г. Толщина снежного покрова на момент начала продолжительного слабого снегопада составляла 42 см (09.01.2013 г.), которая затем увеличилась до 53 см (15.01.2013 г.), но к концу наблюдений (16.01.2013 г.) она просела до 50 см.

Полевой этап. Наблюдения за изменением структуры снежной толщи в период длительного снегопада предусматривали проходку шурфов (10–11.2013 г., 14–18.01.2013 г.). Для этого каждый раз выбирался целинный участок поля, отстоящий от предыдущего не менее чем на 1 м. Ключевой участок был отделён от нежилых построек широким участком чистого поля. Для визуализации структуры снежной толщи в снежном шурфе с помощью прямоугольной тёмной пластины-экрана от фронтальной стенки отделяли снежный блок толщиной 4–6 см (рис. 1, а). После этого его толщину уменьшали до размера, при котором становятся визуально различимы структурные слои. Для сухого снега такая оптимальная толщина составляла 2–2,5 см. Данный размер выдерживали по всей высоте фронтальной стенки снежного блока, которую затем фотографировали (см. рис. 1, б). Микросъёмку твёрдых осадков, снежных зёрен и ледяных кристаллов проводили в полевых условиях. Сбор снежинок и их микросъёмку вели с помощью

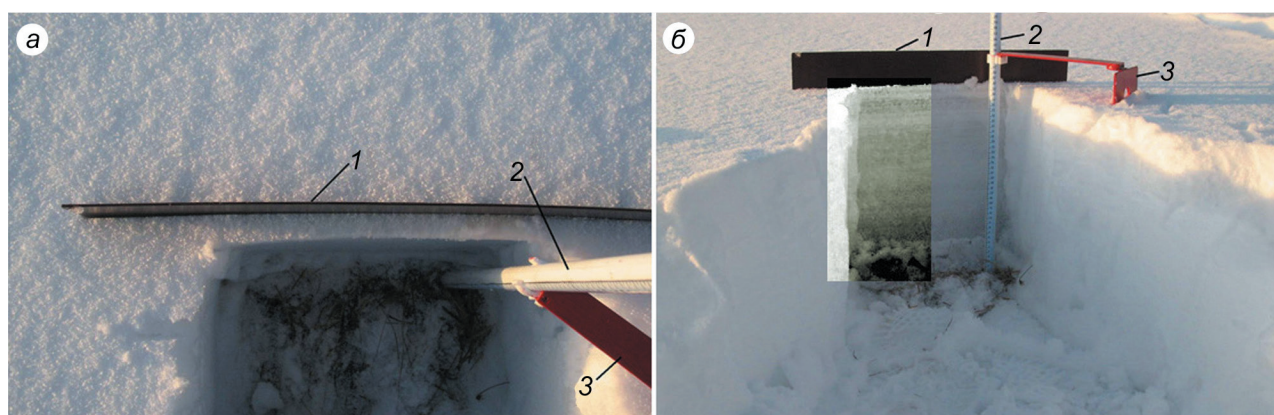


Рис. 1. Фронтальная стенка снежного блока, отделённая в снежном шурфе светоотражательным экраном (а), и фронтальная стенка снежного блока с фрагментом после обработки в графическом редакторе (б).

1 – светоотражательный экран; 2 – снегомерная рейка с ценой деления 1 мм; 3 – фиксатор снегомерной рейки в снежном шурфе

Fig. 1. The snow block front wall, separated in the snow pit by a light reflecting screen (а), the snow block front wall with a fragment after processing in a graphical editor (б).

1 – reflective screen; 2 – snow stake with a scale of 1 mm; 3 – snow stake clamp in a snow pit

деревянного планшета, обтянутого чёрным бархатом. Этот же планшет использовался и при микросъёмке снежных зёрен и ледяных кристаллов глубинной изморози. Ледяные кристаллы и агрегаты снежных зёрен помещали на планшет и фотографировали. Микрофотографирование твёрдых гидрометеоров выполняли при дневном освещении с помощью мобильного цифрового микроскопа JJ-Optics Digital Lab Mobil с ЖК-дисплеем (производство КНР). В микроскопе предусмотрена возможность подключения к компьютеру через USB-разъём.

Камеральный этап. Для усиления контрастности изображения снежных слоёв полученную цифровую цветную фотографию снежного разреза обрабатывали в графическом редакторе Adobe Photoshop CS (см. рис. 1, б) путём усиления контрастности цифрового снимка.

Для визуализации структурно-текстурных преобразований в новообразованном слое, а также постседиментационных изменений в нём использовали светоотражающий экран. Снежный покров представляет собой совокупность огромного числа снежных кристалликов. Каждый такой кристаллик, если одна его грань ориентирована параллельно поверхности, отражает световой луч зеркально, а если нет, то луч рассеивается (диффузное отражение). Множество таких кристалликов с разнонаправленными гранями рассеивают световой поток более или менее равномерно во все стороны, образуя матовую поверхность [8, 9], поэтому и поверхность снежного покрова, и поверхность фронтальной стенки снежной толщи выглядят матовыми и имеют белый цвет.

Вместе с тем снежный покров характеризуется и определённой оптической прозрачностью. Если от снежного массива с помощью тёмной пластины отделить небольшой снежный блок и постепенно уменьшать его толщину, то можно увидеть, как на его фронтальной стенке понемногу начнут проступать снежные слои, различающиеся светлыми оттенками серого цвета. Эти индивидуальные особенности снежных слоёв обусловлены тем, что между количеством (ослаблением) проходящего сквозь снежный кристалл света, плотностью снега и размером снежных кристаллов существует определённая связь [10]. Из этого следует, что при равной толщине снежного блока мелко-, средне- и крупнозернистые

снежные слои визуально будут отличаться друг от друга по цветовым оттенкам. Возможность такой визуальной диагностики слоистого строения снежного профиля основывается на существующих представлениях о слоистой структуре снежного покрова [11–13]. Следовательно, сравнивая только цветовые оттенки снежных слоёв, можно более точно проводить границу между ними.

Известно [14], что все цвета, которые воспринимает зрение, разделяют на хроматические (радужные цвета спектра) и ахроматические (белый, чёрный и серый цвета). Хроматические цвета характеризуются избирательным поглощением/отражением света. Так, поверхность, окрашенная цветной краской, одну часть лучей спектра будет поглощать, а другую – отражать. Однако поверхности с ахроматической окраской одинаково отражают и поглощают все цвета спектра. Другими словами: если проходящий сквозь призму луч света спроецировать на белый, чёрный или серый экраны, то на всех трёх экранах будет отражаться полный спектр, но на чёрном и сером они будут выглядеть темнее, особенно на чёрном. Поэтому ахроматические цвета в отличие от хроматических имеют лишь одно свойство – светлоту. Насыщенность цвета и цветовой тон, которые присущи хроматическим цветам, у них отсутствуют. Расположенные в порядке убывающей светлоты ахроматические цвета образуют следующий ряд: белый > светло-серый > серый > тёмно-серый > чёрный. Очевидно, что диапазон светлот серого цвета в этом ряду – основной. Отмечается [14], что индивидуальные особенности сочетания диффузного рассеивания и прямого отражения света поверхностью лучше передаются оттенками серого цвета. Следовательно, используя только одну характеристику серого цвета – его светлоту (английское соответствие – Brightness), можно визуализировать структурные неоднородности снежной толщи по убывающей/возрастающей градации светлоты серого цвета.

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим особенности формирования снежного покрова зимой 2012/13 г. Начало формирования снежного покрова зимой 2012/13 г. было интенсивным. Обильные снегопады обе-

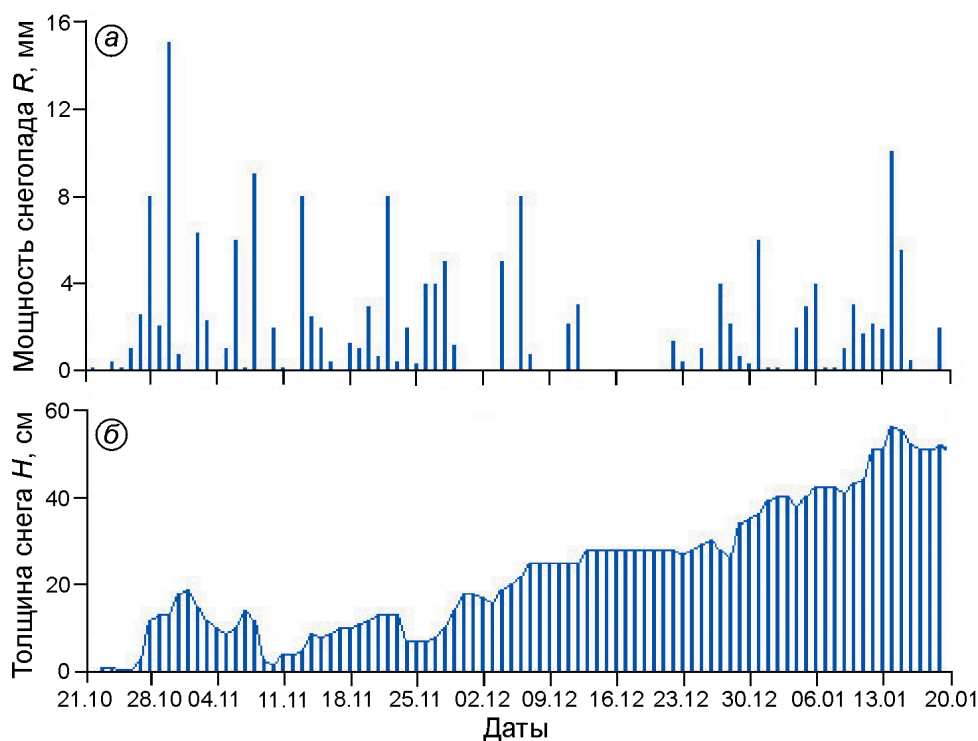


Рис. 2. Особенности формирования снежного покрова:

a – суточное выпадение осадков в водном эквиваленте R , мм; b – динамика нарастания толщины снежного покрова H , см (при построении графиков использован источник [16])

Fig. 2. Features of the snow cover formation:

a – daily precipitation in water equivalent R , mm; b – dynamics of the snow cover height increasing H , cm (the following source was used for plotting [16])

спечили его быстрый прирост (рис. 2, a), но затем две оттепели в первой и третьей декадах ноября существенно уменьшили толщину снежного покрова (см. рис. 2, b). Кроме того, из-за бесснежной второй половины декабря и оттепели в конце месяца динамика накопления снежной толщи оказалась ниже многолетних данных. В итоге устойчивый снежный покров установился на четыре недели позже обычного [15, 16]. Однако, поскольку начало января и особенно его вторая декада оказались многоснежными, к середине зимы толщина снежного покрова достигла своих среднемноголетних значений.

Визуализация структурных изменений в слое свежеснежного покрова после длительного снегопада по диффузному отражению света. На момент начала наблюдений толщина новообразующегося слоя уже составляла 2 см. На второй день наблюдений (10 января) его толщина увеличилась до 5 см, при этом слабый снегопад не прекращался. На фототаблице (рис. 3) показаны формы снежинок, с которыми связана текстур-

ная неоднородность свежеснежного слоя (морфологическая классификация дана по работе [17]). В третий день наблюдений (11 января) синоптические условия не изменились: была морозная погода и шёл непрерывный слабый снегопад. Толщина новообразующегося снежного слоя составила 12 см. В нём заметно увеличилась толщина рыхлого прослоя за счёт выпадения снежинок-звёздочек (см. рис. 3, b , z) и появился четвёртый тонкий светлый прослой из игольчатых агрегатов (см. рис. 3, $в$), который перекрывал нижележащий рыхлый слой, образовавшийся за прошедшие сутки.

Таким образом, на третий день наблюдений в новообразующемся слое стала проявляться текстура в виде внутренней слоистости – слойков, которые можно считать элементарными единицами новообразующейся слоистой структуры в слое свежеснежного покрова. Текстура эта слойчатость связана со снежинками-звёздочками (см. рис. 3, b , z) и игольчатыми агрегатами (см. рис. 3, $в$). Следующие наблюдения (14 ян-

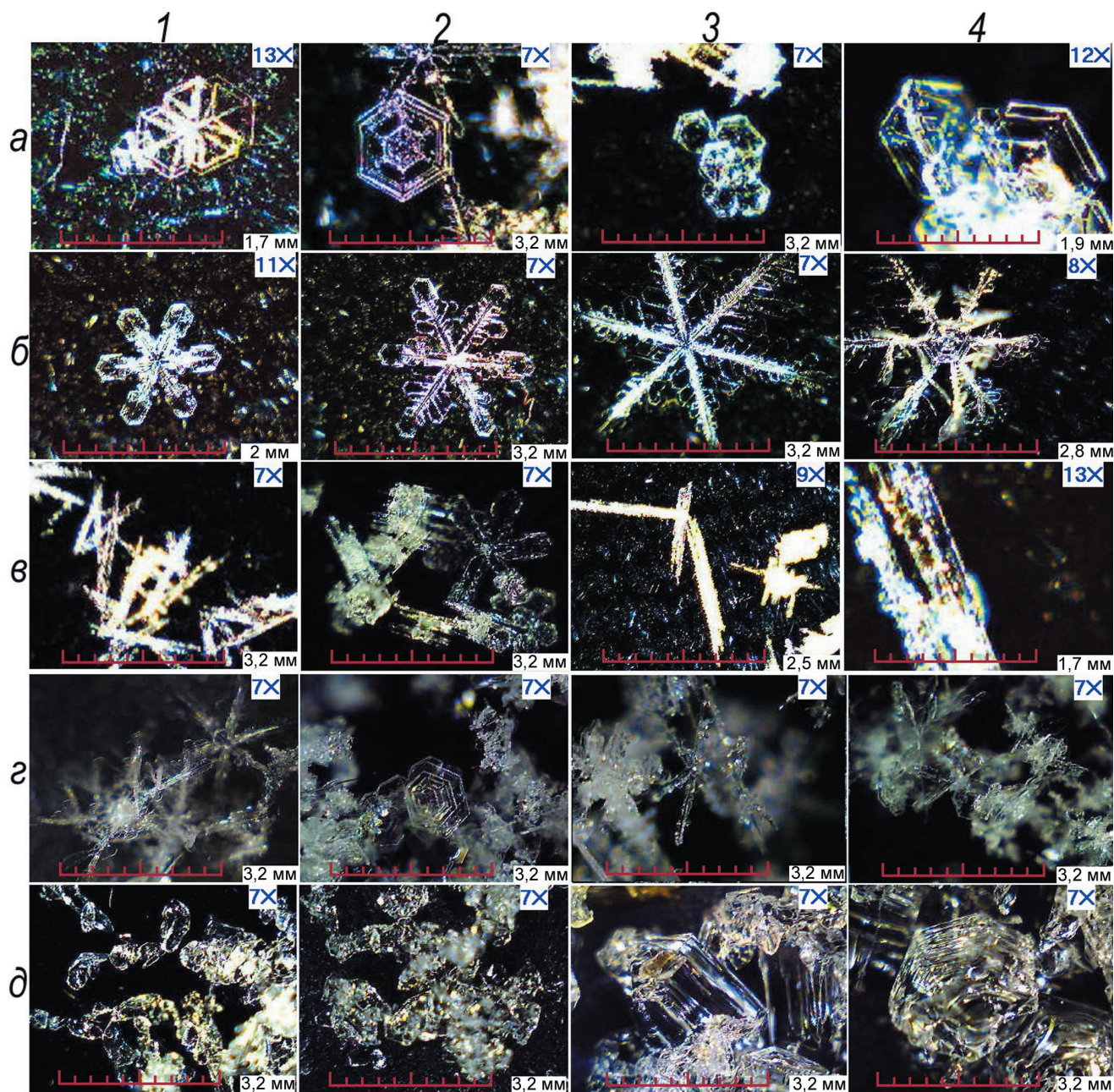


Рис. 3. Микрофотографии наиболее распространённых типов твёрдых осадков: пластинки *PPpl* – а1–а4; звёздочки *PPsd* – б1–б4, г1–г4; иглы *PPnd* – в1–в4; рыхлое строение свежевыпавшего снега с частичным сохранением первичной кристаллической структуры снежинок *DFdc* – д1–д4. 7× и др. – режим увеличения; 3,2 мм и др. – обозначение длины линейки, которая изменяется в зависимости от увеличения. Микросъёмка выполнена автором во время пробоотбора в период с 9 по 18 января 2013 г.

Fig. 3. Micrographs of the most common frozen precipitation types: plates (plate-like) *PPpl* – а1–а4; dendrites (six-fold star-like) *PPsd* – б1–б4, г1–г4; needles (needle-like) *PPnd* – в1–в4; loose structure of recently deposited snow with partly decomposed precipitation particles *DFdc* – д1–д4. 7× – zoom mode et al.; 3,2 mm et al. – ruler length designation. Micrographs were taken by the author during sampling from 01/09/2013 to 01/18/2013

варя) возобновились после двухдневного перерыва. За это время новообразующийся снежный слой увеличился до 15 см. На рис. 4 приведены сопряжённые графики, характеризующие дина-

мику изменений основных метеорологических параметров в условиях непрерывного снегопада и морозной погоды: прирост твёрдых осадков в водном эквиваленте *R*, мм; увеличение толщины

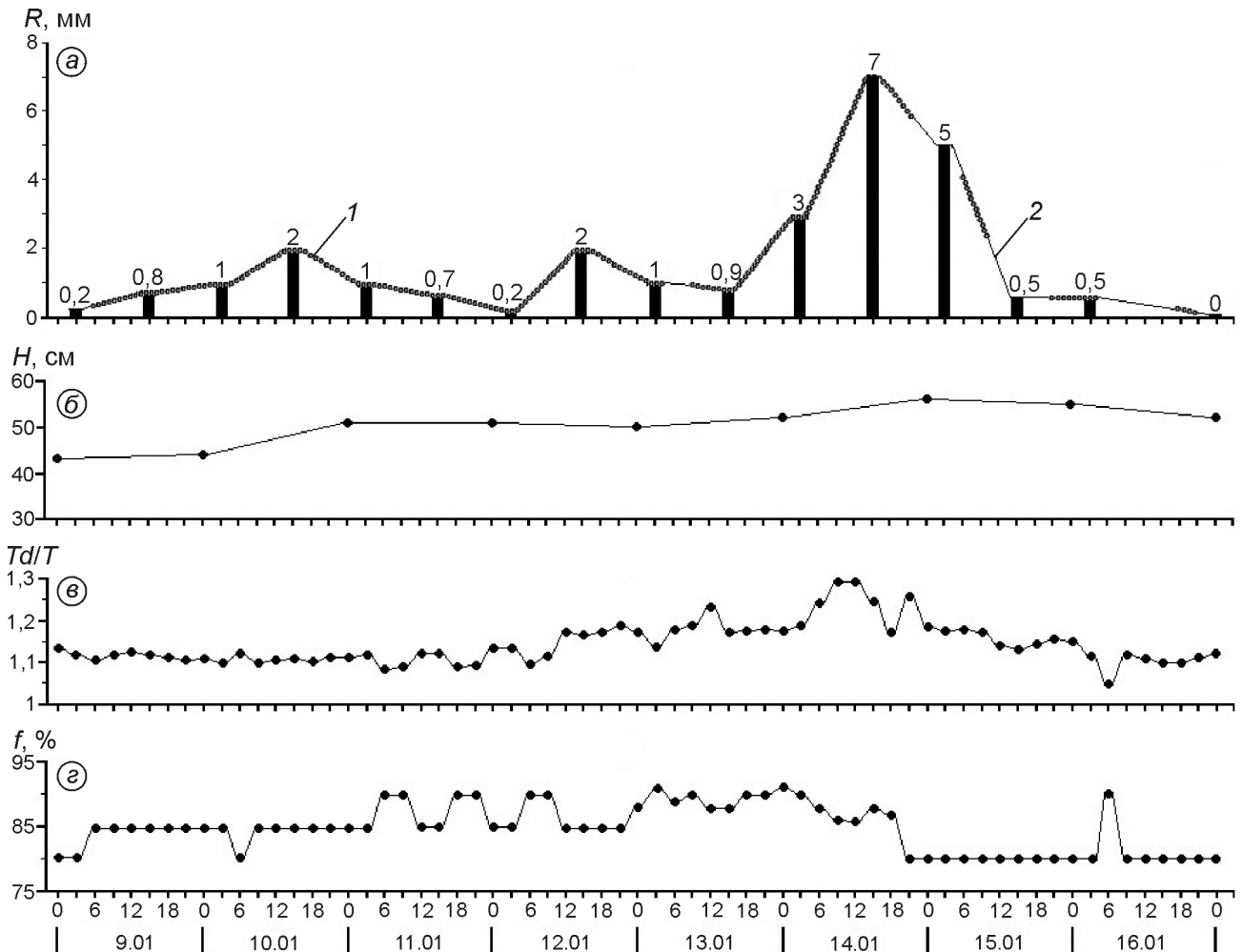


Рис. 4. Изменение основных метеопараметров, характеризующих погодные условия во время продолжительного снегопада:

a – приток твёрдых осадков в водном эквиваленте R , мм, где кривая линия отражает периоды непрерывности (1) и прерывности (2) снегопада; *b* – увеличение толщины снежного покрова H , мм; *c* – отношение температуры точки росы Td к температуре воздуха T ; *d* – относительная влажность воздуха f , %

Fig. 4. Changes in the main meteorological parameters characterizing weather conditions during a prolonged snowfall: *a* – solid precipitation increasing in water equivalent R , mm, where the curved line reflects the periods of continuity (1) and discontinuity (2) snowfall; *b* – the snow cover height increasing H , mm; *c* – the dew point temperature Td to the air temperature ratio T ; *d* – relative humidity f , %

снежного покрова H , см; отношение температуры точки росы Td к температуре воздуха T ; относительную влажность воздуха f , %. На графиках их значения показаны для каждого срока наблюдений с 9 по 16 января.

Отметим, что в условиях малой контрастности суточных значений температуры и влажности воздуха (см. рис. 4, *c*), которая наблюдалась с 9 по 11 января, в снежных осадках доминировали снежинки-звёздочки (см. рис. 3, *z*), что обеспечило преимущественное нарастание рыхлого слоя. Усиление контрастности данных пока-

зателей в период 12–14 января определили чередование снежинок-игл и снежинок-звёздочек, что обусловило заметность внутренней текстуры новообразующего слоя. Она стала заметной благодаря чередованию тёмных и светлых слоёв. Светлые слои сложены преимущественно снежинками-иглами (см. рис. 3, *v*), а тёмные – снежинками-звёздочками (см. рис. 3, *b*, *z*) и снежинками-пластинками (см. рис. 3, *a*). Предполагается, что снежинки-иглы и игольчатые агрегаты образуют более плотные слои, чем снежинки-звёздочки, поэтому в них

световой поток рассеивается сильнее и выглядят такие слойки светлее. Вместе с тем снежинки-звёздочки образуют очень рыхлые агрегаты. В них частично сохраняются характерные признаки кристаллического строения (см. рис. 3, *г*), за счёт чего слойки из снежинок-звёздочек более прозрачны для проходящего света и поэтому выглядят темнее.

На пятый день наблюдений (15 января) погодные условия изменились: средняя суточная температура воздуха понизилась с $-16,9$ до $-20,8$ °С; средние суточные показатели относительной влажности воздуха снизились с 88 до 80% (см. рис. 4, *г*); контраст между температурой воздуха и точкой росы уменьшился (см. рис. 4, *в*); в режиме выпадения твёрдых осадков отмечены перерывы (см. рис. 4, *а*). 16 января такая погода со снегопадом сохранялась всю первую половину дня, а во вторую снегопад прекратился. За эти два дня снег уплотнился. Сильные изменения произошли и в новообразованном слое. Если ещё 15 января в нём визуально наблюдалось чередование тёмных и светлых слойков (рис. 5, *а*), то 16 января контрастность между ними заметно снизилась, а 18 января тёмные слойки исчезли и весь новообразованный стратиграфически значимый слой снега стал мало различим от нижележащего слоя мелкозернистого снега (см. рис. 5, *б*), а его слойчатость, хотя и сохранилась, но стала менее заметной. Микрофотографии показали, что в результате суточных перепадов температур в новом слое произошла трансформация отложенных снежинок с образованием мелких округлых частиц *RGsr*. Они соединены шейками в цепочки и отдельные агрегаты (см. рис. 3, *д1*), которые мало отличаются от снежных зёрен из подстилающего слоя (см. рис. 3, *д2*). Такие скоротечные текстурные преобразования в новообразованном снежном слое произошли на фоне быстрого снижения относительной влажности воздуха и усиления мороза. Визуально контрастность слоистой структуры в новом слое снизилась, но не исчезла полностью. Новый стратиграфически значимый слой сохранил слоеватую структуру, но текстурно она стала менее выраженной.

Оптическая анизотропия снежных слоёв и визуализация стратиграфии снежного покрова. Использование экрана позволило установить оптическую анизотропию, связанную со структурной

неоднородностью снежной толщи. Установлено двухслойное строение снежной толщи. Верхний светлый горизонт сложен мелкими округлыми частицами *RGsr* (см. рис. 3, *д1–2*), а нижний тёмный – ограниченными кристаллами *FCso* (см. рис. 3, *д3*) и кристаллами глубинной изморози *DHla* (см. рис. 3, *д4*). Толщина светлого горизонта с учётом новообразованного слоя – 24 см, а тёмного – 26 см. Граница резкая, что обусловлено проявлением оптической неоднородности указанных снежных горизонтов, которая, вероятно, связана с различиями проявления термометаморфизма. Известно, что в сухом снеге при средней плотности $0,28$ г/см³ суточные колебания температуры воздуха проникают до глубины 50 см, ниже которой они полностью затухают [8]. В нашем случае толщина светлого слоя всего 24 см. Предполагается, что глубина проникновения суточных температурных колебаний воздуха и связанные с ними постседиментационные преобразования твёрдых осадков в светлом слое будут ограничиваться встречным диффузионным массопереносом паров почвенной влаги. Этот процесс возникает в нижней части снежного профиля в результате внутриснежной температурной инверсии (в подошве снежной толщи температура всегда выше, чем в её средней части). Возможность развития таких процессов в снежной толще показана в работах [18–21]. Следовательно, в нижней части снежной толщи кристаллообразование глубинной изморози контролируется как градиентом концентрации паров почвенной влаги, так и внутриснежной температурной инверсией.

Учитывая, как меняются размер кристаллов глубинной изморози, их форма, взаимное расположение и характер связей между ними (размер кристаллов изморози увеличивается к низу, столбчатые гранные кристаллы меняются на плоские пирамидальные призмы; см. рис. 5 и рис. 3, *д3–4*), можно предположить, что рост кристаллов больше контролируется градиентом концентрации водяного пара, благодаря которому обеспечивается постоянный приток паров почвенной влаги в зону кристаллизации. Внутриснежная температурная инверсия выступает своеобразным триггером, запуская механизм вертикального массопереноса паров почвенной влаги в нижнюю часть снежной толщи. Заметим, что температурный градиент в припочвен-

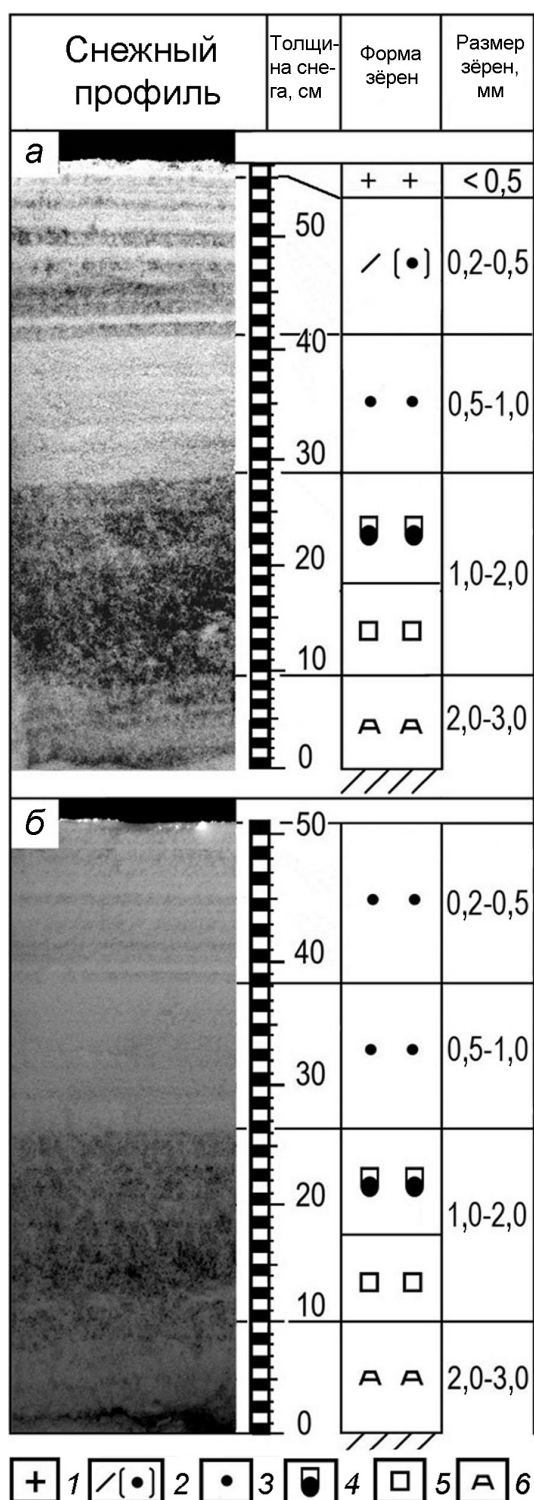


Рис. 5. Строение снежного профиля по состоянию:

а – на 15.01.2013 г.; б – на 18.01.2013 г. (пояснения см. в тексте); 1 – свежеснеживший снег *PP*; 2 – частично разрушенные снежинки и мелкие округлые зёрна *DF/RGsr*; 3 – мелкие округлые зёрна *RGsr*; 4 – округлые частицы с гранями *RGxf*; 5 – сплошные ограниченные частицы *FCso*; 6 – крупные бороздчатые кристаллы *DHla*. Съёмка и обработка фотографий выполнены автором

Fig. 5. The snow profile structure as of:

а – 15.01.2013; б – 18.01.2013 (explanations in the text); 1 – new-fallen snow (*PP*); 2 – partially destroyed snowflakes and small rounded grains *DF/RGsr*; 3 – small rounded grains *RGsr*; 4 – rounded particles with edges *RGxf*; 5 – solid faceted particles *FCso*; 6 – large grooved crystals *DHla*. Shooting and processing of photographs are done by the author

ной части снежной толщи может быть значительным. Наши измерения показали, что при толщине снега 50 см температура снега на поверхности почвы составляла $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, тогда как на высоте 20 см от её поверхности она понизилась до $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$. Предполагается, что в период наблюдений структурно-текстурные постседиментационные преобразования твёрдых осадков в верхней части снежной толщи в большей степени контролировались глубиной проникновения градиента температур воздуха и в меньшей степени — относительной влажностью воздуха. В то же время для нижней части снежной толщи структурно-текстурные преобразования граничных кристаллов и их рост обусловлены вертикальным диффузионным массопереносом паров почвенной влаги, обеспечивающим активный рост кристаллов глубинной изморози. Внутриснежная температурная инверсии в данном процессе играет вспомогательную роль.

Заключение

Описаны практические приёмы работы со светоотражательным экраном при визуализации структуры снежного профиля покрова по диффузному отражению света в оптическом диапа-

зоне спектра. Показана возможность выявления в снежной толще структурных неоднородностей на основе анализа цифровых фотографий, обработанных в графическом редакторе. Охарактеризованы особенности структурных изменений в новообразующемся снежном слое во время длительного снегопада и его эволюция после прекращения снегопада. Приведены микроморфологические признаки ледяных кристаллов, характеризующие оптическую анизотропию снежных слоёв. Выполненные исследования показали, что светоотражательный экран можно использовать в снеговедении в качестве инструмента для оптического мониторинга структурных неоднородностей сезонного снежного покрова и визуализации постседиментационных процессов, возникающих при его нарастании.

Благодарности. Работа выполнена по Государственному заданию Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН в рамках проекта П.10.3.2, регистрационный № АААА-А17-117021310142-5.

Acknowledgment. The work was carried out under the state assignment of the V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS in the framework of project П.10.3.2, registration № АААА-А17-117021310142-5.

Литература

1. Голубев В.Н., Петрушина М.Н., Фролов Д.М. Межгодовые вариации строения снежного покрова на территории России // Вестн. МГУ. Сер. 5. География. 2009. № 3. С. 16–25.
2. Sturm M., Holmgren J., Liston G.E. A seasonal snow cover classification system for local to global applications // Journ. of Climate. 1995. V. 8. № 5. P. 1261–1283.
3. Fierz C., Armstrong R.L., Durand Y., Etchevers P., Greene E., McClung D.M., Nishimura K., Satyawali P.K., Sokratov S.A. The Intern. Classification for Seasonal Snow on the Ground (UNESCO, IHP–VII, Technical Documents in Hydrology, N 83). Paris, IACS, 2009. 67 p.
4. Сократов С.А., Трошкина Е.С. Развитие структурно-стратиграфических исследований снежного покрова // МГИ. 2009. Вып. 107. С. 103–109.
5. Дюнин А.К. Механика метелей. Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1963. 380 с.
6. Голубев В.Н., Сократов С.А. Испарение снега в изотермических условиях // МГИ. 1992. Вып. 72. С. 205–214.

References

1. Golubev V.N., Petrushina M.N., Frolov D.M. *Mezhgodovyye variatsii stroeniya snezhnogo pokrova na territorii Rossii*. Interannual variations in the structure of snow cover on the territory of Russia. *Vestnik MGU. Seria 5. Geografia*. Moscow University Bulletin. Series 5. Geography. 2009, 3: 16–25. [In Russian].
2. Sturm M., Holmgren J., Liston G.E. A seasonal snow cover classification system for local to global applications. *Journ. of Climate*. 1995. V. 8 (5): 1261–1283.
3. Fierz C., Armstrong R.L., Durand Y., Etchevers P., Greene E., McClung D.M., Nishimura K., Satyawali P.K., Sokratov S.A. *The International Classification for Seasonal Snow on the Ground (UNESCO, IHP–VII, Technical Documents in Hydrology, N 83)*. Paris: IACS. 2009: 67 p.
4. Sokratov S.A., Troshkina Ye.S. Development of structural and stratigraphic studies of snow cover. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 2009. 107: 103–109. [In Russian].
5. Dyunin A.K. *Mekhanika meteley*. Blizzard mechanics. Novosibirsk: Publishing house of SO AN SSSR, 1963: 380 p. [In Russian].
6. Golubev V.N., Sokratov S.A. Evaporation of snow in isothermal conditions. *Materialy Glyatsiologicheskikh*

7. Казаков Н.А. Текстура снежной толщи как детерминированный фрактал // МГИ. 2007. Вып. 101. С. 183–187.
8. Кузьмин П.П. Физические свойства снега. Л.: Гидрометеиздат, 1957. 179 с.
9. Handbook of Snow: Principles, Processes, Management and Use / Eds.: D.M. Gray, D.H. Male. Canada, Toronto: Pergamon Press., 1981. 776 p.
10. Bohren C.F., Barkstrom B.R. Theory of the optical properties of snow // Journ. of Geophys. Research. Oceans and Atmospheres. 1974. V. 79 (30). P. 4527–4535. <https://doi.org/10.1029/JC079i030p04527>.
11. Colbeck S.C. The layered character of snow cover // Reviews of Geophysics. 1991. V. 29 (1). P. 81–96. <https://doi.org/10.1029/90RG02351>.
12. Harper J.T., Bradford J.H. Snow stratigraphy over a uniform depositional surface: spatial variability and measurement tools // Cold Regions Science and Technology. 2003. V. 37 (3). P. 289–298. [https://doi.org/10.1016/S0165-232X\(03\)00071-5](https://doi.org/10.1016/S0165-232X(03)00071-5).
13. Schweizer J., Kronholm K. Snow cover spatial variability at multiple scales: Characteristics of a layer of buried surface hoar // Cold Regions Science and Technology. 2007. V. 47 (3). P. 207–223. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2006.09.002>.
14. Зайцев А.С. Наука о цвете и живопись. М.: Искусство, 1986. 147 с.
15. Электронный ресурс: <http://meteork.ru/obzor.shtml> (дата обращения 11.06.2020).
16. Электронный ресурс: <http://www.pogodaiklimat.ru/monitor.php?id=23804> (дата обращения 07.05.2020).
17. Фирц Ш., Армстронг Р.Л., Дюран И., Этхеви П., Грин И., МакКланг Д.М., Нишимура К., Сатьявали П.К., Сократов С.А. Международная классификация для сезонно-выпадающего снега (руководство к описанию снежной толщи и снежного покрова) // МГИ. 2012. № 2. 80 с.
18. Гуртовая Е.Е. Некоторые вопросы температурного режима снежного покрова // Роль снежного покрова в природных процессах. М.: Изд-во АН СССР, 1961. С. 121–131.
19. Sokratov S.A., Maeno N. Effective water vapor diffusion coefficient of snow under a temperature gradient // Water Resour. Res. 2000. V. 36. P. 1269–1276. <https://doi.org/10.1029/2000WR900014>.
20. Sokratov S.A. Parameters influencing the recrystallization rate of snow // Cold Regions Science and Technology. 2001. V. 33 (2–3). P. 263–274. [https://doi.org/10.1016/S0165-232X\(01\)00053-2](https://doi.org/10.1016/S0165-232X(01)00053-2).
21. Pinzer B. R., Schneebeli M., Kaempfer T.U. Vapor flux and recrystallization during dry snow metamorphism under a steady temperature gradient as observed by time-lapse micro-tomography // The Cryosphere. 2012. № 6. P. 1141–1155. <https://doi.org/10.5194/tc-6-1141-2012>.
22. *Issledovaniy. Data of Glaciological Studies. 1992, 72: P. 205–214. [In Russian].*
7. Kazakov N.A. The texture of the snow mass as a deterministic fractal. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy. Data of Glaciological Studies. 2007, 101: 183–187. [In Russian].*
8. Kuzmin P.P. *Fizicheskiye svoystva snezhnogo pokrova. Physical features of snow cover. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1957: 179 p. [In Russian].*
9. Handbook of Snow: Principles, Processes, Management and Use. Eds.: D.M. Gray, D.H. Male. Canada, Toronto: Pergamon Press., 1981: 776 p.
10. Bohren C.F., Barkstrom B.R. Theory of the optical properties of snow. Journ. of Geophys. Research. Oceans and Atmospheres. 1974, 79 (30): 4527–4535. <https://doi.org/10.1029/JC079i030p04527>.
11. Colbeck S.C. The layered character of snow cover. Reviews of Geophysics. 1991, 29 (1): 81–96. <https://doi.org/10.1029/90RG02351>.
12. Harper J.T., Bradford J.H. Snow stratigraphy over a uniform depositional surface: spatial variability and measurement tools. Cold Regions Science and Technology. 2003, 37 (3): 289–298. [https://doi.org/10.1016/S0165-232X\(03\)00071-5](https://doi.org/10.1016/S0165-232X(03)00071-5).
13. Schweizer J., Kronholm K. Snow cover spatial variability at multiple scales: Characteristics of a layer of buried surface hoar. Cold Regions Science and Technology. 2007, 47 (3): 207–223. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2006.09.002>.
14. Zaytsev A.S. *Nauka o tsvete i zhivopis'. Color science and painting. Moscow: Art, 1986: 147 p. [In Russian].*
15. <http://meteork.ru/obzor.shtml> (reference date 11 June 2020). [In Russian].
16. <http://www.pogodaiklimat.ru/monitor.php?id=23804> (date of treatment May 7, 2020). [In Russian].
17. Fierz C., Armstrong R.L., Durand Y., Etchevers P., Greene E., McClung D.M., Nishimura K., Satyawali P.K., Sokratov S.A. Mezhdunarodnaya klassifikatsiya dlya sezonno-vypadayushchego snega (rukovodstvo k opisaniyu snezhnoy tolshchi i snezhnogo pokrova). Intern. classification for seasonally falling snow (a guide to the description of the snow mass and snow cover). *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy. Data of Glaciological Studies. 2012, 2: 80 p. [In Russian].*
18. Gurtovaya Ye.Ye. Some questions of the temperature regime of snow cover. *Rol' snezhnogo pokrova v prirodnykh processah. The role of snow cover in natural processes. M.: Publishing house of the Academy of Sciences of the USSR, 1961: 121–131. [In Russian].*
19. Sokratov S.A., Maeno N. Effective water vapor diffusion coefficient of snow under a temperature gradient. Water Resour. Res. 2000, 36: 1269–1276. <https://doi.org/10.1029/2000WR900014>.
20. Sokratov S.A. Parameters influencing the recrystallization rate of snow. Cold Regions Science and Technology. 2001, 33 (2–3): 263–274. [https://doi.org/10.1016/S0165-232X\(01\)00053-2](https://doi.org/10.1016/S0165-232X(01)00053-2).
21. Pinzer B.R., Schneebeli M., Kaempfer T.U. Vapor flux and recrystallization during dry snow metamorphism under a steady temperature gradient as observed by time-lapse micro-tomography. The Cryosphere. 2012, 6: 1141–1155. <https://doi.org/10.5194/tc-6-1141-2012>.