

УДК 551.5

ПАССИВНАЯ ДОЗИМЕТРИЯ ЕСТЕСТВЕННОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ПОТОКА В СНЕЖНОМ ПОКРОВЕ В УСЛОВИЯХ РАЗНОЙ ЗАПЫЛЕННОСТИ ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ

© 2026 г. М. П. Тентюков^{1,2*}, В. П. Лютоев³, Б. Д. Белан¹, Е. Г. Языков⁴, Д. В. Симоненков¹, И. С. Соболев⁵, Р. Ю. Гаврилов⁴, О. В. Кустов¹, В. С. Бучельников⁴

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

²Сыктывкарский государственный университет им. Питирима Сорокина, Сыктывкар, Россия

³Институт геологии им. Н.П. Юшкина ФИЦ Коми НЦ Уральского отделения РАН, Сыктывкар, Россия

⁴Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

⁵ООО “Гео Сервис”, Томск, Россия

*e-mail: tentukov@yandex.ru

Поступила в редакцию 01.07.2025 г.

После доработки 13.09.2025 г.

Принята к публикации 29.12.2025 г.

Предложен пионерный метод пассивной дозиметрии для оценки светопропускания снежной толщи в ультрафиолетовом диапазоне (УФ-пропускание) в условиях разной запыленности приземной атмосферы. Апробация метода выполнена на территории двух научных полигонов ИОА СО РАН (г. Томск): обсерватории “Фоновая” и пригородном полигоне “БЭК” зимой 2022/23 г., а также на двух фоновых участках: “Ботсад СГУ” (г. Сыктывкар) и “Турунтаево” (Томский регион). Наблюдения на фоновых участках проведены в зимы 2023/24 и 2024/25 гг. соответственно. Глубину проникновения коротковолновой радиации в снег оценивали путём экспонирования пассивного дозиметра ультрафиолетового излучения. Его основу составили датчики с искусственными нанокристаллами периклаза. Накопленный в них сигнал фотостимулированного перехода $Mn^{3+} + e^- \rightarrow Mn^{2+}$ определяли в камеральных условиях с использованием радиоспектрометра. Полу

ченые результаты показали возможность использования пассивной дозиметрии УФ-пропускания снега для обнаружения запыленности снежного покрова при разных условиях снегонакопления. В ходе исследований выявлены также некоторые неоднородности ослабления УФ-потока в снежной толще, связанные с наличием на некоторых её глубинах ледяных прослоев.

Ключевые слова: искусственные нанокристаллы периклаза, пассивный дозиметр УФ-радиации, снежный покров, пылевое загрязнение снега

DOI: 10.7868/S2412376526010073

ВВЕДЕНИЕ

Физические свойства снега как ледяной осадочной породы и как ледяного кристалла не тождественны. Принимается, что сезонный снежный покров представляет собой осадочную ледяную пористую породу, сложенную одним минералом — водой. Вода в этой ледяной осадочной породе находится одновременно во всех своих фазовых состояниях (твёрдом, жидком, газообразном) (Рихтер, 1948). При этом ледяные

кристаллы снега образуют стенки пор, обеспечивая тем самым прочностную структуру самой снежной толщи. В результате постоянно протекающих процессов сублимации поры снега, в отличие от других пористых веществ, всегда насыщены водяным паром (Окуджава, 1956). Его конденсация на ледяных стенках пор приводит к образованию субохлажденной плёночной капиллярной влаги, которая при больших размерах пор “выстилает” их поверхность, а в тонких образует капиллярную жидкость, которая в узких

наноразмерных капиллярах “заменена” плёночной влагой. В отличие от капиллярной жидкости, плёночная влага на поверхности ледяного кристалла представляет собой граничную фазу, структура которой настолько изменена под действием соседней поверхности, что осуществляется переход воды из кристаллического в жидкое аморфное (квазиджидкое) состояние (Дерягин и др., 1989). Известно, что такая квазиджидкая плёнка влаги обладает растворяющими свойствами (Федосеева, 2003; Федосеева, Федосеев, 2010).

Все вышеперечисленные свойства снега и как породы, и как кристалла не тождественны, поскольку при объяснении некоторых микро-, макрофизических свойств снежного покрова они не могут быть заменены друг на друга. Одним из таких нетождественных свойств снега и как породы, и как кристалла являются их особенности рассеивать и поглощать лучистую энергию. Эти индивидуальные особенности снежных слоёв обусловлены тем, что между количеством проходящего света сквозь снежный кристалл, плотностью снега и размером снежных кристаллов имеется определённая связь (Bohren, Barkstrom, 1974). Но при этом надо заметить, что в существующих представлениях о слоистой структуре снежного покрова (Colbeck, 1991) упоминание о ледяных кристаллах, слагающих эти слои, даётся только в контексте морфологического описания снежных зёрен (Фирц и др., 2012).

Постановка и обоснование проблемы. В настоящее время фиксируется все нарастающий объём пыле-аэрозольной массы в тропосфере, которая за последнее столетие возросла более чем вдвое (Mahowald et al., 2010). И если на долю антропогенного аэрозоля приходится более 10% всех аэрозольных частиц (Ивлев, 2011), то в промышленных центрах она возрастает уже до 45%. Между тем минеральная фракция аэрозольного вещества, выступающая основной рассеивающей свет компонентой в атмосфере, является также поглощающей. Результаты исследований (Jacobson, 2004; Flanner et al., 2012; Skiles et al., 2015) показывают, что осевшее аэрозольное вещество увеличивает поглощение солнечного излучения в видимом диапазоне. Процесс сопровождается повышением температуры поверхности снежного покрова и ускоренным таянием снега. Отмечено, что в условиях роста запылённости атмосферы данное обстоятельство из-за недостатка наблюдений и измерений, постседиментационное радиационное воздействие аккумуля-

лированной пыле-аэрозольной массы в снежной толще часто игнорируется или сильно ограничивается в климатических и гидрологических моделях (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019).

Известно, что, энергетический баланс и фотохимическая активность снежного покрова во многом зависят от проникновения лучистой энергии в снег (Domine et al., 2013). При этом ослабление потока проявляет большую зависимость от морфологии снежных зёрен (Libois et al., 2013), чем от других макрофизических параметров снежного покрова (альbedo, плотность). И хотя физические свойства в оптических моделях всё больше рассматриваются в контексте исследований микроструктуры снега (Kinar, Pomeroy, 2015; Robledano et al., 2023), всё же большая часть этих работ посвящены оптическому излучению длинноволновой части спектра.

Цель работы — с помощью устройства пассивной дозиметрии ультрафиолетового потока и ЭПР-спектрометра сравнить послойное ослабление проникающей УФ-радиации в снежную толщу в зависимости от условий снегонакопления и разной запылённости приземной атмосферы.

МЕТОДИКА

Районы исследований. Исследования по ослаблению ультрафиолетового потока в снежной в условиях разной запылённости приземной атмосферы производились зимой 2022/23 г. на двух научных полигонах ИОА СО РАН — обсерватории “Фоновая” (в 60 км к западу от г. Томска) и базовом экспериментальном комплексе “БЭК” (на восточной окраине г. Томска). В качестве фоновых выбраны снегомерные площадки “Ботсад СГУ” (г. Сыктывкар, Европейский Север России) и “Турунтаево” (Томский регион, Западная Сибирь). Эти исследования производились зимой 2023/24 г и 2024/25 гг. соответственно.

Отмечено, что в рамках данной работы термины “снежный покров” и “снежная толща” рассматриваются в объёме понятий, приведённых в Международной классификации снежного покрова (Фирц и др. 2012). Для контрастного выделения стратиграфии снежной толщи применяли специальный светопоглощающий экран. При описании структурно-текстурных особенностей строения снежной толщи использовали рисунки по фотографии. Описание методики опубликовано ранее (Тентюков, 2021).

Оценка ослабления проникновения солнечной радиации в снежную толщу в ультрафиолетовом диапазоне. Оценка ослабления естественного ультрафиолетового потока в снежном покрове условиях разной запылённости приземной атмосферы выполнена с применением пионерного способа пассивной ультрафиолетовой (УФ) дозиметрии (Tentyukov et al., 2022). Реализация способа заключается в экспонировании в снежной толще специальных фоточувствительных элементов пассивного УФ-дозиметра, представляющих собой кварцевые ампулы с прокалёнными при 1000 С искусственными нанокристаллами периклаза (MgO), с последующей ЭПР-регистрацией в них фотостимулированного перехода $Mn^{3+} + e^- \rightarrow Mn^{2+}$ под действием УФ-излучения длинами волн менее 350 нм. Высокая спектральная чувствительность описанного датчика ограничивается областью средневолнового естественного УФ-излучения (200–300 нм).

На рис. 1 приведены результаты оценки спектральной чувствительности ионов Mn^{2+} . Край собственного поглощения оксида магния располагается в области вакуумного ультрафиолета с $\lambda < 180$ нм. Следовательно, фиксируемые переходы в системе примесных ионов под действием излучения в области ближнего ультрафиолета и солнечного света связаны с поглощением квантов света на объёмных и поверхностных дефектах собственной и примесной природы (Tentyukov et al., 2022).

Система пассивной дозиметрии ослабления естественного ультрафиолетового потока

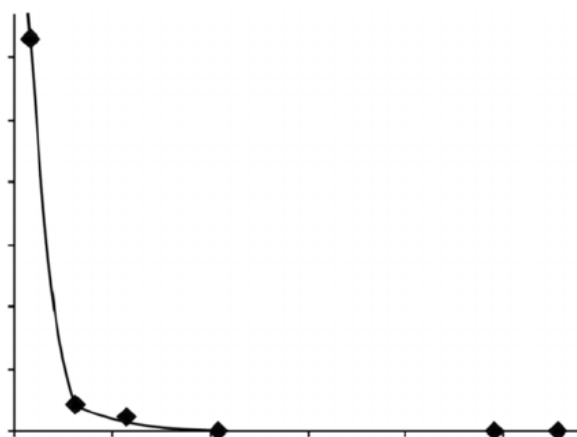


Рис. 1. Спектральная эффективность генерации Mn^{2+} в MgO

Fig. 1. Spectral efficiency of Mn^{2+} generation in MgO

в снежной толще включает два блока (рис. 2). Первый — УФ-детектор — представлен радиоспектрометром электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), а второй — пассивный УФ-дозиметр — выполнен в виде штока с закреплёнными на нём в определённом порядке УФ-датчиками. Эти датчики представляют собой герметизированные кварцевые ампулы с наполнителем, в качестве которого выступают искусственные нанокристаллы периклаза, содержащие оптически активные примесные ионы Mn^{3+} , характеризующиеся селективной фоточувствительностью в УФ-диапазоне. Апробация способа показала, что пассивный УФ-дозиметр в таком исполнении позволяет оценить глубину проникающей коротковолновой радиации в снежную толщу с учётом особенностей снегонакопления без нарушения целостности снежного покрова.

Согласно полевой методике, на обсерватории “Фоновая” и пригородном полигоне “БЭК” кварцевые ампулы (8 шт.) с порошком MgO закреплялись на штоке с интервалом 4 см и погружались в снежный покров на глубину 24 см. При этом верхняя ампула располагалась над снежной поверхностью на высоте 4 см. Время экспонирования — 24 ч. На двух фоновых участках ампулы на штоке устанавливались с интервалом 5 см, а глубина их установки для площадки “Ботсад СГУ” составила 30, а для “Турунтаево” — 60 см. Время экспонирования в обоих случаях

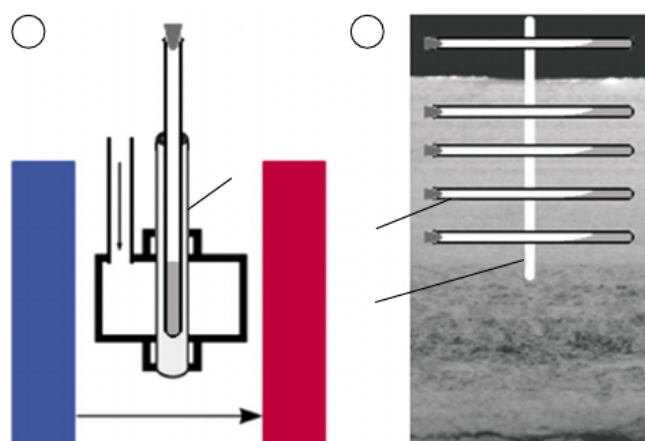


Рис. 2. Система пассивной ЭПР-дозиметрии ультрафиолетовой прозрачности снежного покрова, включающего регистрирующий УФ-детектор (а) и накопительный пассивный УФ-дозиметр (б) (дополнительные пояснения в тексте)

Fig. 2. A system for passive EPR dosimetry of ultraviolet transparency of snow cover, including a recording UV detector (a) and a cumulative passive UV dosimeter (b) (additional explanations in the text)

составило 49 ч. После экспонирования УФ-датчики помещались светонепроницаемый контейнер и транспортировались в лабораторию, где в камеральных условиях и при комнатной температуре осуществлялась ЭПР-детектирование фотостимулированного сигнала перехода $Mn^{3+} + e^- \rightarrow Mn^{2+}$, накопившегося в УФ-датчиках в ходе их экспонирования в снежной толще. При проведении УФ-дозиметрии и регистрации/детектирования спектров ЭПР с использованием радиоспектрометра вещество из ампул не извлекалось.

Измерение счётной концентрации аэрозолей.

Измерения счётной концентрации аэрозолей на фоновой и городской территориях за период от начала снегостава и на момент проведения снегомерной съёмки выполнены с применением аэрозольных спектрометров Grimm 1.108 и Grimm 1.109. Измерительные приборы установлены в обсерватории “Фоновая” и Академгородке, в 2 км от пригородного полигона “БЭК” соответственно. Замеры аэрозольными спектрометрами производились ежечасно в течение 10 мин с предварительной продувкой 3 мин. Концентрация приземного аэрозоля измерялась в воздушных потоках, которые отбирались изокинетическим методом из аэродинамических воздухозаборных труб на высоте 4.5–5.5 м. Расход воздушного потока в спектрометре составляет 1.2 л/мин. Для сопоставимости измеряемых данных, расчёт суммарной счётной концентрации велся от нижнего порога измерения дисперсности 0.3 мкм более грубого спектрометра Grimm 1.108.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Распределения счётной и объёмной концентрации аэрозолей в приземном слое воздуха в условиях фоновой и городской территории. Сравнительный анализ хода измеренной счётной (N) и рассчитанной из неё объёмной (C_v) концентраций аэрозоля показали существенные колебания данных показателей на двух полигонах. Отмечено, что диапазоны измеренной счётной концентрации объединены по размерам частиц в две фракции: 0.3–1 мкм (субмикронная) и крупнее 1 мкм (грубодисперсная). Затем из данных измерений счётных концентраций произведена оценка объёмов, занимаемых каждой фракцией в единице объёма воздуха, путём пересчёта по формуле:

$$C_v = \pi / 6 \sum (N_i d_i^3),$$

где N_i — счётная концентрация в каждом суммируемом измерительном диапазоне, $дм^{-3}$; d_i —

средний (геометрический) диаметр каждого диапазона измерения ($d_i - d_{i+1}$); C_v — объёмная концентрация аэрозольных частиц просуммированных диапазонов, $мкм^3/дм^3$.

Результаты измерений счётной концентрации аэрозоля для обоих полигонов показали сравнительно небольшую разницу средних значений счётной концентрации субмикронных частиц (N , $дм^{-3}$). Для обсерватории “Фоновая” и района пригородного полигона “БЭК” они составили 63 715 и 81 975 $дм^{-3}$ соответственно.

При этом диапазон в суммируемом измерительном диапазоне субмикронных частиц (0.3–1 мкм) составил для первого полигона 21 000–152 000 $дм^{-3}$, а второго — 32 000–207 000 $дм^{-3}$. Предполагается, что столь заметная разница для пригородного района возникает за счёт выбросов пара, обусловленных работой охлаждающих устройств — градирен городской ТЭЦ. Эти выбросы увеличивают в приземной атмосфере концентрацию облачных капель. Последующая коалесценция облачных капель приводит к их укрупнению. Процесс сопровождается ростом объёмной концентрации частиц (C_v , $мкм^3/дм^3$). Вероятно, этим объясняется, что размерный интервал грубодисперсных частиц для района пригородного полигона “БЭК” составил 250–1200 $мкм^3/дм^3$, тогда как для обсерватории “Фоновая” — 240–850 $мкм^3/дм^3$. Возможно также, что колебания объёмной концентрации грубодисперсной фракции аэрозолей над пригородным районом обусловлены более активным слиянием облачных капель (коалесценцией) и агрегированием субмикронных частиц. Если принять, что рост объёмной концентрации частиц в большей мере связан с турбулизацией воздуха, то она должна быть сильнее выражена над городской застройкой, чем над фоновой территорией. Данное предположение подтверждается наличием линейной связи между размерными параметрами (табл. 1–2).

При сравнении табл. 1–2, замечено, что на фоновом полигоне объёмная концентрация субмикронных частиц в отличие от грубодисперсных очень хорошо коррелирует со счётной концентрацией аэрозолей. Тогда как для пригородного полигона ситуация выглядит несколько иначе. Там объёмная концентрация грубодисперсных частиц характеризуется наличием средневыраженной положительной связи со всеми остальными параметрами. Возможно, это связано с включением в выборку увеличенного раз-

Таблица 1. Коэффициенты корреляции размерных параметров аэрозольного поля над обсерваторией “Фоновая”
Table 1. Correlation coefficients of dimensional parameters of the aerosol field above the “Fonovaya” observatory

Параметры	$N_i(0.3 < d < 1)$	$N_i(d > 1)$	$C_v(0.3-1)$	$C_v(>1)$
$N_i(0.3 < d < 1)$	1			
$N_i(d > 1)$	0,89	1		
$C_v(0.3-1)$	0.99	0.91	1	
$C_v(>1)$	-0.11	0.03	-0.09	1

Таблица 2. Коэффициенты корреляции размерных параметров аэрозольного поля над районом пригородного полигона “БЭК”
Table 2. Correlation coefficients of dimensional parameters of the aerosol field above the suburban area of the BEK testing ground

Параметры	$N_i(0.3 < d < 1)$	$N_i(d > 1)$	$C_v(0.3-1)$	$C_v(>1)$
$N_i(0.3 < d < 1)$	1			
$N_i(d > 1)$	0.93	1		
$C_v(0.3-1)$	0.99	0.92	1	
$C_v(>1)$	0.49	0.37	0.56	1

мерного диапазона грубодисперсных частиц, но, возможно, что более вероятно — это результат зимнего регионального эолового морфолитоге-неза (Евсеева и др., 2017), проявляющийся в раз-ной степени выраженности в аэрозольном поле над обсерваторией “Фоновая” и районом приго-родного полигона “БЭК”.

Исследования светопропускания снежного по-крова: состояние проблемы. В простейшем случае однородной снежной толщи её светопропускан-ие описывается уравнением Бугера–Ламбер-та, согласно которому интенсивность $I(\lambda)$ света с длиной волны λ уменьшается с глубиной его проникновения в толщу на расстояние l по экс-поненциально по закону:

где $I_0(\lambda)$ — интенсивность света на входе в веще-ство, $\alpha(\lambda)$ — показатель ослабления или экстинк-ции, представляющий сумму коэффициентов рассеяния и поглощения света. В случае снежно-го покрова основной вклад в экстинкцию вносит рассеяние света, особенно для УФ-компонен-та. В то же время Варрен с соавторами (Warren et al., 2006) указывал, что наличие аэрозольный примесей также оказывает существенное влия-ние на профиль внутриснежной освещённости. Включение в снежный покров минеральных пы-

левых примесей увеличивает поглощённую часть излучения.

Анализ доступной литературы не выявил пуб-ликаций, связанных с изучением профильной динамики ослабления солнечного излучения в ультрафиолетовом диапазоне в снежном по-крове. В связи с этим ниже приводятся резуль-таты полевых наблюдений по глубине проник-новения в снежную толщу солнечной радиации УФ-диапазоне в условиях разной запылённости приземной атмосферы.

Пассивная дозиметрия ослабления естественного ультрафиолетового потока в снежном покрове в ус-ловиях разной запылённости приземной атмосферы. Полевые наблюдения на обсерватории “Фоновая” и пригородном полигоне “БЭК” (Томский регион, Западная Сибирь) проводились зимой 2022/23 г. На момент проведения наблюдений (30.01.2023) мощность снежной толщи составила 62 и 60 см соответственно (рис. 3). Время экспонирования составило 24 ч. При сравнении полученных резуль-татов интенсивность фотостимулированного пере-хода $Mn^{3+} + e^- \rightarrow Mn^{2+}$ в нанокристаллах периклаза оказалась заметно выше для обсерватории “Фоно-вая” (см. рис. 3), чем для пригородного полигона “БЭК”. Данное обстоятельство подтверждает воз-можность применения УФ-детектора для выявле-ния пылевого загрязнения снежного покрова.

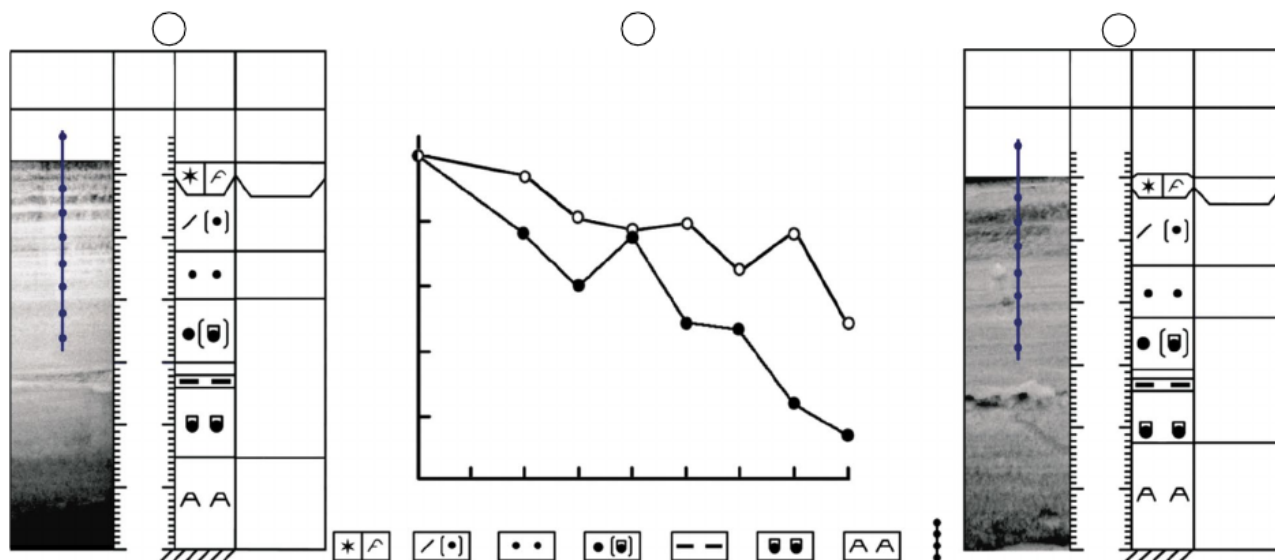


Рис. 3. Послойное поглощение, проникающей в снег солнечной радиации в ультрафиолетовом диапазоне на обсерватории “Фоновая” (б, 1) и пригородном полигоне “БЭК” (б, 2) в условиях разной запылённости.

Условные обозначения: H , см — высота снежного покрова, F — форма снежных зёрен (классификация дана по работе (Фирц и др., 2012): 1 — свежеснеживший снег в виде плоских и неправильной формы снежинок (PPir/PPsd); 2 — недавно отложенный снег с частично разрушенными и округлившимися снежинками (DFbk/ RGSr); 3 — мелко-среднезернистый снег сложен округлыми агрегатами из снежных зёрен (RGlR); 4 — округлые снежные зёрна и зёрна с огранкой (RGlR/RGxf); 5 — оледенелый слой; 6 — зёрна с огранкой (RGxf); 7 — глубинная изморозь (DHxr) 8 — положение УФ-датчиков на штоке в снежной толще; E , мм — размер снежных зёрен. Примечание: структурно-текстурное строение снежного профиля на обсерватории “Фоновая” (а) и пригородного полигона “БЭК” (б) выполнено с использованием рисунков по фотографии

Fig. 3. Layer-by-layer absorption of solar radiation penetrating into snow in the ultraviolet range at the Fonovaya observatory (б, 1) and the BEK suburban testing ground (б, 2) under conditions of different dustiness.

Legend: H , cm — snow cover depth, F — snow grain shape (classification is given according to (Firtz et al., 2012): 1 — freshly fallen snow in the form of flat and irregularly shaped snowflakes (PPir/PPsd); 2 — recently deposited snow with partially destroyed and rounded snowflakes (DFbk/ RGSr); 3 — fine- to medium-grained snow consists of rounded aggregates of snow grains (RGlR); 4 — rounded snow grains and faceted grains (RGlR/RGxf); 5 — icy layer; 6 — grains with faceting (RGxf); 7 — deep hoar frost (DHxr); 8 — position of UV sensors on the rod in the snow mass; E , mm — size of snow grains. Note: the structural and textural structure of the snow profile at the Fonovaya observatory (а) and the BEK suburban testing ground (б) was made using drawings from a photograph

В то же время сопоставление полученных результатов по УФ-прозрачности снежного покрова на обеих площадках выявили неоднородности в ослаблении проникающего УФ-потока в снежной толще (см. рис. 3). Данный оптический феномен вне зависимости от степени запылённости приземной атмосферы, одинаково фиксировался и на “Фоновой”, и на “БЭК”. При этом для первой площадки отмечается два пика интенсивности ЭПР-сигнала — на глубине 16 и 24 см, а для “БЭК” только один — на глубине 12 см. Отмечена также определённая приуроченность обнаруженного оптического феномена к оледенелым снежным слоям, расположенных в верхней части снежной толщи (см. рис. 2, а–б). Это даёт основание полагать, что его проявление в верхней части снежной толщи связано с механизмом образования слоёв таяния-замерзания, которые, в свою очередь,

являются результатом температурно-градиентного метаморфизма.

Пассивная дозиметрия при искусственном ослаблении естественного ультрафиолетового потока в снежном покрове: модельный эксперимент. Результаты, полученные для обсерватории “Фоновая” и пригородного полигона “БЭК”, показали, что в условиях запылённости приземной атмосферы УФ-пропускание снежной толщи в её верхней части уменьшается. При этом на глубине 12–20 см обнаруживается повышение интенсивности УФ-потока. В обоих случаях эти слои оказались приуроченными к снежным горизонтам, характеризующимся наличием уплотнённых прослоев, образовавшихся в верхней части снежной толщи в результате температурно-градиентного метаморфизма. Проверка возможности проявления данного

эффекта и при иных условиях снегонакопления была осуществлена на снегомерной площадке “Ботсад СГУ” (Сыктывкар, Европейский Север России). Параллельно с этой проверкой был выполнен модельный эксперимент по искусственному ослаблению УФ-прозрачности снежной толщи. Его цель — оценить изменение глубины проникновения солнечной радиации в ультрафиолетовом диапазоне, как если бы существовали загрязнённые прослойки снега. Для имитации наличия последних один из двух параллельно установленных пассивных УФ детекторов имел УФ-датчики с затенённой нижней полусферой.

мощность снежного покрова зимой 2023/24 г. на момент начала эксперимента (20.02.2024) составила 70 см и оставалась таковой всё время эксперимента. Отмечено, что перед этим в течение нескольких дней фиксировались частые снегопады разной интенсивности, что обусловило формирование очень рыхлого поверхностного слоя (рис. 4, а). Структурно-текстурная характеристика строения снежной толщи дана по Международной классификации снежного покрова (Фирц и др., 2012). Описание строения снежной толщи выполнено по рисунку, сделанному по фотографии.

Описание снежного покрова на момент наблюдений. На снегомерной площадке “Ботсад СГУ”

Сравнивая между собой строение снежной толщи, можно отметить, что структура снеж-

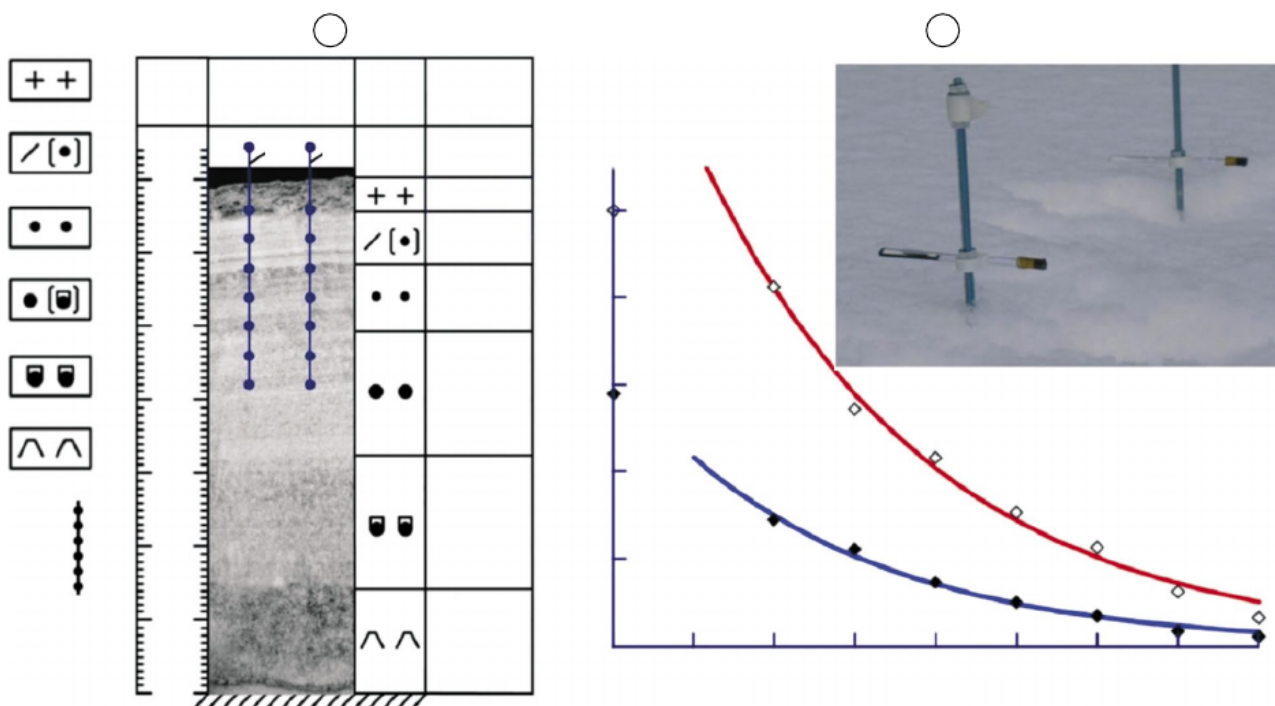


Рис. 4. Структурно-текстурное строение снежного профиля на фоновой площадке “Ботсад СГУ” (а) на момент проведения модельного эксперимента по оценке проникающей в снег солнечной радиации в ультрафиолетовом диапазоне при разной засветке УФ-датчиков (б), где: 1 — с затенением нижней полусферы, 2 — без затенения нижней полусферы. На врезке (а) показано положение УФ-детекторов с затенёнными (3) и незатенёнными (4) УФ-датчиками.

Условные обозначения: H , см — высота снежного покрова, F — форма снежных зёрен (классификация дана по работе (Фирц и др., 2012): 1 — свежесыпавший снег (PP); 2 — мелкозернистый снег (RGsr); 3 — мелко-среднезернистый снег сложен непрозрачными округлыми агрегатами из снежных зёрен (RGlR); 4 — округлые снежные зерна и зерна с огранкой (RGlR/RGxf); 5 — зёрна с огранкой (RGxf); 6 — округляющаяся глубинная изморозь (DHxr); 7 — положение УФ-датчиков на штоке в снежной толще; E , мм — размер снежных зёрен

Fig. 4. Structural and textural composition of the snow profile at the background site of the SSU Botsad (a) at the time of the model experiment to assess the solar radiation penetrating into snow in the ultraviolet range with different illumination of the UV sensors (b), where: 1 — with shading of the lower hemisphere, 2 — without shading of the lower hemisphere. The inset (a) shows the position of the UV detectors with shaded (3) and unshaded (4) UV sensors.

Legend: H , cm — snow cover height, F — snow grain shape (classification given according to (Firtz et al., 2012): 1 — freshly fallen snow (PP); 2 — fine-grained snow (RGsr); 3 — fine- to medium-grained snow is composed of opaque rounded aggregates of snow grains (RGlR); 4 — rounded snow grains and grains with facets (RGlR/RGxf); 5 — grains with facets (RGxf); 6 — rounded deep hoar (DHxr); 7 — position of UV sensors on the rod in the snow mass; E , mm — size of snow grains

ной толщи на площадке “Ботсад СГУ” отличается от таковой на двух полигонах (“Фоновая” и “БЭК”, Томский регион) как толщиной, так и последовательностью слоёв. Так, если общим для обоих научных полигонов верхняя часть снежной толщи, равно как и нижняя несут следы активного температурно-градиентного метаморфизма, то для площадки “Ботсад СГУ” характер залегания снежных слоёв показывает, что нарастание снежной толщи шло в условиях низких температур и при отсутствии оттепелей. В снежной толще выделяется 6 основных слоёв (см. рис. 4, а).

Нижний слой сыпучий, сложен кристаллами глубинной изморози. Выше него лежит слой крупнозернистого снега с огранкой. Этот слой перекрывается снежным горизонтом, образованный осевшим снегом. Он полностью представлен среднеразмерными снежными зёрнами. На этом слое залегает мелкозернистый снежный горизонт, состоявший из мелких снежных зёрен. Сверху этот слой перекрыт сухим рыхлым свежавыпавшим снегом (см. рис. 4, а). В целом верхняя половина снежной толщи представлена горизонтом рыхлого осевшего снега, в котором выделяются слои мелко/среднезернистого снега, тогда как нижняя, формирование которой происходило в условиях более низких температур, выполнена слоями снежных зёрен с огранкой и ледяных кристаллов глубинной изморози, образовавшихся в результате температурно-градиентного метаморфизма ранее выпавших снегопадов (ноябрь–декабрь).

Описание модельного эксперимента и его результаты. В снежную толщу на небольшой поляне установлены два пассивных УФ-дозиметра с восьмью УФ-датчиками на каждом. При этом у одного УФ-дозиметра все УФ-датчики были с затенением нижней полусферы (см. врезку на рис. 4, б). Время экспонирования составило 24 ч. Полученные результаты показали, что затенение нижней полусферы сильно сказалось на расчётных показателях УФ-прозрачности снега. При этом в обоих случаях спад УФ-потока с увеличением глубины установки датчиков в снежную толщу подчиняется уравнению Бугера–Ламберта.

По показателю α , который для датчиков с затенённой нижней полусферы оказался заметно выше, можно считать, что наличие примесей в снежной толще оказывает существенное влияние на УФ-пропускание снега и, следовательно,

на внутриснежное альbedo. При этом сопоставление полученных результатов (см. рис. 4, б) со структурой снежного профиля показало (см. рис. 4, а), что уплотнения снега (светлые прослои) видимые на глубинах 8 и 16 см оказались недостаточно плотными чтобы заметно повлиять на ослабление с глубиной УФ-потока. Отмечено, что погода во второй и третьей декадах января на обсерватории “Фоновая” и пригородном полигоне “БЭК” характеризовалась кратковременными потеплениями, в отличие от погодной обстановки на площадке “Ботсад СГУ”. Это послужило причиной появления в верхней части снежной толщи на площадках “Фоновая” и “БЭК” плотных прослоев таяния-замерзания, сложенных более крупными снежными зёрнами (см. рис. 3, а, в), образование которых — результат температурно-градиентного метаморфизма. Следовательно, снежные слои, образовавшиеся в условиях “спокойного” снегонакопления и слои, сформировавшиеся в результате температурно-градиентного метаморфизма, по-разному ослабляют проникновение естественного ультрафиолетового потока в снежную толщу. При этом высокие значения I/I_0 для ампул с затенённой нижней полусферой дают основание полагать, что пыле-аэрозольная масса, аккумулярованная в снежной толще, оказывает определённое влияние на внутриснежное альbedo. Но насколько на это влияет запылённость снега, предстоит ещё выяснить.

Оценка глубины проникновения солнечного излучения в УФ-диапазоне: полевые наблюдения на снегомерной площадке “Турунтаево” (Томский регион, Западная Сибирь). Отмечено следующее. Из работ, связанных с оценкой глубины проникновения солнечного излучения в снежную толщу, были доступны три (Кузьмин, 1957; Curl et al., 1972; Richardson, Salisbury, 1977). Так, в первой работе на основе вычисленных значений послойного поглощения солнечной радиации при разных величинах коэффициента оптической прозрачности снежной толщи даётся заключение, что снежный покров высотой более 60 см можно рассматривать “... как совершенный изолятор защищающий почву от внешнего термического воздействия как со стороны проникновения солнечных лучей, так и в отношении суточных колебаний температур” (с. 142–143, цит. по: Кузьмин, 1957).

В то же время в двух других (Curl et al., 1972; Richardson, Salisbury, 1977) даны результаты полевых наблюдений, существенно превышающие

первые. В этих работах данные получены не расчётным методом, а в результате прямых измерений, которые производились с использованием высокочувствительных спектрометров. В первой работе приводятся результаты измерений, показывающие возможность проникать солнечный свет до глубины 110 см, а другой — 198 см. Отмечено, что все выполненные измерения касались только длинноволнового диапазона.

Из доступных же работ, касающихся исследований спектральной прозрачности снега в коротковолновом диапазоне, известны следующие: O'Brien, 1972; Marano, 1979; Gerland et al., 1999; Gerland et al., 2000; Священников и др., 2015. Не затрагивая методической составляющей наблюдений за проникновением коротковолновой радиации в снежную толщу, отмечено, что общим недостатком использованных устройств — наличие эффекта старения фотосенсора под действием УФ-излучения. Другим недостатком, ограничивающее их применение для послыжных наблюдений за проникающей в снежную толщу УФ-радиацией, выступают конструкционные сложности фотоприёмного устройства (вес прибора и его размеры, наличие кабеля, связывающее датчик с детектором). Из-за этого любая перестановка в снежной толще прибора с его сопутствующей гарнитурой с целью измерить ослабление проникающей солнечной радиации с глубиной нарушает текстуру и стратиграфию снежной толщ.

Поэтому приводимые ниже результаты по оценке ослабления естественного ультрафиолетового потока в снежной толще, полученной с использованием пассивного УФ-дозиметра, состоящего из УФ-датчиков на основе искусственных нанокристаллов периклаза, позволяют по-новому организовать исследования светопропускания снежного покрова в УФ-диапазоне.

Особенности строения снежной толщ¹. Всю первую половину зимы нарастание снежного покрова происходило в результате сильных и частых снегопадов (использовались метеоданные м/с “Томск”). Однако следовавшие за ними

¹ Описание стратиграфии снежной толщ и её рисунок по фотографии (рис. 5, а) составлены на основе характеристики снежного разреза, заложенного в 4 м от места экспонирования пассивного УФ-детектора в снежной толще. Положение пассивных УФ-датчиков *in situ* вскрыто после завершения эксперимента путём расчистки фронтальной стенки перед их извлечением из снежной толщ (5, б) (фоновая площадка “Турунтаево”, Томская область).

оттепели сопровождались кратковременным таянием и оседанием снега, что нашло своё отражение в образовании несколько слоёв таяния—замерзания, свидетельствующих об активном температурно-градиентном метаморфизме. В итоге в нижней части снежной толщ сформировались слои крупнозернистого снега с ограниченной (1) и кристаллами глубинной изморози (2), 14 и 16 см соответственно (рис. 5, а).

Во вторую половину зимы снегонакопление шло в условиях холодной погоды и вплоть до первой пятидневки марта без оттепелей. В этой части снежной толщ выделяется два горизонта (см. рис. 5, а; горизонт 3—4). Горизонт (3) представляет собой переходный слой сложенный мелко-, среднезернистым снегом. Его перекрывает горизонт (4) мелкозернистого снега. К моменту проведения наблюдений верхняя часть снежной толщ, представленная снежными горизонтами 3 и 4. Для обоих характерно наличие скрытослоистой текстуры. В совокупности они образуют снежный горизонт суммарной толщ до 25 см (см. рис. 5, а).

Описание эксперимента и его результаты. Эксперимент выполнен зимой в 2024/25 г. на снеговой площадке “Турунтаево”. Площадка расположена в краевой части поляны, прилегающей к опушке с редкостойным древостоем представленным берёзой и берёзово-осиновым подростом с включением невысокого кустарника и с одиночных елей. На момент проведения наблюдений (09.03.2025) высота снежного покрова в точке установки пассивного УФ-детектора составила 55 см. На штоке длиной 70 см установлено одиннадцать УФ-датчиков с интервалом 5 см, из которых самый верхний установлен в 5 см над снежной поверхностью. Чтобы показать их положение *in situ*, после завершения эксперимента выполнена расчистка фронтальной стенки снежного шурфа (см. рис. 5, б). Кратковременная засветка УФ-датчиков не сказалась на результатах (см. рис. 5, в). Продолжительность экспонирования пассивного УФ-дозиметра составила примерно 47 ч (время, даты установки и снятия — 11:08 09.03.2025; 10:36 11.03.2025 соответственно).

После извлечения пассивного УФ-дозиметра из снега все УФ-датчики были помещены в светонепроницаемый контейнер, который затем был передан в лабораторию. Регистрация и измерение параметров ЭПР-сигнала фотостимулированного перехода $Mn^{3+} + e^{-} \rightarrow Mn^{2+}$, накопленно-

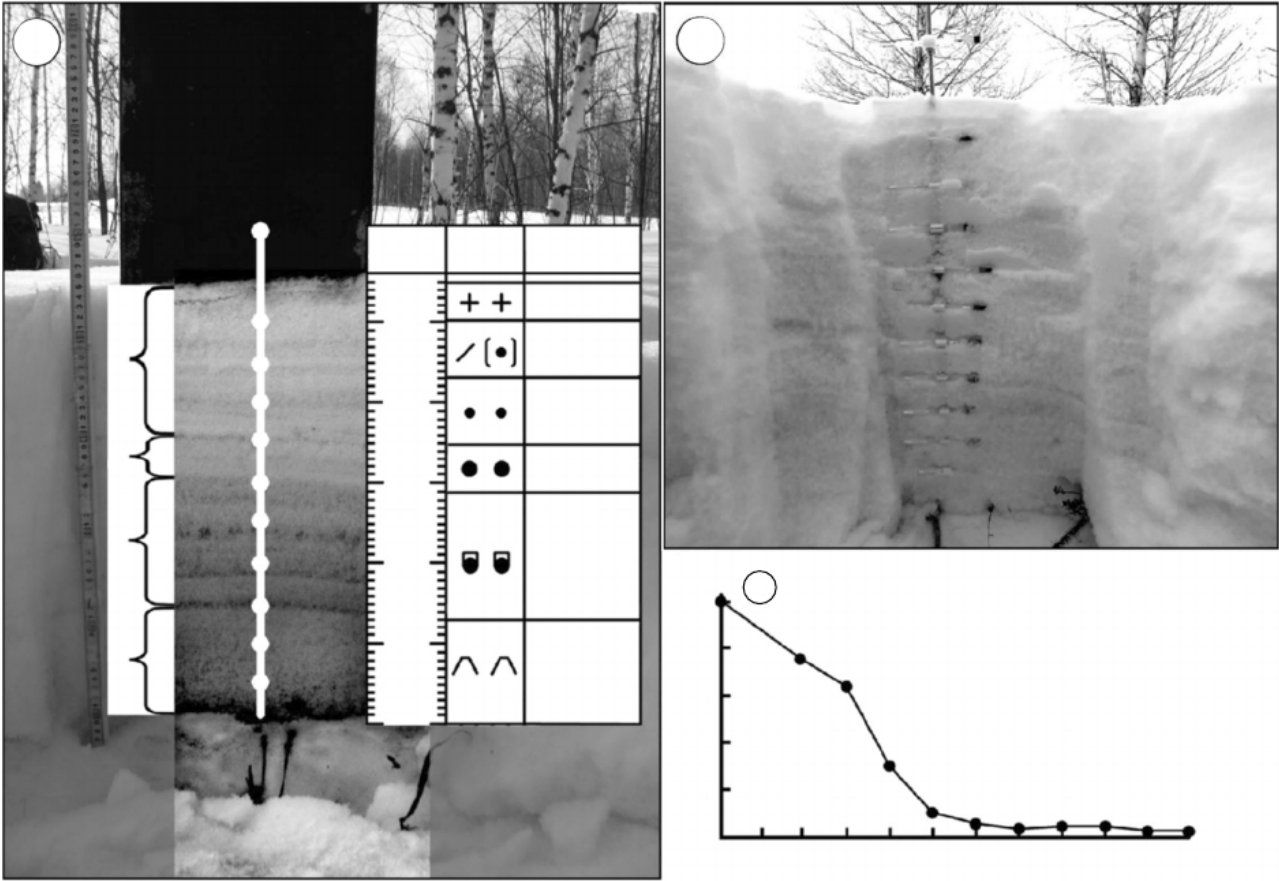


Рис. 5. Оценка глубины проникновения в снег солнечной радиации в ультрафиолетовом диапазоне на фоновой площадке “Турунтаево”: структурно-текстурное строение снежного профиля на фоновой площадке “Турунтаево” с местонахождением пассивного УФ-дозиметра в снежной толще (а); расчистка фронтальной стенки разреза с расположением УФ-датчиков после их экспонирования в снежной толще перед извлечением пассивного УФ-дозиметра из снега (б), изменение интенсивности засветки УФ-датчиков на разной глубине (в).

Примечание: описание условных обозначений приведено на рис. 3

Fig. 5. Estimation of the penetration depth of solar radiation in the ultraviolet range into snow at the Turuntayevo background site: structural and textural structure of the snow profile at the Turuntayevo background site with the location of the passive UV dosimeter in the snow (a); clearing of the front wall of the section with the location of the UV sensors after their exposure in the snow before removing the passive UV dosimeter from the snow (b), change in the intensity of illumination of the UV sensors at different depths (c).

Note: the description of the symbols is given in Fig. 3

го в УФ-датчиках, выполнены с использованием радиоспектрометра. Полученные результаты показаны на рис. 5, в.

Как следует из графика, глубина проникновения УФ-радиации составляет примерно 25 см. В связи с этим интересно было их сопоставить с результатами, полученными ранее в эксперименте с засветкой нижней полусферы (см. рис. 4, б) на площадке “Ботсад СГУ”. Если принять во внимание, что интенсивность ослабления естественного ультрафиолетового потока в снежном покрове снега в определённой мере зависит от запылённости приземной атмосферы,

то следует признать, что запылённость снежного покрова на фоновой площадке “Ботсад СГУ” (г. Сыктывкар) ниже, чем на площадке “Турунтаево” (Томский регион). В свою очередь, ослабление потока УФ-радиации на площадке “Турунтаево” ниже, чем на обсерватории “Фоновая” и пригородного полигона “БЭК”. Но, возможно, эти различия отражают межгодовые особенности формирования снежного покрова в Томском регионе, и вполне очевидно, что при увеличении числа наблюдений результаты могут меняться.

Таким образом, результаты апробации метода пассивной дозиметрии ослабления естествен-

ного ультрафиолетового потока в снежном покрове, полученные на четырёх пространственно разделённых площадках и в разное время, показали возможность его применения при оценке послынного ослабления УФ-пропускания снега в разных условиях снегонакопления и разной запылённости приземной атмосферы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Апробация метода пассивной дозиметрии ослабления естественного ультрафиолетового потока в снежном покрове в условиях запылённости приземной атмосферы выполнена на четырёх пространственно разделённых модельных площадках. Сравнение полученных результатов показало, что флуктуации глубины проникновения в снег солнечной радиации в ультрафиолетовом диапазоне связаны не только с региональными особенностями снегонакопления, но также с наличием оледенелых прослоев, образовавшихся в результате температурно-градиентного метаморфизма.

Предложенные метод пассивной дозиметрии ослабления естественного ультрафиолетового потока в снежном покрове и система для её осуществления могут быть востребованы при мониторинге пылевого загрязнения снежного покрова, а также при моделировании процессов энергообмена между атмосферой и снежным покровом в удалённых и малообжитых районах, включая промышленные районы и целинные тундры в Арктике.

Методу пассивной дозиметрии ослабления естественного ультрафиолетового потока в снежном покрове присущ интегральный и сравнительный характер измерений, что позволяет использовать его при качественной оценке влияния атмосферного пылевого загрязнения на внутриснежное альbedo. Кроме того, данные о радиационных свойствах снежного покрова в УФ-диапазоне могут быть использованы при верификации методов и алгоритмов дистанционного зондирования снежного покрова при изучении радиационного баланса, а также моделирования процессов энергообмена между атмосферой и снежным покровом.

Полученные результаты пассивной дозиметрии послынного ослабления естественного ультрафиолетового потока в снежном покрове представляют определённый интерес в области химической актинометрии при послынной оцен-

ке активности фотоиндуцированных реакций в снежной толще, а также в области метеорологии для коррекции радиоярких характеристик снежного покрова в ультрафиолетовом диапазоне при дистанционном зондировании снежного покрова; для сравнительной оценки процессов радиационного (внутриснежного) таяния в условиях разной запылённости снежного покрова и связанного с ним изменений альbedo снежного покрова.

Финансирование. Исследование проводилось в рамках государственного задания Института оптики атмосферы СО РАН. Съёмка показателей УФ-детектора на основе искусственного нанокристаллического порошка MgO (периклаза) методом ЭПР производилась в ЦКП “Геонаука” Института геологии им. Н.П. Юшкина ФИЦ Коми НЦ УрО РАН. Методическая часть выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-17-00082).

Acknowledgments. The study was conducted within the framework of the state assignment of the Institute of Atmospheric Optics SB RAS. The survey of the UV detector readings based on artificial nanocrystalline powder of MgO (periclase) using the EPR method was carried out at the Geoscience Collective Use Center of the N.P. Yushkin Institute of Geology of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. The methodological part was carried out with the support of the Russian Science Foundation (grant No. 23-17-00082).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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.
- Евсеева Н.С., Квасникова З.Н., Каширо М.А., Батманова А.С.* Современный эоловый морфолитогенез холодного периода года на юго-востоке зоны подтайги Западно-Сибирской равнины // Геосферные исследования. 2017. № 2. С. 6–13
- Ивлев Л.С.* Аэрозольное воздействие на климатические процессы // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24. № 5. С. 392–410.
- Кузьмин П.П.* Физические свойства снежного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1957. 179 с.
- Окуджава А.М.* Теплопроводность влажного снега. Снег и талые воды. М.: Изд-во АН СССР, 1956. С. 22–30.
- 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.

- Священников П.Н., Уразильдеева А.В., Курочкин Ю.Н., Иванов Б.В., Чистяков К.В., Divin D., Hudson S.* Спектральный состав отражённой и проникающей в глубь снежного покрова коротковолновой радиации в районе посёлка Баренцбург (Шпицберген) // *Лёд и Снег*. 2015. Т. 55. № 3. С. 67–72. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2015-3-67-72>
- Тентюков М.П.* Визуализация структурно-текстурных изменений в новообразующемся снежном слое при длительном снегопаде // *Лёд и Снег*. 2021. Т. 61. № 2. С. 222–231. <https://doi.org/10.31857/S2076673421020083>
- Федосеева В.И.* Физико-химические закономерности миграции химических элементов в мёрзлых грунтах и снеге. Якутск: Ин-т мерзловедения СО РАН, 2003. 138 с.
- Федосеева В.И., Федосеев Н.Ф.* Сорбция молибдат-анионов квазижидкой плёнкой на поверхности дисперсного льда // *Коллоидный журнал*. 2010. Т. 72. № 4. С. 574–576.
- Фицц 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 гляциол. исследований*. 2012. Вып. 2. 80 с.
- Bohren C.F., Barkstrom B.R.* Theory of the Optical Properties of Snow // *J. Geophysical Research. Oceans and Atmospheres*. 1974. V. 70 (30). P. 4527–4535. <https://doi.org/10.1029/JC079i030p04527>
- 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>
- Curl Jr.H., Hardy J.T., Ellermeier R.* Spectral Absorption of Solar Radiation in Alpine Snowfields // *Ecology*. 1972. V. 53 (6). P. 1189–1194. <https://doi.org/10.2307/1935433>
- Domine F., Bock J., Voisin D., Donaldson D.J.* Can We Model Snow Photochemistry? Problems with the Current Approaches // *J. Phys. Chem. A*. 2013. V. 117. P. 4733–4749. <https://doi.org/10.1021/jp3123314>
- Flanner M., Liu X., Zhou C., Penner J.* Enhanced Solar Energy Absorption by Internally-Mixed Black Carbon in Snow Grains // *Atmos. Chem. Phys.*, 2012. V. 12. P. 4699–4721. <https://doi.org/10.5194/acp-12-4699-2012>
- Gerland S., Winther J.-G., Orbaek J.-B., Liston G., Orisland N.-A., Blanko A., Ivanov B.V.* Physical and Optical Properties of Snow Covering Arctic Tundra and Svalbard // *Hydrological Processes*. 1999. V.13. P.2331–2343.
- Gerland S., Liston G.E., Winther J.-G., Orbaek J.B., Ivanov B.V.* Attenuation of Solar Radiation in Arctic Snow: Field Observation and Modeling // *Annals of Glaciology*. 2000. V. 31. P. 364–368.
- Jacobson M.-Z.* Climate Response of Fossil Fuel and Biofuel Soot, Accounting for Soot's Feedback to Snow and Sea Ice Albedo and Emissivity // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. D21201 p. <https://doi.org/10.1029/2004JD004945>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2019).* “Summary for Policymakers”, in IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate // *Электронный ресурс*. URL: <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/summary-for-policymakers/> (Дата обращения: 23.08.2025).
- Kinar N.J., Pomeroy J.W.* Measurement of the Physical Properties of the Snowpack // *Reviews of Geophysics*. 2015. V. 53 (2). P. 481–544. <https://doi.org/10.1002/2015RG000481>
- Libois Q., Picard G., France J.L., Arnaud L., Dumont M., Carmagnola C.M., King M.D.* Influence of Grain Shape on Light Penetration in Snow // *The Cryosphere*. 2013. № 7. P. 1803–1818. <https://doi.org/10.5194/tc-7-1803-2013>
- Mahowald N.M., Kloster S., Engelstaedter S., Moore J.K., Mukhopadhyay S., McConnell J.R., Albani S., Doney S.C., Bhattacharya A., Curran M.A.J., Flanner M.G., Hoffman F.M., Lawrence D.M., Lindsay K., Mayewski P.A., Neff J., Rothenberg D., Thomas E., Thornton P.E., Zender C.S.* Observed 20th Century Desert Dust Variability: Impact on Climate and Biogeochemistry // *Atmos. Chem. Phys.* 2010. № 10. P. 10875–10893. <https://doi.org/10.5194/acp-10-10875-2010>
- Marano M.* Computer Modeling Snow Relationships in the Big Eau Pleine Watershed, Wisconsin. University of Wisconsin-Stevens Point, College of Natural Resources. 1979. 105 p. <http://digital.library.wisc.edu/1793/79528>
- O'Brien H.W.* Observations of the Ultraviolet Spectral Reflectance of Snow / CRREL, Cold Regions Res. and Eng. Lab., Hanover, N.H. Rep. 1972. P. 77–27. https://archive.org/details/DTIC_ADA046349.
- Richardson S.R., Salisbury F.B.* Plant Response to the Light Penetrating Snow // *Ecology*. 1977. V. 58 (5). P. 1152–1158. <https://doi.org/10.2307/1936936>
- Robledano A., Picard G., Dumont M., Flin F., Arnaud L., Libois Q.* Unraveling the Optical Shape of Snow // *Nature Communications*. 2023. V. 14. 3955 p. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39671-3>
- Skiles S.M., Painter T.H., Belnap J., Holland L., Reynolds R.L., Goldstein H.L., Lin J.* Regional Variability in Dust-on-Snow 30 Processes and Impacts in the Upper Colorado River Basin // *Hydrological Processes*, 2015. V. 29. P. 5397–5413.
- Tentyukov M.P., Lyutov V.P., Belan B.D., Simonenkov D.V., Golovataya O.S.* Ultraviolet Radiation Detector Based on Artificial Periclase Nanocrystals (MgO) // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2022, V. 35 (1). P. 89–96.
- Warren S.G., Brandt R.E., Grenfell T.C.* Visible and Near-Ultraviolet Absorption Spectrum of Ice from Transmission of Solar Radiation into Snow // *Appl Opt.* 2006. V. 45 (21). P. 5320–34. <https://doi.org/10.1364/ao.45.005320>

Citation: *Tentyukov M.P., Lyutov V.P., Belan B.D., Yazikov E.G., Simonenkov D.V., Sobolev I.S., Gavrilov R. Yu., Kustov O.V., Buchelnikov V.S. Passive Dosimetry of Natural Ultraviolet Flux in Snow Cover Under Conditions of Different Dustiness of the Surface Atmosphere. Led i Sneg. Ice and Snow. 2026, 66 (1): 91–104. [In Russian]. doi: 10.7868/S2412376526010073*

Passive Dosimetry of the Natural Ultraviolet Flux in a Snow Cover Under Conditions of Different Dustiness of the Surface Atmosphere

© 2026 M. P. Tentyukov^{a,b,#}, V. P. Lyutov^c, B. D. Belan^a, E. G. Yazikov^d, D. V. Simonenkov^a, I. S. Sobolev^e, R. Yu. Gavrilov^d, O. V. Kustov^a, V. S. Buchelnikov^d

^aV.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia

^bPitirim Sorokin Syktyvkar State University, Syktyvkar, Russia

^cN.P. Yushkin Institute of Geology FRC Komi SC, UB RAS, Syktyvkar, Russia

^dNational Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

^eOOO “Geo Service”, Tomsk, Russia

[#]e-mail: tentyukov@yandex.ru

Received July 1, 2025; revised September 13, 2025; accepted December 29, 2025

A pioneering method of passive dosimetry is proposed for assessing the light transmission of snow cover in the ultraviolet range (UV- transmission) under conditions of different dustiness in the near-surface. The method was tested at two scientific sites of the Institute of Atmospheric Optics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IAO SB RAS, city of Tomsk): the observatory Fonovaya and the BEK suburban site in the winter of 2022/23, as well as at two background stations: the “SSU Botsad” (Syktyvkar) and “Turuntayevo” (Tomsk region). Observations at the background sites were carried out in the winters of 2023/24 and 2024/25, respectively. The penetration depth of shortwave radiation into snow was estimated by exposing a passive ultraviolet radiation dosimeter. The dosimeter was based on sensors with artificial periclase nanocrystals. The signal of the photostimulated transition $\text{Mn}^{3+} + e^- \rightarrow \text{Mn}^{2+}$ accumulated in them was determined in the laboratory conditions using a radio spectrometer. The results obtained demonstrated the possibility of using passive dosimetry UV-transmission of snow to detect dustiness of the snow cover under different conditions of snow accumulation. The research also revealed some inhomogeneities in the extinction of the UV flux in the snow depth, associated with the presence of ice on some levels in the depth.

Keywords: artificial periclase nanocrystals, passive dosimeter, ultraviolet transparency of snow, snow cover, dust pollution of snow

REFERENCES

- Deryagin B.V., Kiseleva O.A., Sobolev V.D., Churaev N.V.* Flow of Non-Freezing Water in Porous Bodies. *Voda v Dispersnyh Sistemah*. Water in Dispersed Systems. Moscow: Chemistry, 1989: 101–16 [In Russian].
- Evseeva N.S., Kvasnikova Z.N., Kashiro M.A., Batmanova A.S.* Modern Aeolian Morpholithogenesis of the Cold Period of the Year in the Southeast of the Subtaiga Zone of the West Siberian Plain. *Geosfernyye Issledovaniya*. Geosphere Research. 2017, 2: 6–13 [In Russian].
- Ivlev L.S.* Aerosol Impact on Climate Processes. *Optika Atmosfery i Okeana*. Optics of the Atmosphere and Ocean. 2011, 24 (5): 392–410. [In Russian].
- Kuzmin P.P.* *Fizicheskiye svoystva snezhnogo pokrova*. Physical Properties of Snow Cover. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1957: 179. [In Russian].
- Okudzhava A.M.* Thermal Conductivity of Wet Snow. Snow and Melt Water. Moscow: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1956: 22–30 [In Russian].
- Richter G.D.* The Role of Snow Cover in the Physical-Geographical Process. Proceedings of the Institute of Geography of the USSR Academy of Sciences. Issue 40. Moscow-Leningrad: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1948: 171 [In Russian].
- Svyashchennikov P.N., Urazgildeeva A.V., Kurochkin Yu.N., Ivanov B.V., Chistyakov K.V., Divin D., Hudson S.* Spectral Composition of Shortwave Radiation

- Reflected and Deep Penetrating into Snow Near the Barentsburg Settlement (Svalbard). *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2015, 55 (3): 67–72.
<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2015-3-67-72> [In Russian].
- Tentyukov M.P. Visualization of Structural and Textural Changes in a Newly Formed Snow Layer During Long-Term Snowfall. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2021, 61 (2): 222–231.
<https://doi.org/10.31857/S2076673421020083> [In Russian].
- Fedoseeva V.I. *Fiziko-khimicheskiye zakonomernosti migratsii khimicheskikh elementov v merzlykh gruntakh i snege*. Physicochemical Regularities of Migration of Chemical Elements in Frozen Soils and Snow. Yakutsk: Permafrost Institute SB RAS, 2003: 138 [In Russian].
- Fedoseeva V.I., Fedoseev N.F. Sorption of Molybdate Anions by a Quasi-Liquid Film on the Surface of Dispersed Ice. *Kolloidnyy zhurnal. Colloid Journal*. 2010, 72 (4): 574–576 [In Russian].
- Fierz S., Armstrong R.L., Duran I., Etkhevi P., Green I., McClung D.M., Nishimura K., Satyavali P.K., Sokratov S.A. International Classification for Seasonally Falling Snow (a Guide to the Description of Snow Thickness and Snow Cover). *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy. Data of Glaciological Studies*. 2012, 2: 80 [In Russian].
- Bohren C.F., Barkstrom B.R. Theory of the Optical Properties of Snow. *J. Geophysical Research. Oceans and Atmospheres*. 1974, 70 (30): 4527–4535.
<https://doi.org/10.1029/JC079i030p04527>
- Colbeck S.C. The Layered Character of Snow Cover. *Reviews of Geophysics*. 1991, 29 (1): 81–96.
<https://doi.org/10.1029/90RG02351>
- Curl Jr.H., Hardy J.T., Ellermeier R. Spectral Absorption of Solar Radiation in Alpine Snowfields. *Ecology*. 1972, 53 (6): 1189–1194.
<https://doi.org/10.2307/1935433>
- Domine F., Bock J., Voisin D., Donaldson D.J. Can We Model Snow Photochemistry? Problems with the Current Approaches. *J. Phys. Chem. A*. 2013, 117: 4733–4749.
<https://doi.org/10.1021/jp3123314>
- Flanner M., Liu X., Zhou C., Penner J. Enhanced Solar Energy Absorption by Internally-Mixed Black Carbon in Snow Grains. *Atmos. Chem. Phys.* 2012, 12: 4699–4721.
<https://doi.org/10.5194/acp-12-4699-2012>
- Gerland S., Winther J.-G., Orbaek J.-B., Liston G., Orisland N.-A., Blanko A., Ivanov B.V. Physical and Optical Properties of Snow Covering Arctic Tundra and Svalbard. *Hydrological Processes*. 1999, 13: 2331–2343.
- Gerland S., Liston G.E., Winther J.-G., Orbaek J.B., Ivanov B.V. Attenuation of Solar Radiation in Arctic Snow: Field Observation and Modeling. *Annals of Glaciology*. 2000, 31: 364–368.
- Jacobson M.-Z. Climate Response of Fossil Fuel and Biofuel Soot, Accounting for Soot's Feedback to Snow and Sea Ice Albedo and Emissivity. *J. Geophys. Res.* 2004, 109: D21201.
<https://doi.org/10.1029/2004JD004945>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2019). “Summary for Policymakers”, in IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: official site. Retrieved from: URL: <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/summary-for-policymakers/> (Last access: August 23, 2025).
- Kinar N.J., Pomeroy J.W. Measurement of the Physical Properties of the Snowpack. *Reviews of Geophysics*. 2015, 53 (2): 481–544.
<https://doi.org/10.1002/2015RG000481>
- Libois Q., Picard G., France J.L., Arnaud L., Dumont M., Carmagnola C.M., King M.D. Influence of Grain Shape on Light Penetration in Snow. *The Cryosphere*. 2013, 7: 1803–1818.
<https://doi.org/10.5194/tc-7-1803-2013>
- Mahowald N.M., Kloster S., Engelstaedter S., Moore J.K., Mukhopadhyay S., McConnell J.R., Albani S., Doney S.C., Bhattacharya A., Curran M.A.J., Flanner M.G., Hoffman F.M., Lawrence D.M., Lindsay K., Mayewski P.A., Neff J., Rothenberg D., Thomas E., Thornton P.E., Zender C.S. Observed 20th Century Desert Dust Variability: Impact on Climate and Biogeochemistry. *Atmos. Chem. Phys.* 2010, 10: P. 10875–10893.
<https://doi.org/10.5194/acp-10-10875-2010>
- Marano M. Computer Modeling Snow Relationships in the Big Eau Pleine Watershed, Wisconsin. University of Wisconsin-Stevens Point, College of Natural Resources. 1979: 105 p.
<http://digital.library.wisc.edu/1793/79528>
- O'Brien H.W. Observations of the Ultraviolet Spectral Reflectance of Snow. CRREL, Cold Regions Res. and Eng. Lab., Hanover, N.H. Rep. 1972: 77–27.
https://archive.org/details/DTIC_ADA046349
- Richardson S.R., Salisbury F.B. Plant Response to the Light Penetrating Snow. *Ecology*. 1977, 58 (5): 1152–1158.
<https://doi.org/10.2307/1936936>
- Robledano A., Picard G., Dumont M., Flin F., Arnaud L., Libois Q. Unraveling the Optical Shape of Snow. *Nature Communications*. 2023, 14: 3955.
<https://doi.org/10.1038/s41467-023-39671-3>
- Skiles S.M., Painter T.H., Belnap J., Holland L., Reynolds R.L., Goldstein H.L., Lin J. Regional Variability in Dust-on-Snow 30 Processes and Impacts in the Upper Colorado River Basin. *Hydrological Processes*. 2015, 29: 5397–5413.
- Tentyukov M.P., Lyutoev V.P., Belan B.D., Simonenkov D.V., Golovataya O.S. Ultraviolet Radiation Detector Based on Artificial Periclase Nanocrystals (MgO). *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2022, 35 (1): 89–96.
- Warren S.G., Brandt R.E., Grenfell T.C. Visible and Near-Ultraviolet Absorption Spectrum of Ice from Transmission of Solar Radiation into snow. *Appl Opt.* 2006, 45 (21): 5320–34.
<https://doi.org/10.1364/ao.45.005320>