

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ СНЕГОТАЯНИЯ

И.И. Грицук^{1,2}, В.К. Дебольский^{1,2}, О.Я. Масликова¹,
Н.К. Пономарёв², Е.К. Синиченко²

¹Институт водных проблем РАН
ул. Губкина, 3, Москва, Россия, 119333

²Российский университет дружбы народов
ул. Орджоникидзе, 3, Москва, Россия, 115419

В гидравлической лаборатории РУДН выполнены измерения количества таящего снега в реальном времени, исследован процесс непрерывного снеготаяния с последующей инфильтрацией талых вод в грунт в зависимости от начальной плотности, толщины слоя и температуры снега. Рассмотрено влияние дождя на процесс снеготаяния, выполнены эксперименты с воздействием инфракрасного (ИК) и ультрафиолетового (УФ) излучения на снежный покров. Работа является продолжением исследования динамики берегового склона водных объектов в условиях криоли-тозоны.

Ключевые слова: лабораторный эксперимент, снеготаяние, дождь, солнечная радиация, альбедо снега.

Роль снеготаяния в процессах разрушения берегов равнинных рек изучена слабо, в то время как весеннее изменение температуры, а вместе с ним и превращение снега в воду и образующиеся потоки воды могут играть роль даже большую, чем дождевые осадки. Это выражается в том, что процесс таяния иногда происходит в течение нескольких суток и все твердые осадки, накопившиеся за зимний период (их толщина может достигать нескольких метров), превращаются в потоки воды, провоцируя интенсивные береговые процессы.

Своеобразие снега как твердого вещества состоит в том, что он обладает явно выраженной аморфностью и его механические и термические свойства за сравнительно небольшие промежутки времени могут претерпевать существенные изменения.

Предложенные ранее модели, например модель тепловлагообмена SPONSOR [2], позволяли оценить трансформации характеристик снежного покрова при значительной межгодовой изменчивости погоды.

При *радиационном снеготаянии* под действием проникающих в снежную толщу солнечных лучей снег тает не только на поверхности, но и в верхнем слое толщиной 20—40 см. Это характерно для континентальных территорий Сибири, Заволжья. Снег тает в первые дни весны, когда температура воздуха еще ниже нуля, а солнечная радиация уже оказывает ощутимое воздействие [3]. Таяние начинается не сверху, а в глубине снежного покрова под поверхностной прозрачной ледяной пленкой за счет этого «парникового эффекта». Снег непро-

зрачен для лучей длинных волн части спектра, а коротковолновые лучи проходят сквозь тонкий поверхностный слой снега. Этот слой становится своеобразным «ледяным стеклом», не пропускающим собственное длинноволновое излучение глубинных слоев и защищающим их тем самым от охлаждения. В Сибири этот механизм часто обеспечивает таяние основной массы снега при отрицательных температурах воздуха.

В районах России с морским климатом, например в западных областях Карелии, преобладает второй тип снеготаяния различных авторов — снег тает только с поверхности за счет обмена теплом с воздухом.

Конвективное снеготаяние происходит при пасмурной погоде за счет притока теплых воздушных масс. Этот процесс часто усиливается выпадением жидких осадков и может продолжаться круглые сутки. Таяние снега происходит в две стадии: днем талая вода скапливается в крупных порах и движется вниз, оплавляя кристаллы снега; ночью же замерзает. Это явление повторяется много раз и приводит к перекристаллизации снега.

Радиационное снеготаяние. Интенсивность суммарной радиации равна [4]:

$$I_s = I \sin h + i, \quad (1)$$

где I_s — суммарная радиация; I — интенсивность прямой радиации на поверхность, перпендикулярную солнечным лучам; i — интенсивность рассеянной радиации, h — высота Солнца.

Известно, что коротковолновая часть радиации может проникать в снежную толщу на несколько десятков сантиметров [5]. Известно также, что закон, по которому интенсивность радиации ослабевает с глубиной (закон Бугера-Ламберта):

$$I(z) = I_0 e^{-\beta z}, \quad (2)$$

где $I(z)$ — интенсивность радиации на глубине z м от поверхности снега, β — коэффициент экстинкции (ослабления, м^{-1}).

Разные авторы предлагают использовать различные значения коэффициента экстинкции β и его зависимости от плотности снега, размера кристаллов льда в снеге, его влажности, участка спектра падающей радиации и т.д. Так, например, существует большая разница в значении β для коротковолнового и длинноволнового участков спектра. В [6] предложено значение $\beta = 10 \text{ м}^{-1}$ для коротких волн и 250 м^{-1} для длинных.

В упрощенной схеме предполагается, что вся длинноволновая радиация поглощается верхним слоем снега и ИК участок спектра несет энергию, преобразующуюся в тепловую уже на поверхности снега.

Зная о свойстве УФ радиации проникать вглубь непрозрачных веществ (например, облаков), можно предположить, что облачность является задерживающим фактором только для ИК участка спектра. Поэтому в дневные часы воздействие ультрафиолета на снеготаяние происходит при любой погоде (кроме дождливой), тогда как инфракрасное излучение действует непосредственно лишь в ясные дни.

Альbedo. Поглощенная снегом энергия определяется значением альbedo снега. Изменение коэффициента отражения снега в период снеготаяния объясняется

изменением физических свойств снега [5]. Для снега и льда изменение оптических свойств связано с перестройкой структуры при нагреве, которая определяет показатели рассеяния и поглощения снежно-ледовой толщи.

В тех работах, которые учитывают изменение альbedo снега, чаще всего эти изменения связывают с температурой поверхности снега или с его возрастом. В [6] дан обзор моделей, которые учитывают изменение альbedo в зависимости от диаметра снежных зерен и зенитного угла Солнца, а также зависимость коэффициента поглощения от диаметра зерен и плотности снега. В [7] приведены данные измерений интенсивности отраженной радиации над площадками с загрязненным в различной степени снегом и получена зависимость альbedo от поверхностной концентрации примеси. Эта зависимость также может быть использована для расчетов снеготаяния.

Таким образом, учитывая (1), из общего потока суммарной радиации ($I \sin h + i$) от земной поверхности отражается часть его $(I \sin h + i)A$, где A — альbedo поверхности. Остальная часть суммарной радиации

$$I_s = (I \sin h + i) \cdot (1 - A) \quad (3)$$

поглощается земной поверхностью и идет на нагревание верхних слоев почвы и воды — поглощенная радиация.

Экспериментальные исследования на лабораторной модели

Влияние конвективной составляющей на процесс снеготаяния. Эксперименты проводились в гидравлической лаборатории РУДН на установке, позволяющей моделировать дождевые потоки различной интенсивности, одновременно измеряя как скорость и количество инфильтрационных потоков, так и количество бокового стока [8].

В лабораторных условиях имеется возможность наблюдать во времени фазу аккумуляции — образование и накопление влаги внутри снега, превращение его в фирн и фазу оплывания, когда количество воды в фирне достигает критического значения и фирновая толща уже не может удерживать влагу. Количество образующейся талой воды отслеживается во времени посредством инфильтрации в грунт (песок) и измерением ее объема на выходе [8].

Так как в лабораторных экспериментах отсутствовала солнечная (радиационная) составляющая, таяние происходит за счет конвекции тепла. *Без дождя:* использовались различные начальные параметры снега (исходная температура, плотность) и подстилающей поверхности (рис. 1, а).

При наличии дождя проводилось несколько экспериментов с различной интенсивностью дождя. Общий вид графиков имеет тот же вид, что и в отсутствие дождя, а именно три фазы: аккумуляция, интенсивный сток и непрерывное таяние (рис. 1, б). Как видно из графиков, при наличии непрерывного дождя время аккумуляции сокращается и чем больше интенсивность дождя, тем быстрее наступает таяние. Скорость инфильтрации в данном случае стремится не к нулевому значению, а к значению интенсивности дождя, выбранное для данного эксперимента.

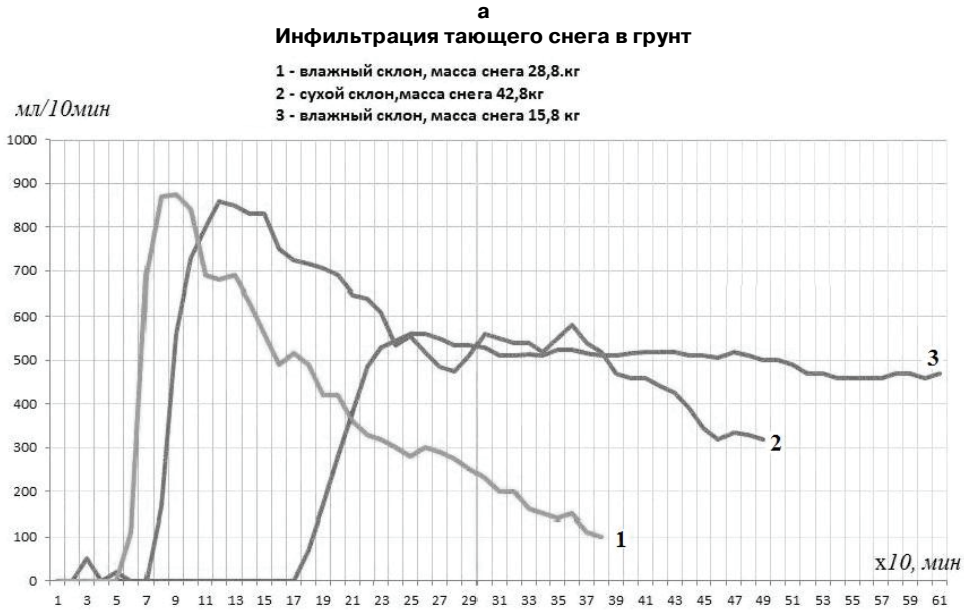


Рис. 1. Инфильтрация тающего снега:
а) инфильтрация талой воды в грунт (по данным лабораторных измерений);
б) инфильтрация талой и дождевой воды в грунт при воздействии дождя на процесс таяния снега

Графики функций зависимости инфильтрации от интенсивности дождя имеют несколько максимумов. Особенно это заметно при большой интенсивности дождя. Это объясняется тем, что дождь, с одной стороны, ускоряет таяние за счет притока тепла в снег, а с другой — вызывает накопление и обрушение накопленной влаги за счет механического добавления жидкости в фирново-снеговую толщу.

Влияние радиационной составляющей на процесс снеготаяния. Эксперименты с воздействием инфракрасного (ИК) и ультрафиолетового (УФ) излучения на снежный покров проводились также в гидравлической лаборатории РУДН. В процессе эксперимента измерялось количество тающего снега в реальном времени. Талые потоки просачивались через подстилающий грунт (в нашем случае — люберецкий песок), предварительно охлажденный до 0—2 °С. Измерения проводились при одинаковой мощности ламп (100 Вт), что дало возможность выявить разницу воздействия разной длины излучений на снеготаяние при прочих равных условиях (температура окружающей среды, плотность и структура снега, толщина снежного покрова). Также при этих же условиях проводился эксперимент со свободным (без воздействия излучения) таянием. Для всех трех случаев были построены графики изменения количества талых потоков во времени (рис. 2).

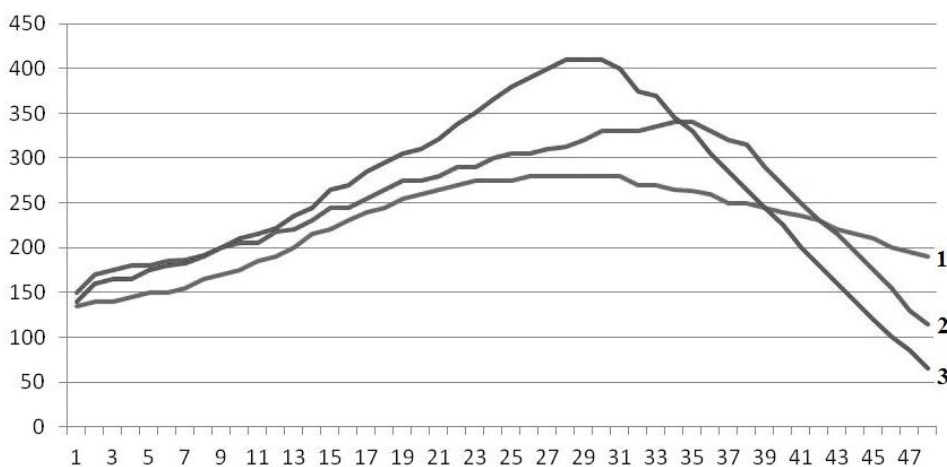


Рис. 2. Эксперимент с одинаковой мощностью длинноволнового и коротковолнового участков спектра: 1 — свободное таяние; 2 — УФ; 3 — ИК. Мощности ламп в обоих случаях одинаковы (100 Вт)

Так как во всех трех случаях присутствует одинаковая для всех конвективная составляющая снеготаяния (эксперименты проводились при определенных начальных условиях), были получены графики зависимости снеготаяния исключительно от воздействия УФ и ИК-радиации путем вычитания из полученных экспериментально зависимостей графика свободного (конвективного) таяния (рис. 3, участок возрастания объема таяния).

В системе уравнений (1)—(3) для лабораторных условий мы пренебрегаем излучением атмосферы и воды, затратами тепла на испарение и конденсацию и учитываем исключение в полученных графиках конвективной составляющей, получаем:

$$M = \frac{Ie^{-\beta z}}{L_i(1-A)}, \quad (4)$$

где $L_i = 334$ Дж/кг — удельная теплота таяния; β — коэффициент экстинкции; A — альbedo снежного покрова.

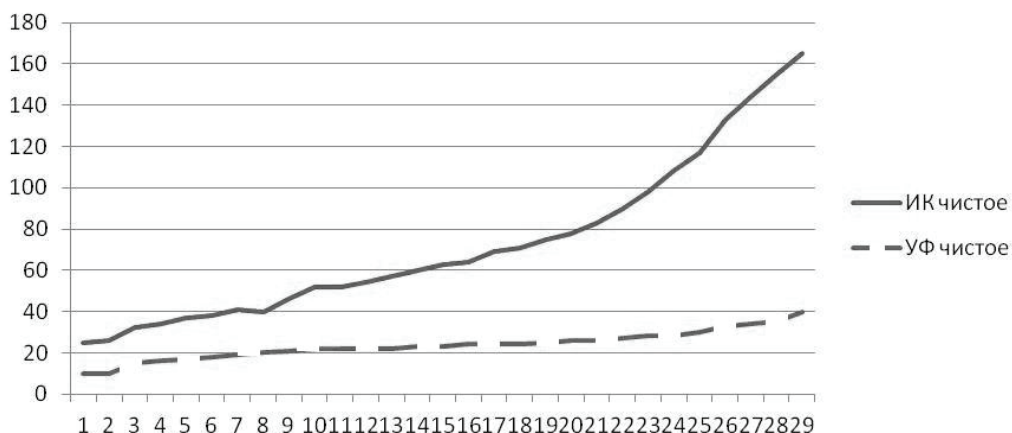


Рис. 3. Объемы снеготаяния под влиянием УФ (нижняя линия) и ИК (верхняя линия) участков спектра (без воздействия тепловой составляющей)

Таяние происходит во всей снежной толще. Талые потоки на всех слоях суммируются с приходящими с верхних горизонтов. В итоге подстилающей поверхности достигает сумма этих потоков, вычисляемая суммированием формулы (4) по координате z (от $-z$ до 0). Рассматривая интегральную сумму по толщине снежного покрова и учитывая изменение альбедо, получаем:

$$M = \frac{I}{L_i (1 - e^{-\beta z})(1 - A(t))}, \quad (5)$$

где T — время полного таяния снежного покрова, t — текущее время.

Исследование изменения альбедо снежного покрова по данным экспериментов. Из уравнения (5), зная входящие параметры и интерполируя полученные после вычитания конвекционной составляющей, графики M (см. рис. 3), можно при желании получить график зависимости альбедо от времени при воздействии лучей разной природы:

$$A(t) = 1 - \frac{M_{\text{эксп}} L_i}{I \cdot (1 - e^{-\beta z})}. \quad (6)$$

Для линии таяния под воздействием ИК-лучей линия тренда имеет вид $M_{\text{эксп}} = 2,58e^{0,08t}$; под воздействием УФ-лучей $M_{\text{эксп}} = 2,62e^{0,04t}$. Подставляя эти зависимости в (6), получаем графики изменения альбедо от времени в процессе таяния снега (рис. 4).

Из рис. 4 видно, что под воздействием ИК-лучей альбедо изменяется и достигает нулевого значения быстрее, хотя начальное значение близко к 1, что означает практически полное отражение в начале таяния. УФ-волны практически сразу проникают вглубь снега, чем и объясняется меньшее отражение с поверхности, но альбедо под воздействием УФ-лучей уменьшается с меньшим коэффициентом экстинкции. Период максимума таяния для случая с ИК-лампами наступает быстрее (см. рис. 2).

Зависимость альбедо от времени в процессе таяния носит экспоненциальный характер, что хорошо согласуется с данными, приведенными в [7].

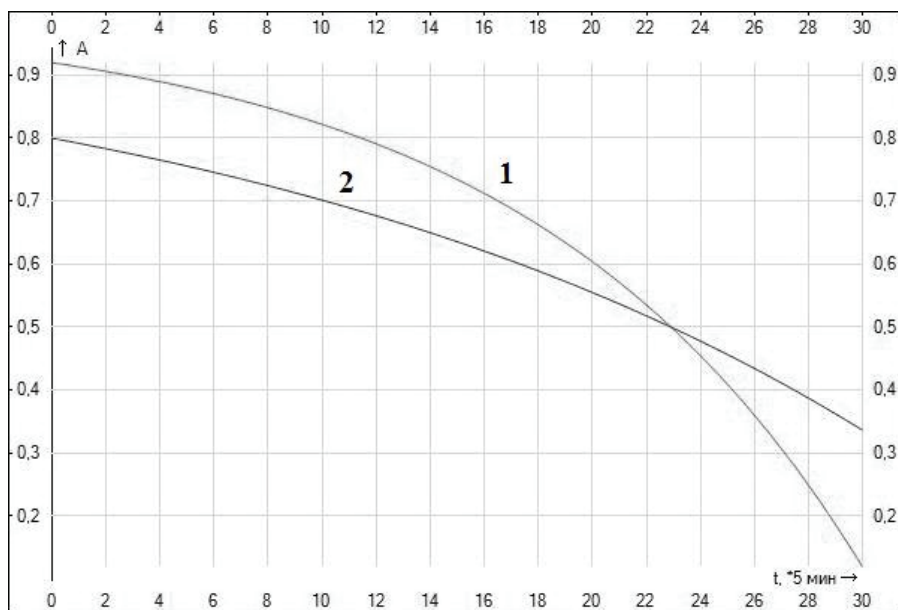


Рис. 4. Графики изменения альбедо в процессе таяния снега для ИК (1) и УФ (2) излучений

Интенсивность воздействия на снег ИК и ИФ излучения ослабевает с глубиной по закону Бугера-Ламберта. Существует большая разница в значении коэффициента экстинкции для коротковолнового и длинноволнового участков спектра. Вся длинноволновая радиация поглощается верхним слоем снега, и ИК участок спектра несет энергию, преобразующуюся в тепловую уже на поверхности снега.

Поскольку короткие волны (УФ) проникают вглубь непрозрачных веществ и преобразуются в тепловые потоки внутри снежной толщи, влияние этих лучей на снеготаяние носит отличный от влияния ИК лучей характер.

Под воздействием ИК излучения альбедо снежного покрова изменяется и достигает нулевого значения быстрее, хотя начальное значение альбедо свежевыпавшего снега близко к 1, что означает практически полное отражение в начале таяния. УФ-волны практически сразу проникают вглубь снега, чем и объясняется меньшее отражение с поверхности, но альбедо под воздействием УФ-лучей уменьшается с меньшим коэффициентом экстинкции.

Полученные результаты исследования одной из составляющих единого термогидродинамического процесса (радиационное снеготаяние) являются необходимой частью общего прогноза влияния изменения климата на течение деструкционных криогенных процессов в зоне ММП.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Грицук И.И., Дебольский В.К., Масликова О.Я., Пономарев Н.К. Влияние осадков в виде дождя на деформации берегового склона русел рек в условиях многолетнемерзлых пород // Лед и снег. — 2012. — № 3(119). — С. 73—78. [Gritsuk I.I., Debolskiy V.K., Maslikova O.Ya., Ponomarev N.K., Sinichenko E.K. Vliyanie osadkov v vide dozhdy na deformacii beregovogo sklona rusel rek v usloviyah mnogoletnemerzlykh porod // Led i снег. — 2012. — № 3(119). — S. 73—78.]

- [2] Шмакин А.Б., Турков Д.В., Михайлов А.Ю. Модель снежного покрова с учетом слоистой структуры и ее сезонной эволюции // Криосфера Земли. — 2009. — Т. XIII. — № 4. — С. 69—79. [Shmakin A.B., Turkov D.V., Mihailov A.Yu. Model snezhnogo pokrova s uchetom sloistoy strukturi i ee sezonnoy evolyucii // Kriosfera Zemli. — 2009. — Т. XIII. — № 4. — С. 69—79.]
- [3] Дюнин А.К. В царстве снега. Серия: Человек и окружающая среда. — Новосибирск: Наука, 1983. — 160 с. [Dyunin A.K. V carstve snega. Seria: Chelovek i okruzhayushaya sreda. — Novosibirsk: Nauka, 1983. — 160 s.]
- [4] Прыхина С.И. и др. Метод косвенного расчета радиационного баланса. Учебно-методическое пособие для студентов. — Саратов, 2011. [Pryahina S.I. i dr. Metod kosvennogo rascheta radiacionogo balansa. Uchebno-metodicheskoe posobie dlya studentov. — Saratov, 2011.]
- [5] Кузьмин П.П. Физические свойства снежного покрова. — Ленинград: Гидрометеиздат, 1957. — 180 с. [Kuzmin P.P. Fizicheskie svoystva snezhnogo pokrova. — Leningrad: Gidrometeoizdat, 1957. — 180 s.]
- [6] Мачульская Е.Е. Моделирование и диагноз процессов тепловлагообмена между атмосферой и сушей в условиях холодного климата: Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. — М., 2001. [Malchulskaya E.E. Modelirovanie i diafnoz processov teplovлагоobmena mezhdu atmosfeyrou i sushey v usloviyah holodnogo klimata: Diss. ... kand. f.-m. nauk. — M., 2001.]
- [7] Калужный И.Л., Шутов В.А. Современное состояние проблемы природных исследований снежного покрова // Водные ресурсы. — 1998. — Т. 25. — № 1. — С. 34—42. [Kalyuzhnyy I.L., Shutov V.A. Sovremennor sostoyanie problemi naturnih issledovaniy snezhnogo pokrova // Vodnie resursi. — 1998. — Т. 25. — № 1. — С. 34—42.]
- [8] Грицук И.И., Дебольский В.К., Масликова О.Я., Пономарев Н.К., Синиченко Е.К. Лабораторное исследование снеготаяния как составляющей сезонного процесса деформаций русла // Вестник РУДН. Серия «Инженерные исследования». — 2013. — № 3. — С. 83—91. [Gritsuk I.I., Debolskiy V.K., Maslikova O.Ya., Ponomarev N.K., Sinichenko E.K. Laboratornoe issledovanie snegotayaniya kak sostavlyaushey sezonnogo processa deformatsiy rusla // M.: Vestnik RUDN. Seriya «Inzhenernie issledovaniya». — 2013. — № 3. — С. 83—91.]

PILOT STUDY OF INFLUENCE OF SOLAR RADIATION ON INTENSITY OF SNOWMELT

I.I. Gritsuk^{1,2}, V.K. Debolskiy^{1,2}, O.Ya. Maslikova¹,
N.K. Ponomarev², E.K. Sinichenko²

¹Russian Academy of Sciences

Water Problems Institute

Gubkina str., 3, Moscow, Russia, 119333

²Peoples' Friendship University of Russia

Ordzhonikidze str., 3, Moscow, Russia, 115419

In the hydraulic laboratory of People's Friendship University of Russia a series of experiments to study the various possible external influences on the process of snow melting were carried out at the facility, which allows to measure the amount of seepage flow in time. The laboratory investigations of the continuous snow melting and infiltration of melt water into the ground, depending on the properties of the snow (initial density, thickness and temperature) were carried out. The impact of rain flows and radiation of the sun on the snow-melting process were examined, carried out experiments with exposure to infrared (IR) and ultraviolet (UV) radiation on the snow. The work is a continuation of the study of the dynamics of the coastal slope of the water bodies in a permafrost [1].

Key words: laboratory experiments, snow melting, rain, solar radiation, albedo of snow.