

ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СНЕГОТАЯНИЯ КАК СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СЕЗОННОГО ПРОЦЕССА ДЕФОРМАЦИЙ РУСЛА

И.И. Грицук^{1,2}, В.К. Дебольский¹, О.Я. Масликова¹,
Н.К. Пономарёв², Е.К. Синиченко²

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

²Кафедра гидравлики и гидротехнических сооружений
Инженерный факультет
Российский университет дружбы народов
ул. Орджоникидзе, 3, Москва, Россия, 115419

Проведено лабораторное исследование процесса непрерывного снеготаяния с последующей инфильтрацией талых вод в грунт в зависимости от различной начальной плотности, толщины слоя и температуры снега. Рассмотрено воздействие дождевых потоков на процесс снеготаяния.

Ключевые слова: криолитозона, лабораторный эксперимент, береговые деформации, льдистость грунтов, оттаивание грунтов, дождь, снеготаяние.

Введение. Основные допущения, принимаемые в исследовании. Роль снеготаяния в процессе 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 играют роль даже большую, чем дождевые потоки. Это выражается в том, что процесс таяния в некоторых случаях происходит в течение нескольких суток и все твердые осадки, накопившиеся за зимний период (их толщина может достигать нескольких метров), преобразуются в потоки воды, и чем быстрее происходит это превращение, тем мощнее поверхностные склоновые потоки и тем больше количество переносимого ими вещества. Быстрое таяние снега в период резкого потепления вместе с дождевыми осадками также может являться причиной весенних паводков.

В естественных условиях процесс таяния снега происходит в течение длительного времени. Процесс перехода температуры окружающей среды через 0 °С может происходить несколько раз за сезон, подчиняясь как изменениям погодных условий, так и суточному ходу температур. В экспериментах рассматривается непрерывный процесс повышения температуры внутри снега, что позволяет описывать одну из составляющих общего процесса. Таким образом, при моделировании реальных природных условий весь процесс снеготаяния можно разбить на необходимое количество непрерывных подпроцессов, каждый из которых описывается собственными уравнениями.

Также известно, что в естественных условиях снег имеет слоистую структуру. В наших экспериментах использовался снег изначально однородной структуры, что дает возможность выделить основные закономерности поведения снега при снеготаянии в зависимости от конкретной структуры снега, а в дальнейшем моделировать реальные слои как совокупность нескольких однородных слоев.

Учитывая все эти допущения, возможно создать модель, описывающую изменения реального снежного покрова при сезонном снеготаянии в условиях криолитозоны.

Снеготаяние как составляющая единого гидрофизического процесса воздействия атмосферных осадков на русло рек. Как было показано в [2], при превышении интенсивностью дождя (или притоков талой воды) максимальной возможной способности почвы впитывать влагу излишек воды уходит в сток. Остальная часть поступающей к поверхности почвы жидкости впитывается в верхний слой почвы. Особенности впитывания воды мерзлой почвой оказывают существенное влияние на формирование стока при снеготаянии. Способность мерзлой почвы впитывать воду определяется размером крупных пор и степенью заполненности их льдом. Данных по водопроницаемости мерзлых почв очень мало, тем не менее можно заключить, что характер зависимости водопроницаемости от гранулометрического состава и структуры почвы зимой такой же, как и летом. Поэтому разделение почвы на классы по их водопроницаемости в летний период сохраняет свою значимость и для случая мерзлых почв. Численные же значения водопроницаемости зимой будут меньше. Для пересчета водопроницаемости в летний период на водопроницаемость мерзлой почвы Д.Л. Арманд предложил коэффициент 0,6 [1].

В условиях криолитозоны и в период сезонных изменений температур в почве образуются потоки воды, возникающие при оттаивании мерзлой породы. В связи с этим гидравлическая проводимость почвы, дополнительно к существующей табличной константе для данного механического состава почвы, изменяется с коэффициентом от 0,6 для мерзлой породы до 1 для немерзлой. Вертикальный поток влаги между слоями почвы вычисляется по уравнению Дарси. Нас интересует поверхностный сток, поскольку именно он отвечает за движение частиц грунта по склону и динамику всего берега в целом.

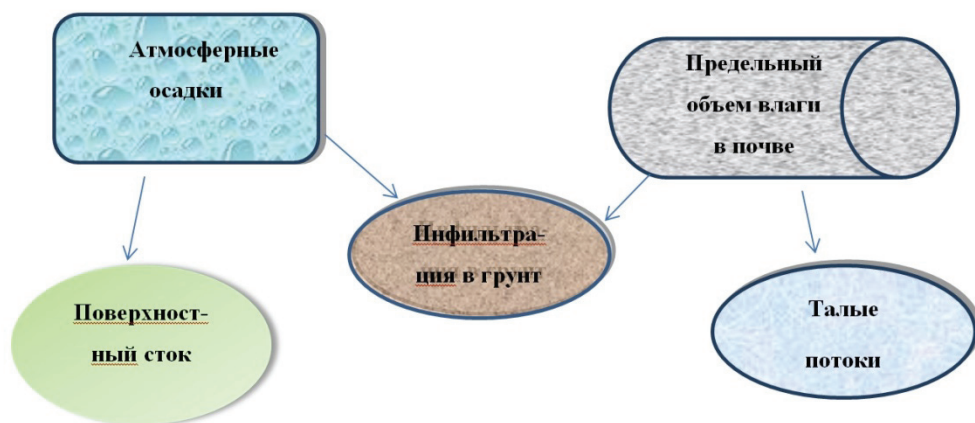


Рис. 1. Условная схема распределения потоков жидкости

На рис. 1 показано условное распределение потоков. Очевидно, что в условиях оттаивания породы происходит перераспределение долей жидкости в каждом блоке, а именно: увеличивается доля талых потоков, при этом изменяется коэф-

фициент проводимости грунта и, соответственно, предельно возможный объем влаги для данного вида почв. Как следствие, изменяется возможная инфильтрация в грунт и изменяется во времени доля склоновых потоков. По окончании оттаивания грунта процесс движения влаги внутри склона стабилизируется, и доля склоновых потоков будет зависеть только от атмосферных осадков (дождя). В работе [2] были расписаны уравнения для каждого из этих блоков. В данном лабораторном исследовании рассмотрены процессы естественного таяния снега, которое является более сложным физическим процессом по сравнению с обычными дождевыми потоками.

Лабораторные эксперименты. 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 (рис. 2).



Рис. 2. Установка для измерения инфильтрационных потоков

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 замерами ее объема на выходе. Как видно из графиков инфильтрации (рис. 3), весь процесс снеготаяния можно условно разделить на три фазы: 1) аккумуляция, 2) интенсивный сток, 3) непрерывное таяние.

Так как в данных лабораторных экспериментах отсутствовала солнечная (радиационная) составляющая, таяние происходит за счет конвекции тепла.

1. *Фаза аккумуляции* — фаза накопления жидкой воды в снеге и существенного изменения его структуры без видимого уменьшения объема. Таяние снега [5] происходит, когда температура его поверхности становится равной 0 °С. Скорость таяния M выражается в кг/(м²с), или мм/с для водно-эквивалентной толщины слоя и определяется как

$$M = E_{melt} / L_i, \quad (1)$$

где L_i — удельная теплота таяния (замерзания), Дж/кг; E_{melt} — затраты тепла на таяние, Вт/м².

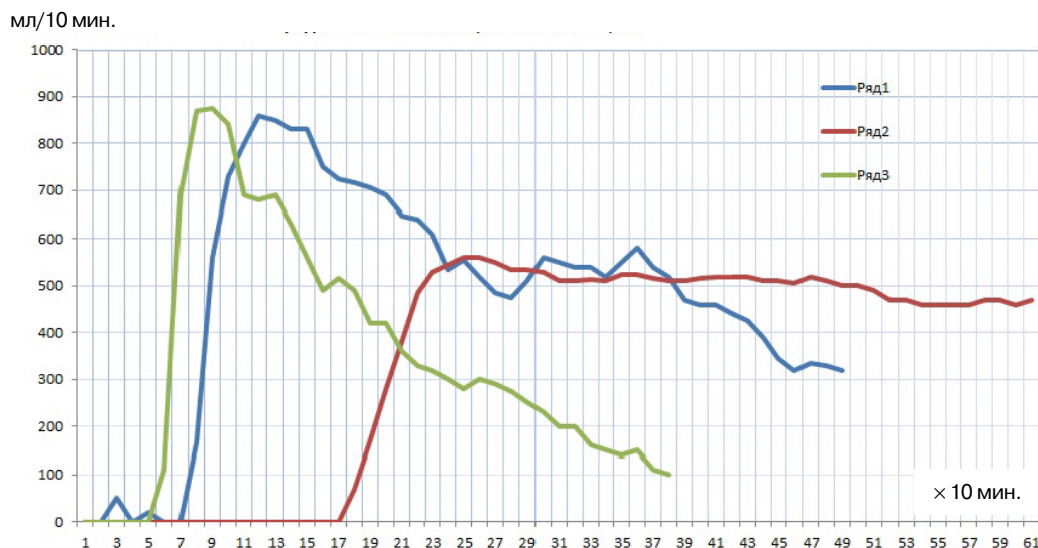


Рис. 3. Инфильтрация талой воды в грунт (по данным лабораторных измерений):

ряд 1 — влажный склон, масса снега 28,8 кг; ряд 2 — сухой склон, масса снега 42,8 кг; ряд 3 — влажный склон, масса снега 15,8 кг

С другой стороны [3], конвективные фазы вычисляются с использованием общепринятого подхода в зависимости от вертикального градиента температуры и теплопроводности среды:

$$G = \lambda \frac{\partial T}{\partial z}, \tag{2}$$

где λ — теплопроводность почвы или снега.

Подставляя (2) в (1), получаем

$$M = \lambda \frac{\partial T}{\partial z} / L_i. \tag{3}$$

Считается [5], что снег может удерживать жидкую воду в количестве не более 12% от его массы. Весь излишек жидкой воды направляется к поверхности почвы и учитывается аналогично дождю, выпадающему на поверхность почвы. Это происходило в тех экспериментах, когда снег укладывался на обычный (немерзлый) грунт. В случае замороженного грунта таяние происходило с верхней границы.

Зная толщину снежного покрова, начальную температуру снега, температуру окружающего воздуха и предельную массу воды, можно вычислить время «аккумуляции».

2. *Фаза интенсивного стока* — обрушение накопленной до предельно возможного значения (зависит от влагоудерживающей способности снега) воды.

Фильтрация талой воды в снежно-фирновой толще описывается законом Дарси. Движение воды имеет место лишь в талой зоне, где температура фирна $T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$, если достигнут порог водонасыщенности S_0 [3]:

$$u = \frac{\rho_w k g}{\chi_w}, \quad k = k_0 e^{mp} \left[(S - S_0) / (p - S_0) \right]^2, \tag{4}$$

где p — пористость среды, k — коэффициент фильтрации, m — комплексный показатель преломления, χ_w — динамическая вязкость воды $\left(1,3 \cdot \frac{10^{-3} \text{ кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}\right)$.

Это самый интенсивный в плане размыва период. С одной стороны, все то количество воды, которое накопилось за предыдущую фазу, в течение очень короткого промежутка времени обрушивается на грунт; с другой — способность мерзлой почвы впитывать воду, зависящая от коэффициента фильтрации, может не соответствовать образовавшимся потокам, и тогда весь излишек воды с большой скоростью стекает по склону. Одновременно с этим грунт может находиться в мерзлом или частично оттаявшем состоянии, что уменьшает его фильтрационные свойства. Поскольку фильтрация талой воды в снежно-фирновой толще описывается законом Дарси, скорость обрушения талой жидкости сквозь снежную толщу (аналогичную скорости падения дождя) следует рассчитывать с учетом соответствующего коэффициента фильтрации.

3. *Фаза непрерывного таяния* — плавное стекание вновь образующихся потоков жидкости под действием температуры окружающей среды. С учетом того, что объема фирна в процессе таяния остается меньше, возникающие потоки тоже уменьшаются в объеме. Из графиков (см. рис. 3) видно, что процесс убывания инфильтрации носит экспоненциальный характер.

По [5], потоки воды сквозь слой снежной толщи описываются уравнением

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -np^{-1}(1 - S_{wi})^{-1} \left[\frac{\rho_w kg}{\mu_w} \right]^{\frac{1}{n}} U^{\left(1 - \frac{1}{n}\right)} \frac{\partial U}{\partial x}, \quad (5)$$

где U — сток воды; t — время (сек.); n — безразмерный показатель насыщения фирна (S), определяющий экспоненту; p — пористость снега; S_{wi} — насыщенность снега водой (в % от общего объема снега); ρ_w — плотность ($\text{г}/\text{см}^3$); k — коэффициент проницаемости снега (см^2); g — ускорение свободного падения; μ_w — вязкость воды ($\text{г}/(\text{см} \cdot \text{с})$); x — вертикальная пространственная координата (см).

Уравнение включает показатель насыщения (n), пористость (p), насыщения воды (S) и проницаемости (k). Изменения n и S_{wi} с течением времени не до конца понятны, по умолчанию считаются постоянными — 3,3 и 12% соответственно. Объем таяния предполагается изменяющимся по глубине снежного покрова. Этот метод учитывает суперпозицию остаточных и вновь оттаявших потоков на каждом слое фирна и позволяет определить время достижения суммарными потоками нижней части снежной толщи. Приведенные графики (см. рис. 3) и таблица подтверждают экспоненциальную зависимость объема снеготаяния от времени.

На дождевальной установке на рабочем участке создавалось подобие русла реки из песка, сверху закладывался определенный объем снега, имитирующий равномерный снежный покров. Были проведены две группы экспериментов: без дождя; при наличии дождя.

Без дождя: использовались различные начальные параметры снега (исходная температура, плотность) и подстилающей поверхности (влажный и сухой склон). Результаты приведены на рис. 3 и в таблице.

Результаты проведенных экспериментов
(№ 1, 2, 3, 4 — влажный склон, № 5, 6, 7 — сухой, комнатная температура 20 °С)

№	Масса снега, кг	Плотность снега, кг/м ³	Температура снега, °С	Время аккумуляции, мин.	Непрерывное таяние, $u(t)$
1	28,8	360	-19	60	$844,09e^{-0,023t}$
2	15,8	527	-27	50	$929,51e^{-0,068t}$
3	31,8	530	-6	60	$993,65e^{-0,027t}$
4	11	550	-7	30	$1543,1e^{-0,168t}$
5	42,8	380	-29	170	$551,26e^{-0,005t}$
6	21,1	350	-7	60	$920,91e^{-0,066t}$
7	10,6	350	-6	40	$1254,9e^{-0,188t}$

Из таблицы видно, что время аккумуляции полностью зависит от массы снега и не зависит от начальной плотности и температуры. На сухом склоне время начала инфильтрации складывается из времени аккумуляции в снеге и времени пропитки сухого склона. В графе «Непрерывное таяние» приведены формулы, полученные компьютерной аппроксимацией экспериментальных кривых и демонстрируют экспоненциальную зависимость скорости непрерывного таяния от времени, что и подтверждает применимость формулы для фазы непрерывного таяния.

При наличии дождя проводилось несколько экспериментов с различной интенсивностью дождя (0,5, 1 и 1,5 мм/мин.) и равных начальных параметрах закладываемого снега: -2 — 4 °С и массе снега 18—19 кг, что при толщине покрова 8 см дает плотность снега 360—380 кг/м³. Конструкция установки приведена на рис. 4.

Если дождь выпадает на поверхность снега [6], он вызывает нагревание поверхности снега согласно суммарной теплоемкости дождя, а при наличии избыточной теплоемкости после нагрева до 0 °С — снеготаяние на поверхности и образование жидкой воды в снежном покрове. Считается, что снег может удерживать жидкую воду в количестве не более 12% от его массы. Весь излишек жидкой воды направляется к поверхности почвы и рассматривается в расчетах аналогично дождю, выпадающему на поверхность почвы.

Общий вид графиков имеет тот же вид, что и при отсутствии дождя, а именно три фазы: аккумуляция; интенсивный сток; непрерывное таяние (рис. 5). 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, выбранному для данного эксперимента.

Графики функций зависимости инфильтрации от интенсивности дождя имеют несколько максимумов. Особенно это заметно при большей 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.

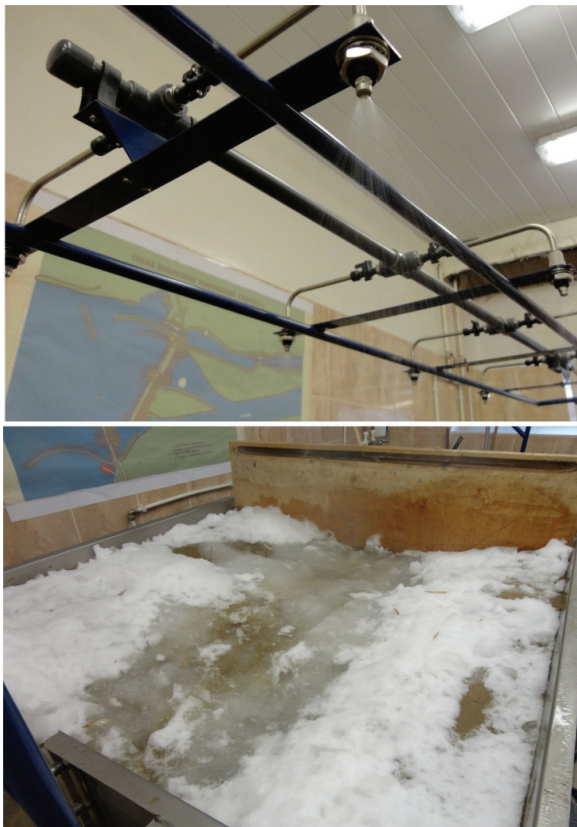


Рис. 4. Дождевальная установка (РУДН)

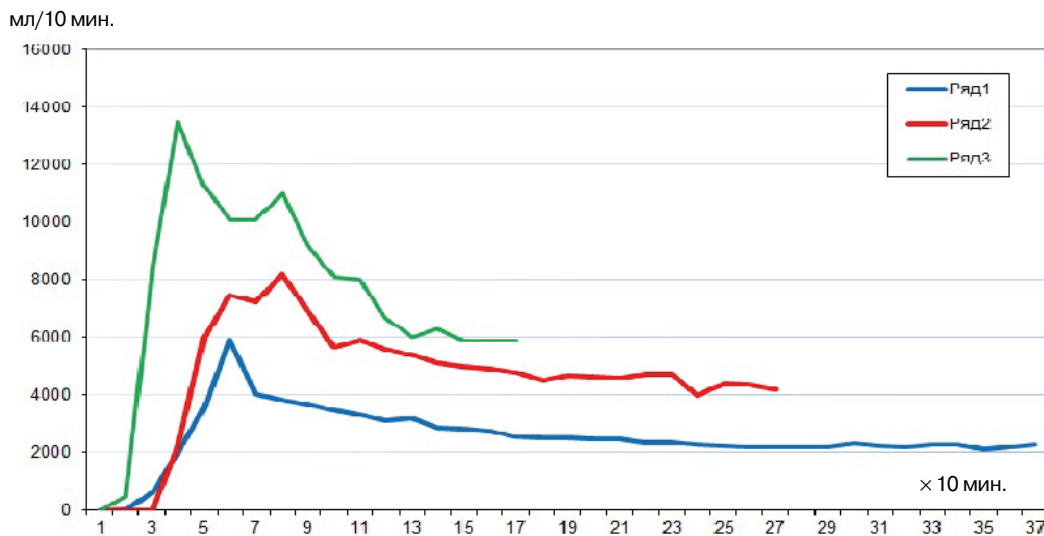


Рис. 5. Инфильтрация талой и дождевой воды в грунт при воздействии дождя на процесс таяния снега:

ряд 1 — интенсивность дождя 0,5 мм/мин.;
ряд 2 — интенсивность дождя 1 мм/мин.;
ряд 3 — интенсивность дождя 1,5 мм/мин.

Выводы. Проведенные в лабораторных условиях исследования тающего снега и последующая инфильтрация талых потоков в грунт позволяет выделить три фазы таяния снега: аккумуляция; интенсивный сток; непрерывное таяние.

Время аккумуляции полностью зависит от массы снега и не зависит от начальной плотности и температуры. На сухом склоне время начала инфильтрации складывается из времени аккумуляции в снеге и времени пропитки сухого склона. Интенсивный сток по экспериментальным наблюдениям носит лавинообразный характер и его величина зависит также от массы (или толщины) снежного покрова. Непрерывное таяние описывается экспоненциальной зависимостью, коэффициенты которой связаны с начальными параметрами снега и окружающей среды.

При наличии дождя процесс снеготаяния имеет более сложный характер. Происходит наложение нескольких процессов: фаза непрерывного таяния совмещается с фазой последующей аккумуляции. Дождь усиливает интенсивность процесса и изменяет предельное значение содержания воды в фирне во времени. Это особенно заметно при большей интенсивности дождя.

Лабораторное исследование таяния снега во времени при положительных постоянных температурах (при исключении дополнительных внешних условий) дает возможность выявить основные закономерности этого процесса и в дальнейшем накладывать сложные внешние условия в виде радиационного воздействия солнечных потоков, суточного хода температур и соответствующих термических начальных условий.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Арманд Д.Л. Географическая среда и рациональное использование природных ресурсов. — М.: Наука, 1983. [*Armand D.L. Geograficheskaya sreda i racionalnoe ispolzovanie prirodnykh resursov.* — М.: Nauka, 1983.]
- [2] Грицук И.И., Дебольский В.К., Масликова О.Я., Пономарёв Н.К. Влияние осадков в виде дождя на деформации берегового склона русел рек в условиях многолетнемерзлых пород // Лед и снег. — 2012. — № 3. — 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 usloviyakh mnogoletnemerzlykh porod // Led i sneg.* — 2012. — № 3. — S. 73—78.]
- [3] Красс М.С., Мерзликін В.Г. Радиационная теплофизика снега и льда. — Л.: Гидрометеоиздат, 1990. [*Krass M.S., Merzlikin V.G. Radiacionnaya teplofizika snega i lda.* — L.: Gidrometeoizdat, 1990.]
- [4] Шмакин А.Б., Рубинштейн К.Г. Валидация динамико-статистического метода детализации метеорологических параметров // Тр. Гидрометцентра России, 2006. — Вып. 341. — С. 186—208. [*Shmakin A.B., Rubinshtein K.G. Validaciya dinamiko-statisticheskogo metoda detalizacii meteorologicheskikh parametrov // Tr. Gidrometcentra Rossii, 2006. — Vip. 341. — S. 186—208.*]
- [5] 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. — T. XIII. — № 4. — S. 69—79.]
- [6] Rae A. Melloh. A Synopsis and Comparison of Selected Snowmelt Algorithms, US Army Corps of Engineers@Cold Regions Research & Engineering Laboratory, CRREL Report 99-8.

**LABORATORY RESEARCH OF SNOW MELTING
AS COMPONENT OF SEASONAL PROCESS
OF DEFORMATIONS STREAM CHANNEL**

**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

²Department of hydraulic and hydrothechnical building
Peoples' Friendship University of Russia
Ordzhonikidze str., 3, Moscow, Russia, 115419

A laboratory study of the process of continuous snowmelt and subsequent infiltration of meltwater into the soil, depending on the properties (different initial density, layer thickness and temperature) of snow. We consider the impact of storm flows in the process of thawing.

Key words: permafrost, laboratory experiment, coastal deformation, ice content of soils, soil thaw, rain, snow melting.