

# ДОКЛАДЫ XI ГЛЯЦИОЛОГИЧЕСКОГО СИМПОЗИУМА

## О роли некоторых природных факторов в промерзании грунтов

Н.И. Осокин, Р.С. Самойлов, А.В. Сосновский, С.А. Сократов

Институт географии РАН

*Статья поступила в редакцию 15 апреля 1998 г.  
Представлена членом редколлегии М.М. Корейшей*

На основе предложенной авторами модели оценено влияние изменчивости коэффициента теплопроводности снега, условий снегонакопления, облачности и скорости ветра, типов грунтов и их влажности на промерзание грунтов.

Влияние на промерзание грунтов пространственно-временных характеристик снежного покрова (толщины снежного покрова, динамики снегонакопления, времени задержки выпадения снега после установления отрицательных температур воздуха) было проанализировано ранее [2] с помощью региональной зависимости плотности снега от его толщины и осредненной зависимости эффективной теплопроводности снега от его плотности. В модели учтено наличие слоя фазового перехода, в пределах которого вода замерзает в грунте. Толщина этого слоя зависит от теплофизических свойств грунта и распределения температуры по вертикальному профилю.

Влияние снежного покрова на промерзание грунтов рассматривалось ранее в автоматической постановке — при постоянной температуре поверхности снежного покрова и средней за сезон его плотности и, следовательно, среднем значении коэффициента теплопроводности, что не соответствует реальным гидрометеорологическим параметрам и не позволяет прогнозировать ход промерзания. В разработанной авторами модели учтена фактическая изменчивость во времени параметров снежного покрова и атмосферы.

Результаты проверки модели по материалам натурных исследований А.В. Павлова за промерзанием грунтов в районе мерзлотной станции Игарка [4] показали достаточно высокое соответствие результатов расчетов и экспериментов. Получило подтверждение основное положение о необходимости более полного учета региональных и локальных условий (климатических, геоморфологических, метеорологических, гидрометеорологических и т.п.), воздействующих на рассматриваемый процесс.

Один из важнейших теплофизических параметров снега, влияющих на взаимодействие снега с криогенными породами — это коэффициент тепло-

проводности снега  $\lambda_s$ . Несмотря на многочисленные исследования до настоящего времени нет четкого физического представления о влиянии на теплопроводность внутренних характеристик снега и внешних условий. Установлено, что факторы, определяющие величину теплопроводности снега, включают легко измеряемые в лабораторных и полевых условиях его плотность и температуру, а также структурные характеристики снежного покрова; количество тепла, переносимого диффундирующим водяным паром и конвективные потоки воздуха в поровом пространстве снежной толщи. Сложность непосредственных измерений последних трех факторов приводит к необходимости использования термина “эффективная теплопроводность снега”.

Результаты количественного определения эффективной теплопроводности снега представляются обычно в виде эмпирических формул. Большинство из них связывают эффективную теплопроводность снега с его плотностью. Сводка основных таких опубликованных зависимостей по материалам А.В. Павлова, С. Фукусако, М. Маэно и Т. Курода, М. Стурма и др. приведена нами в [2].

В ряде работ, в частности А.В. Павлова, С. Фукусако, Д. Питмана и Б. Цукермана, М.Стурма и др. [3, 4, 8, 11, 13] приводятся также эмпирические зависимости коэффициента теплопроводности снега от его температуры. В упомянутых работах А.В.Павлова и С.Фукусако выявлена противоположная направленность зависимостей теплопроводности снега от температуры (эффективная теплопроводность повышается с повышением температуры из-за усиления диффузии, а теплопроводность ледяной матрицы снега с повышением температуры понижается). По данным последних исследований С.Сократова и Н.Маэно [12], процесс теплопереноса — это не сумма тепла, переносимого в ледяной матрице снега и водяным паром в поровом пространстве, а результат

теплообмена между этими двумя составляющими. Подобное положение заставляет относиться к предложенным зависимостям коэффициента теплопроводности снега от температуры с осторожностью и не включать их на данном этапе в расчетную схему.

По поводу влияния структуры снега на величину коэффициента эффективной теплопроводности также существуют противоположные мнения. Согласно М.Стурму и др. [13], теплопроводность зависит от степени контактируемости кристаллов: для зернистого снега ее зависимость от плотности велика, а для глубинной изморози мала. По А.В.Павлову [3], зависимостью теплопроводности снега от его структуры можно пренебречь. Указанные разногласия можно примирить, учитывая характеристики использованного в экспериментах А.В.Павлова снега и принимая в модели вслед за М. Стурмом для глубинной изморози среднюю величину эффективной теплопроводности в пределах имеющего место диапазона плотностей, а для остальных видов снега — зависимость теплопроводности от конкретной плотности снега.

По данным исследований А.В.Павлова, М.Р.Альберта, Джен-Ши Йена, З. Иосида при отсутствии потока воздуха в поровом пространстве снега тепло, переносимое водяным паром, мало [3, 6, 14 — 17]. В соответствии с работой Н.Маэно и Т.Курода [9], а также публикуемых в настоящее время исследований С.А.Сократова, можно предположить, что эффект диффузионного переноса включен в экспериментально полученные значения эффективного коэффициента теплопереноса. Наличие потока воздуха в поровом пространстве снега может существенно влиять на величину теплопереноса [6, 7, 15]. Однако такой механизм последнего связан прежде

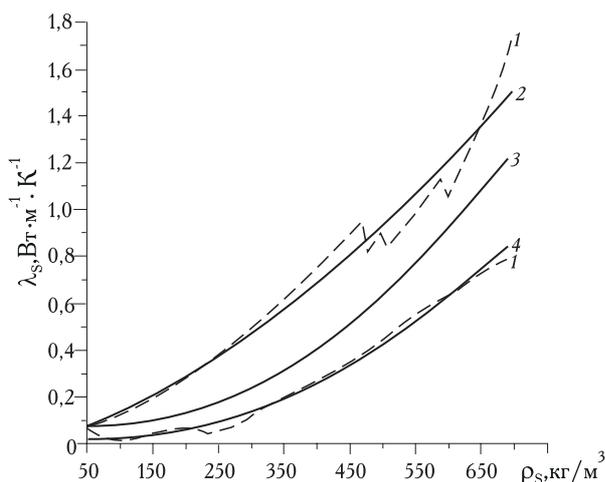


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплопроводности  $\lambda_s$  снега от его плотности  $\rho_s$ : 1 — максимальные и минимальные значения  $\lambda_s$  по данным различных авторов [2], 2, 4 — верхняя и нижняя огибающие  $\lambda_s$ , 3 — среднее значение  $\lambda_s$

Fig. 1. Coefficient of thermal conductivity of snow  $\lambda_s$  relation to its density  $\rho_s$ : 1 — maximum and minimum values of  $\lambda_s$  (according various authors [2]); 2, 4 — upper and lower enveloping lines for  $\lambda_s$ , 3 — average value of  $\lambda_s$

всего с горизонтальными перепадами давления на поверхности снега и температурной неоднородностью подстилающей поверхности. При дальнейшем развитии модели с включением в нее микроклиматических характеристик, отвечающих условиям локального снегонакопления, предполагается учитывать возможный поток воздуха в поровом пространстве через уточненное значение эффективного коэффициента теплопереноса.

Границы изменения расчетных значений эффективной теплопроводности снега по известным экспериментальным зависимостям показаны на рис. 1 (кривая 1). В эти границы вписываются экспериментальные значения эффективной теплопроводности, полученные А.В. Павловым для разных криолитологических районов России с учетом влияния температуры снега [10].

Ранее авторами предложена зависимость эффективного коэффициента теплопроводности от плотности снега (кривая 3 на рис.1) как средняя из известных зависимостей [2]:

$$\lambda_s = 9,165 \cdot 10^{-2} - 3,814 \cdot 10^{-4} \rho_s + 2,905 \cdot 10^{-6} \rho_s^2. \quad (1)$$

Для более полного учета вариабельности этой характеристики снега на динамику промерзания грунтов получены уравнения верхней (кривая 2 на рис.1) и нижней (кривая 4 на рис.1) огибающих:

$$\lambda_{св} = 1,36 \cdot 10^{-2} + 1,1 \cdot 10^{-3} \rho_s + 10^{-6} \rho_s^2; \quad (2)$$

$$\lambda_{сн} = 2,96 \cdot 10^{-2} - 3 \cdot 10^{-4} \rho_s + 2 \cdot 10^{-6} \rho_s^2. \quad (3)$$

Возвращаясь к оценке теплоизолирующей роли снежного покрова в процессе промерзания грунтов, проанализируем на основе выполненных расчетов влияние на промерзание изменчивости плотности снега и связанного с ней коэффициента его эффективной теплопроводности, а также типа грунтов и их влажности.

В расчетах изменение температуры воздуха от  $0^\circ$  до  $-30^\circ\text{C}$  (min) принималось по синусоидальному закону. Динамика снегонакопления задавалась в виде степенной зависимости относительной толщины  $h_s/h_{max}$  от относительной продолжительности возрастания толщины снежного покрова  $\tau/\tau_{max}$ :

$$h_s/h_{max} = (\tau/\tau_{max})^{1/2}$$

при  $h_{max} = 0,7$  м и  $\tau_{max} = 180$  суток.

Зависимость плотности снега  $\rho_s$  от его толщины  $h_s$  принималась степенной  $\rho_s(h) = ah^b$ . Коэффициенты  $a$  и  $b$ , заимствованные из [2], получены для разных районов России. Для расчетов принимались значения  $\rho_{св}$ , соответствующие условиям Ненецкого автономного округа и характеризующие наибольший рост плотности;  $\rho_{сн}$  как наименьшее увеличение плотности (для условий Якутии) и средние  $\rho_s$  (для условий Чукотки).

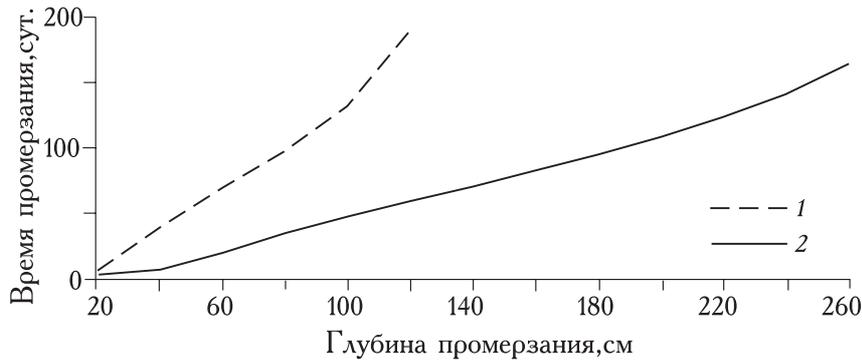


Рис.2. Влияние влажности грунта на промерзание  $w = 30\%$  (1),  $w = 15\%$  (2)  
 Fig. 2. The influence of soil humidity  $w$  on its freezing:  $w = 30\%$  (1),  $w = 15\%$  (2)

В качестве грунтов сезонно-талого слоя рассматривались пески, супеси, суглинки и глины. Их физико-механические и теплофизические характеристики принимались по данным СНиП [5]. Плотность грунтов считали равной  $1600 \text{ кг/м}^3$  при влажности  $25\%$ . Значения последней варьировались только при оценке влияния влажности на промерзание грунта (рис. 2).

Доля незамерзшей воды в грунте  $w$  принималась по графикам, приведенным в [1], аппроксимируемых зависимостью  $w = ke^{mT_g}$  ( $T_g, ^\circ\text{C}$ ) при следующих значениях коэффициентов  $k$  и  $m$ :

Тип грунта	$k$	$m$
Намцырская глина	16,922	0,0448
Суглинок	8,3367	0,0476
Супесь	5,3086	0,0916
Песок	2,2043	0,2223

Количественная оценка влияния рассмотренных выше факторов на ход промерзания грунтов проведена по глубине промерзания за период  $T = 150$  суток (приняв во внимание и период задержки начала снегонакопления от даты установления отрицательных температур воздуха, равный 8 суткам, идентичный во

всех расчетных случаях). При одинаковых условиях снегонакопления и максимальной толщине снежного покрова  $70 \text{ см}$  глубина промерзания суглинка за расчетный период составит  $207 \text{ см}$  при верхних (максимальных) значениях  $\rho_{\text{св}}$  и  $\lambda_{\text{св}}$  (кривая 4 на рис. 3) и лишь  $53 \text{ см}$  при нижних значениях этих характеристик снега (кривая 1 на рис. 3). Таким образом, по данным выполненных расчетов, при разных параметрах снежного покрова глубина промерзания грунта (с момента установления снежного покрова) может изменяться в  $8 - 9$  раз (см. рис. 3). Влияние изменения коэффициента теплопроводности снега, особенно при низких значениях его плотности, сказывается на промерзании грунта в  $1,5 - 1,7$  раз сильнее, чем изменение плотности снега.

О значительном влиянии влажности грунта на интенсивность его промерзания можно судить по данным о промерзании суглинка с влажностью  $w = 30\%$  (кривая 1 на рис. 2) и  $w = 15\%$  (кривая 2). Возрастание вдвое влажности грунта приводит к уменьшению глубины промерзания за рассматриваемый период в  $2,3$  раза.

При одинаковой начальной влажности и плотности грунтов разного механического состава, идентичных условиях снегонакопления, средних показате-

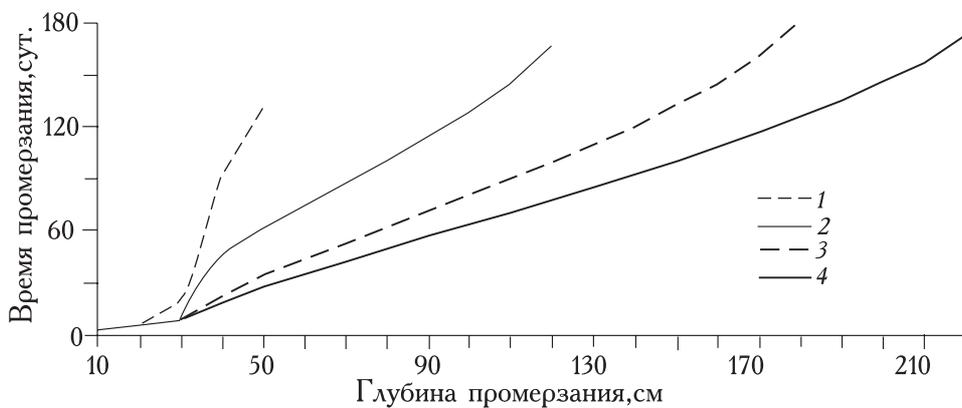


Рис.3. Промерзание грунтов в зависимости от соотношения характеристик плотности  $\rho_s$  и коэффициента теплопроводности  $\lambda_s$  снега: 1 —  $\rho_{\text{SH}}, \lambda_{\text{SH}}$ ; 2 —  $\rho_{\text{SB}}, \lambda_{\text{SH}}$ ; 3 —  $\rho_{\text{SH}}, \lambda_{\text{SB}}$ ; 4 —  $\rho_{\text{SB}}, \lambda_{\text{SB}}$  (здесь индексами “в” обозначены верхние (максимальные) значения характеристик, “н” — нижние)  
 Fig. 3. Soil freezing in relation to snow density  $\rho_s$  and thermal conductivity of snow  $\lambda_s$ : 1 —  $\rho_{\text{SH}}, \lambda_{\text{SH}}$ ; 2 —  $\rho_{\text{SB}}, \lambda_{\text{SH}}$ ; 3 —  $\rho_{\text{SH}}, \lambda_{\text{SB}}$ ; 4 —  $\rho_{\text{SB}}, \lambda_{\text{SB}}$ . Subscripts indicate “в” upper (maximum) values of properties, “н” — lower values

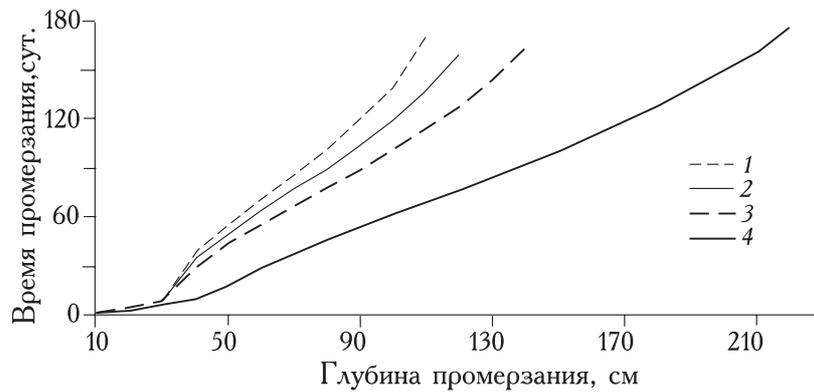


Рис.4. Промерзание грунтов разного гранулометрического состава при одинаковой начальной влажности грунта: 1 — песок, 2 — супесь, 3 — суглинок, 4 — глина

Fig. 4. A soil freezing for different grain-size and constant initial soil humidity: 1 — sand, 2 — sandy loam, 3 — loam, 4 — clay

лях динамики плотности и коэффициента теплопроводности глубина промерзания глины оказывается в полтора раза больше, чем суглинка, и в 1,8 и 2 раза больше, чем супеси и песка соответственно (рис. 4). Это объясняется большим количеством незамерзшей воды в глине и достаточно высокой начальной влажностью грунтов. Колебания показателей плотности и теплопроводности снега от их верхних до нижних значений сказываются на уменьшении глубины промерзания для глин в 2,8, для суглинков в 3,3, для супеси и песков в 3,9 раза.

При наличии снежного покрова влияние скорости ветра на промерзание грунта при средней и большой облачности незначительно — всего несколько процентов (рис.5), поскольку перепад температур между воздухом и поверхностью снега по данным расчета не превышает 1°. Однако при небольшой облачности этот перепад температур увеличивается. Так, если при сильной облачности 9 баллов и скорости ветра 1(10) м/с разница между температурой воздуха  $T_a$  и снега  $T_c$  равна 1 (0,3)°, то при облачности 1 балл —  $T_a - T_c = 4$  (1 ... 2)° (без учета влияния теплообмена на температу-

ру воздуха, что уменьшает перепад температур). Влияние же самой облачности на промерзание грунта более значительно при небольшой скорости ветра. Так, при ее значении 1 м/с время промерзания грунта на глубину 1 м увеличивается на 23% при росте облачности от 1 до 9 баллов и на 7% при 10 м/с.

Отметим парадоксальный, на первый взгляд, результат: рост скорости ветра при небольшой облачности замедляет промерзание на 10%. Так, при облачности 1 балл 1 м грунта промерзает за 112 суток при ветре 1 м/с и за 124 суток — при ветре 10 м/с, тогда как при высокой облачности 9 баллов потребуется 138 суток для промерзания 1 м грунта при скорости ветра 1 м/с и 133 суток — при 10 м/с. Причина в том, что при небольшой облачности длинноволновое излучение намного сильнее охлаждает поверхность снега, температура которой становится существенно ниже, чем воздуха, и рост скорости ветра приводит к повышению температуры поверхности и замедлению промерзания. Такой результат будет иметь место и в случае, когда температура воздуха определяется вторжением теплых воздушных масс.

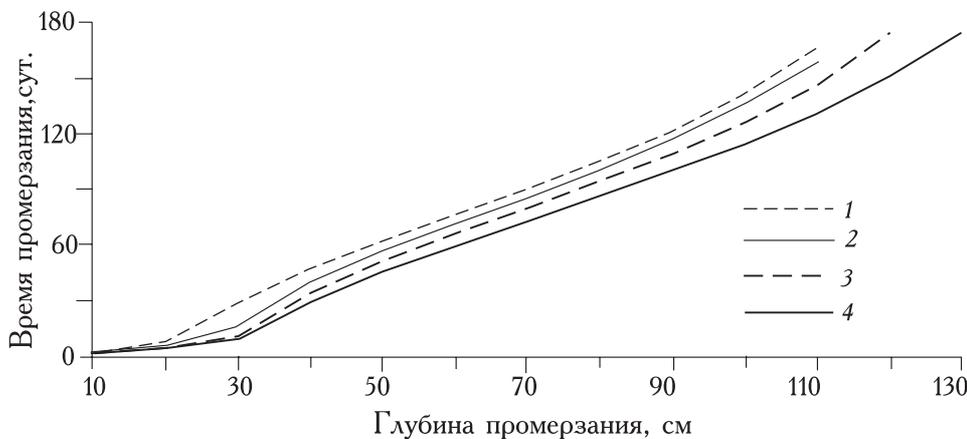


Рис.5. Влияние облачности n и скорости ветра v на промерзание суглинка: v = 1 м/с, n = 0,9 (1); v = 10 м/с, n = 0,9 (2); v = 10 м/с, n = 0,1 (3); v = 1 м/с, n = 0,1 (4)

Fig. 5. Influence of a cloudiness n and wind velocities v on loam freezing v = 1 м/s, n = 0,9 (1); v = 10 м/s, n = 0,9 (2); v = 10 м/s, n = 0,1 (3); v = 1 м/s, n = 0,1 (4)

Выполненные модельные исследования подтверждают существенное влияние на промерзание грунтов таких природных факторов как интенсивность снегонакопления и метаморфизма снега, температура воздуха, тип грунта, его влажность и в меньшей мере — скорость ветра и облачность.

Дальнейшие исследования будут посвящены изучению влияния на промерзание грунта снега сложной (реальной) структуры, установлению региональных закономерностей условий снегонакопления и метаморфизма снега. Исследование эффективного коэффициента теплопроводности снега возможно, по нашему мнению, двумя путями: используя первичные данные непосредственных измерений эффективной теплопроводности, что весьма затруднительно, или же включением в модель вместо эффективной теплопроводности составных частей потока тепла — теплопереноса в ледяной матрице снега, тепла, переносимого водяным паром в поровом пространстве, и тепла, переносимого потоком воздуха, вызываемым микроклиматической неоднородностью. Последний способ позволит наиболее точно рассчитать теплопроводность снега, но потребует предварительного создания физической модели теплопереноса на основе новейших экспериментальных данных.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вотяков И.Н. Физико-механические свойства мерзлых и оттаивающих грунтов Якутии. Новосибирск, "Наука", 1975, 176 с.
2. Осокин Н.И., Самойлов Р.С., Сосновский А.В. и др. К оценке влияния снежного покрова на динамику промерзания криогенных пород. — МГИ., вып. 84, 1998, с. 3-11.
3. Павлов А.В. Теплофизика ландшафтов. Новосибирск, "Наука", 1979, 284 с.
4. Павлов А.В. Расчет и регулирование мерзлотного режима почвы. Новосибирск, "Наука", 1980, 240 с.
5. СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах. Минстрой России. М., ГУП ЦПП, 1997, 52 с.
6. Albert M.R. Some numerical experiments on firn ventilation with heat transfer. — *Annals of Glaciology*, v.18, 1993, p.161-165.
7. Colbeck S.C. Model of wind pumping for layered snow. — *Journ.of Glaciol.*,v.43, N 143, 1997, p. 60-65.
8. Fukusako S. Thermophysical properties of ice, snow, and sea ice. *Intern. — Intern. Journ. of Thermophysics*, v.11, N 2, 1990, p.353-372.
9. Maeno N., Kuroda T. *Fundamental glaciology I. Structural and physical properties of snow and ice.* Tokyo. Kokon Shoin.,1986, 208 p. (на японском языке).
10. Pavlov A.V. Quantitative estimation of heat-transfer in landscape complexes of Northern Russia. — *Proc. of the Sixth Intern. Confer. on permafrost*, Beijing, 1993, p.511-516.
11. Pitman D., Zuckerman B. Effective thermal conductivity of snow at -88°, -27°o, and -5°C. — *Journ. Applied Physics*, v.38, N 6, 1967, p.2698-2699.
12. Sokratov S.A., Maeno N. Heat and mass transport in snow under a temperature gradient. -*Snow Engineering: Recent Advances.* Rotterdam, A.A. Balkema Publishers, 1997, p.49-54.
13. Sturm M., Holmgren J., Konig M., Morris K. The thermal conductivity of seasonal snow. — *Journ.of Glaciology*,v.43, N 143, 1997, p.26-41.
14. Sturm M., Johnson J.B. Natural convection in the subarctic snow cover. — *Journ. of Geophys. Research* , v. 96B, N 7, 1991, p.11657-11671.
15. Yen Y.-C. Effective thermal conductivity and water vapor diffusivity of naturally compacted snow. — *Journ. of Geophys. Research*, v.70, N 8, 1965, p. 1821-1825.
16. Yen Y.-C. Heat transfer by vapor transfer in ventilated snow. — *Journ. of Geophys. Research*, v.68, N 4, 1968, p.1093-1101.
17. Yen Y.-C. Effective thermal conductivity and water vapor diffusivity of naturally compacted snow. — *Journ.of Geophys.Research*, v.70, N 8, 1965, p.1821-1825.

#### SUMMARY

The soil freezing model has been developed that accounts the phase transition layer, variations of effective thermal conductivity of snow; change of snow density with thickness, variability of hydrometeorological parameters, and soil properties. The model shows the essential influence of effective thermal conductivity on soil freezing. At different parameters of a snow cover the depth of soil freezing (from the moment of an establishment of a snow cover) can vary by 8 — 9 times. Thus, the influence of thermophysical properties of snow on soil freezing can significantly exceed the influence of soil lithology and humidity. The influence of meteorological factors such as wind velocity and cloudiness on freezing is insignificant.