

МЕЛИОРАЦИЯ, ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И АГРОФИЗИКА

Научная статья

УДК 631.6:551.578.46

doi: 10.31774/2712-9357-2025-15-2-245-269

Анализ эффективности снежной мелиорации земель

Александр Фёдорович Галкин¹, Михаил Николаевич Железняк²,
Александр Федотович Жирков³, Николай Афанасьевич Плотников⁴

^{1, 2, 3, 4}Институт мерзлотоведения имени П. И. Мельникова Сибирского отделения

Российской академии наук, Якутск, Российская Федерация

¹afgalkin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5924-876X>

²fe1956@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4124-6579>

³zhirkov_af@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6721-5338>

⁴plotnikov-nikolay96@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6311-1723>

Аннотация. Цель: разработка нового критерия оценки тепловой эффективности снежной мелиорации с помощью уплотнения снежного покрова и оценка эффективности зимней мелиорации для увеличения влагоемкости снежного покрова. **Материалы и методы.** Исследован тепловой поток на поверхности мерзлого грунта при наличии снежного покрова с различным термическим сопротивлением; предложен метод оценки влияния снежной мелиорации на запасы влаги в снежном покрове. **Результаты.** Показано, что для большинства случаев, представляющих практический интерес, при вычислении удельного теплового потока от грунта в атмосферу при наличии снежного покрова на поверхности конвективной составляющей в коэффициенте теплопередачи можно пренебречь. Предложен показатель тепловой эффективности зимней мелиорации в криолитозоне путем уплотнения снежного покрова, основанный на изменении начального удельного теплового потока для достижения заданной температуры поверхности грунта до и после уплотнения снега. Обосновано новое научное положение о количественной связи степени изменения удельного теплового потока с коэффициентом уплотнения снежного покрова. Предложен простой способ количественной оценки влияния снежной мелиорации на изменение степени влагоемкости снежного покрова. **Выводы.** Установлено, что степень увеличения теплового потока на поверхности грунта при уплотнении снежного покрова прямо пропорциональна квадрату коэффициента уплотнения и не зависит от теплофизических свойств грунта и снега. Снежная мелиорация путем регулирования степени трамбования снега позволяет добиться эффекта как в зоне многолетней мерзлоты для восстановления нарушенных термокарстом сельскохозяйственных земель, так и для увеличения запасов влаги в снежном покрове при использовании зимней мелиорации в лесостепной зоне. В среднем для характерных условий земледелия в лесостепной зоне снежная мелиорация позволяет увеличить удельный снегозапас ($\text{м}^3/\text{га}$) на момент начала таяния снежного покрова почти в два раза.

Ключевые слова: криолитозона, мелиорация, грунт, снег, уплотнение, эффективность, температура поверхности, термическое сопротивление, тепловой поток, почва, запас влаги

Сведения о научно-исследовательской работе, по результатам которой публикуется статья: работа выполнена в соответствии с государственным заданием по теме «Тепловое поле и криогенная толща Северо-Востока России. Особенности формирования и динамика» (№ 122011800062-5).

Для цитирования: Анализ эффективности снежной мелиорации земель /

А. Ф. Галкин, М. Н. Железняк, А. Ф. Жирков, Н. А. Плотников // Мелиорация и гидротехника. 2025. Т. 15, № 2. С. 245–269. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2025-15-2-245-269>.

LAND RECLAMATION, WATER MANAGEMENT AND AGROPHYSICS

Original article

Analysis of snow reclamation efficiency of land

**Aleksandr F. Galkin¹, Mikhail N. Zheleznyak², Aleksandr F. Zhirkov³,
Nikolay A. Plotnikov⁴**

^{1, 2, 3, 4}Melnikov Permafrost Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

¹afgalkin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5924-876X>

²fe1956@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4124-6579>

³zhirkov_af@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6721-5338>

⁴plotnikov-nikolay96@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6311-1723>

Abstract. Purpose: to develop a new criterion for assessing the thermal efficiency of snow reclamation using snow cover compaction and to assess the winter reclamation efficiency to increase the moisture capacity of snow cover. **Materials and methods.** The heat flow on the frozen ground surface was investigated in the presence of snow cover with different thermal resistance; a method for assessing the effect of snow reclamation on moisture reserves in the snow cover was proposed. **Results.** It is shown that the convective component in the heat transfer coefficient can be neglected for most cases of practical interest, when calculating the specific heat flow from the ground to the atmosphere in the presence of snow cover on the surface. An indicator of the thermal efficiency of winter reclamation in the permafrost zone by compacting the snow cover is proposed, based on the change in the initial specific heat flow to achieve a given ground surface temperature before and after snow compaction. A new scientific concept on the quantitative relationship between the degree of change in the specific heat flow and the compaction coefficient of the snow cover is substantiated. A simple method for assessing quantitatively the effect of snow reclamation on changes in the degree of moisture capacity of the snow cover is proposed. **Conclusions.** It has been established that the degree of the heat flow increase on the soil surface during snow cover compaction is directly proportional to the squared compaction coefficient and does not depend on the thermophysical properties of soil and snow. Snow reclamation by regulating the degree of snow compaction allows achieving an effect both in the permafrost zone for the restoration of agricultural lands disturbed by thermokarst and for increasing moisture reserves in the snow cover when using winter reclamation in the forest-steppe zone. On average, for typical agricultural conditions in the forest-steppe zone, snow reclamation allows to increase the specific snow reserve (m^3/ha) at the beginning of snow cover melting almost twofold.

Keywords: cryolithozone, reclamation, soil, snow, compaction, efficiency, surface temperature, thermal resistance, heat flow, soil, moisture reserve

Information on the research work, based on the results of which the article is published: the work was carried out in accordance with the state assignment on the theme “Thermal Field and Cryogenic Layer of the North-East of Russia. Features of Formation and Dynamics” (no. 122011800062-5).

For citation: Galkin A. F., Zheleznyak M. N., Zhirkov A. F., Plotnikov N. A. Analysis of snow reclamation efficiency of land. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2025;15(2):245–269. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2025-15-2-245-269>.

Введение. Наиболее популярная формулировка для определения понятия «снежная мелиорация» была впервые приведена в классической работе А. М. Шульгина: «Снежная мелиорация – это воздействие на снежный покров и через него на тепловой и водный режим почвы с целью улучшения ее производственных функций» [1]. В литературных источниках встречаются и другие варианты подобной формулировки, которые можно обобщить и записать так: «Снежная мелиорация – это управление водно-тепловым режимом деятельного слоя грунта для улучшения его характеристик и обеспечения необходимых функций путем воздействия на снежный покров». Данная формулировка расширяет возможности применения снежной мелиорации за пределы сельского хозяйства. Действительно, снежная мелиорация применяется в различных отраслях хозяйственной деятельности человека и для различных целей. Например, в строительной и горной индустрии снежную мелиорацию применяют как для снижения, так и, наоборот, для увеличения глубины промерзания грунтов [2–6]. Снежную мелиорацию также широко применяют при строительстве и эксплуатации автомобильных и железных дорог как для борьбы со снежными заносами, так и при строительстве новых автомобильных дорог (зимников) [3, 4]. Но наиболее широкое применение снежная мелиорация нашла в сельском хозяйстве, где используются различные ее виды. В научных работах ряда авторов отмечается эффективность и перспективность использования методов водной и снежной мелиорации для восстановления нарушенных термокарстом земель криолитозоны [7–11] и повышения устойчивости ландшафтов криолитозоны, в том числе при антропогенном воздействии [12–14]. Нарушение обычно происходит при наличии в зоне теплового влияния поверхности льдонасыщенных грунтов или ледяных линз. Вовлечение таких земель в сельхозоборот приводит к увеличению глубины деятельного слоя с консолидацией грунта при оттаивании и образованием на поверхности многочисленных «криогенных кратеров» с последующим прогрессирующим

нарушением поверхности, приводящим к образованию траншей и оврагов. Подробно этот процесс описан в специальной литературе, например [9, 13]. Процесс восстановления земель заключается, прежде всего, в снижении глубины деятельного слоя грунта (слоя промерзания – оттаивания). Этого можно добиться путем понижения температуры деятельного слоя грунтов в зимний период и увеличения влажности пород деятельного слоя в теплый период года [11, 14, 15], т. е. комплексной зимней и летней мелиорацией грунтов. И если в средней полосе страны главной задачей зимней мелиорации является снижение глубины промерзания и увеличение влагоемкости снежного покрова (т. е. увеличение толщины снежного покрова), то в криолитозоне, наоборот, целью является снижение толщины снежного покрова для уменьшения его термического сопротивления. При этом и в том, и в другом случае возникает необходимость увеличения влажности деятельного слоя. Важным достоинством снежной мелиорации путем трамбования является сохранение запасов влаги в снежном покрове для весеннего увлажнения почвы при оттаивании. Известно, что потери влаги в зимний период за счет сублимации льда при ветровом переносе снега достигают существенных значений: до 60–70 % всех выпавших осадков [16–18]. Например, в работе [16] отмечается, что «ветро-метельная сублимация и ветровой снос снега с незащищенных вспаханных полей составляют большие суммарные величины потерь снеговой воды за зиму – около 50–80 мм, или 40–60 % выпавших атмосферных осадков. Это значит, что на этом поле недополучат, как минимум, 5–9 ц/га урожая в переводе на зерно пшеницы (зерновой продукции)». Для борьбы с потерями рекомендуется устраивать лесозащитные полосы через каждые 350–700 м [18]. Это позволяет сохранить часть зимних осадков. Там, где такой возможности нет, на наш взгляд, одним из эффективных способов сохранения влагоемкости снежного покрова является снежная мелиорация путем трамбования снега. Это позволит снизить действие ветровой нагрузки на снежный покров и избежать

потерь влаги за счет сублимации снега при вихревом перемещении снежной массы. Одним из простых и эффективных способов зимней мелиорации является искусственное уплотнение снежного покрова (вариант снежной мелиорации) [10, 11].

Цель исследований – разработка нового критерия оценки тепловой эффективности снежной мелиорации с помощью уплотнения снежного покрова и оценка эффективности зимней мелиорации для увеличения влагоемкости снежного покрова.

Материалы и методы. Для достижения цели воспользуемся классическими уравнениями, характеризующими плотность теплового потока на поверхности грунта при наличии термического сопротивления в виде снежного покрова [8, 14, 15]. Согласно закону Ньютона-Рихмана, граничные условия 3-го рода для теплового потока на границе грунта можно записать:

$$q(x=0, \tau=0) = -\lambda \frac{dT}{dx} = \alpha(T-t); \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_0} + R}, \quad (2)$$

где x – координата, м;

τ – время, с;

λ – коэффициент теплопроводности мерзлого грунта, Вт/м·К;

T – температура поверхности грунта, °С;

α – коэффициент теплопередачи от воздуха к грунту, Вт/м²·К;

t – температура воздуха, °С;

R – термическое сопротивление снежного покрова, м²·К/Вт;

α_0 – коэффициент конвективной теплоотдачи от воздуха к снежному покрову, Вт/м²·К (с достаточной для инженерных расчетов точностью может быть определен по формуле Юргенса [8]).

Учитывая, что $R \gg 1/\alpha_0$, можно записать следующее соотношение:

$\alpha = 1/R$. Соответственно, уравнение для определения теплового потока на поверхности грунта до ($i = 1$) и после уплотнения снежного покрова ($i = 2$) может быть записано в виде:

$$q_i = \frac{T_i - t}{R_i}. \quad (3)$$

Степень изменения теплового потока после уплотнения снега на поверхности грунта равна:

$$\beta = \frac{q_2}{q_1} = \frac{T_2 - t}{T_1 - t} \cdot \frac{R_1}{R_2}. \quad (4)$$

Данная формула позволяет определить, как должен измениться тепловой поток на поверхности, чтобы температура поверхности грунта была одинаковой и равной некоторой постоянной величине ($T_1 = T_2 = T_C$) за заданный промежуток времени, т. е. фактически параметр β является показателем (критерием) тепловой эффективности уплотнения снежного покрова. Чем больше значение этого показателя (критерия), тем эффективнее управление тепловым режимом деятельного слоя грунта в зимний период с помощью снежной мелиорации путем уплотнения снежного покрова.

Математическое выражение для определения данного критерия, с учетом сказанного и опираясь на формулу (4), может быть записано в виде:

$$\beta = \frac{q_2}{q_1} = \frac{R_1}{R_2}; R_i = \frac{\delta_i}{\lambda_i}; i = 1, 2, \quad (5)$$

где δ_i – толщина снежного покрова до ($i = 1$) и после уплотнения ($i = 2$), м.

Введем коэффициент уплотнения снега « k », который равен:

$$k = \frac{\delta_1}{\delta_2}, k > 1. \quad (6)$$

Очевидно, что если $k = 1$, то уплотнения снега нет. Поскольку масса снега при уплотнении не изменяется, можно записать следующее равенство:

$$M_1 = M_2 \text{ или } \rho_1 \delta_1 S_1 = \rho_2 \delta_2 S_2, \quad (7)$$

где M_1, M_2 – масса снега до и после уплотнения, кг;

ρ_1, ρ_2 – плотность снега до и после уплотнения, кг/м³;

S_1, S_2 – единица площади поверхности, м².

Согласно исследованиям, приведенным в работе А. В. Павлова [13], для определения коэффициента теплопроводности снега справедливо общее соотношение $\lambda = m\rho$, где m – характерный коэффициент, зависящий от вида снега. Из формул (6) и (7) следует:

$$k = \frac{\delta_1}{\delta_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}. \quad (8)$$

Подставляя данное выражение в формулу (5) и учитывая линейную зависимость коэффициента теплопроводности от плотности снега, легко найти зависимость степени изменения теплового потока (критерия эффективности снежной мелиорации) от коэффициента уплотнения снега:

$$\beta = \frac{R_1}{R_2} = \frac{\delta_1}{\delta_2} \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{\delta_1}{\delta_2} \cdot \frac{m\rho_2}{m\rho_1} = k \cdot k = k^2. \quad (9)$$

Оценку эффективности зимней мелиорации для увеличения влагоемкости снежного покрова проведем следующим образом (на примере земель лесостепной зоны страны [16, 17]). Опираясь на экспериментальные данные, приведенные в данных работах, можно записать следующее уравнение для определения потерь влагоемкости снежного покрова:

$$W = W_0(1 - f \cdot K), \quad (10)$$

где W – общие потери влаги в снежном покрове, кг/м² (мм/м²);

W_0 – общее количество осадков за зимний период, кг/м² (мм/м²);

f – экспериментальный коэффициент потерь запасов влаги от ветровой сублимации, д. е.;

K – коэффициент эффективности трамбования снежного покрова, д. е.

Коэффициент эффективности трамбования снежного покрова K показывает степень защищенности поверхности от ветрового сноса. Напри-

мер, при трамбовании снега с помощью полива и образования снежной корки коэффициент равен нулю. Для естественной снежной поверхности до проведения мелиоративных мероприятий коэффициент равен единице. Такой подход (введение дополнительного коэффициента K) позволяет нам теоретически учесть функциональную связь степени потерь влаги со степенью уплотнения снежного покрова. В целом эффективность снежной мелиорации по степени сохранения влагоемкости снежного покрова за счет минимизации потерь от ветровой сублимации будет определяться отношением W/W_0 : чем ближе этот показатель к единице, тем эффективнее мероприятия зимней мелиорации. Коэффициент потерь запасов влаги (f) зависит, прежде всего, от скорости ветра и (теоретически) может составлять до 100 % ($f = 1,0$), т. е. полное удаление снежного покрова. В реальных условиях, как следует из данных натурных наблюдений [16, 17], этот коэффициент достигает величины 0,7. Это означает, что влагозапас снежного покрова может уменьшаться на 70 % от начального выпавшего объема осадков. Произведение двух коэффициентов ($f \cdot K$), входящее в формулу (10), позволяет судить об эффективности мер по снижению потерь влаги от ветровой сублимации путем снежной мелиорации. Естественно, что предлагаемый метод оценки является грубым приближением к реальной картине изменения влагосодержания снежного покрова в течение зимнего периода, поскольку указанные коэффициенты должны определяться экспериментально в конкретных условиях. Но для общего понимания количественных характеристик эффективности снежной мелиорации с позиции сохранения запасов влаги в снежном покрове такой подход, по нашему мнению, является приемлемым. Кроме того, такая форма записи удобна тем, что позволяет оперативно оценить степень увеличения объема снега (V_0 , м³/га) при проведении снежной мелиорации уплотнением. Объем снега, приходящийся на момент таяния на 1,0 га поверхности земли (без мелиорации), равен:

$$V_0 = h_0(1 - f)10^4, \quad (11)$$

где h_0 – средняя толщина снежного покрова, м.

Объем снега, приходящийся на момент таяния на 1,0 га поверхности земли (после уплотнения снежного покрова), равен:

$$V_1 = h_0(1 - f K)10^4. \quad (12)$$

Степень увеличения снегонакопления легко найти, разделив эти выражения, т. е.:

$$\frac{V_1}{V_0} = \frac{1 - f K}{1 - f}. \quad (13)$$

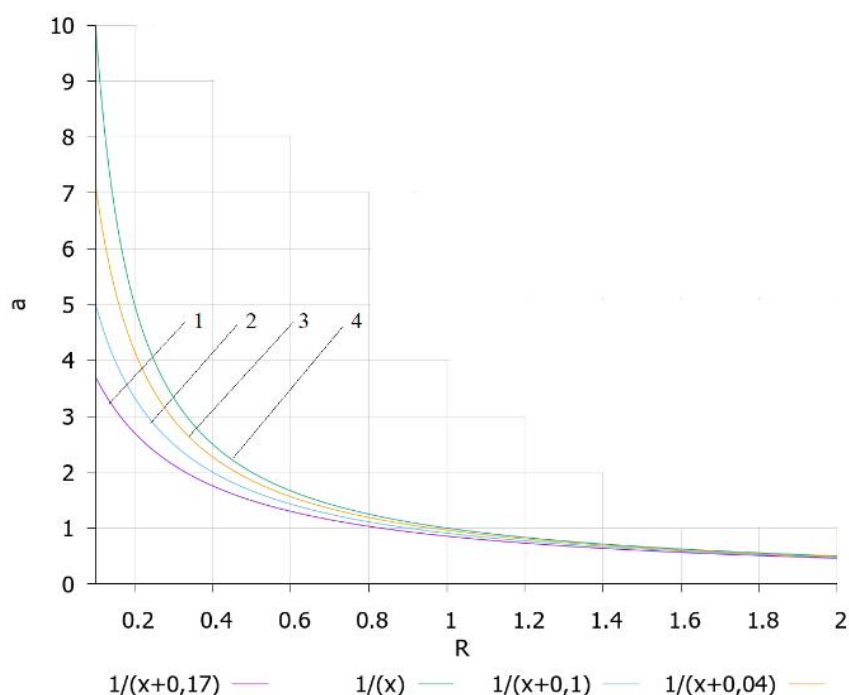
Если $K = 1$ (нет снежной мелиорации), то отношение равно единице, т. е. объем накопленного объема снега определяется по формуле (11). Если $K = 0$ (потери снега за счет ветровой сублимации отсутствуют), то выражение (13) запишется как:

$$\frac{V_1}{V_0} = \frac{1}{1 - f}. \quad (14)$$

В реальных условиях коэффициент K , по всей вероятности (согласно его смыслу), должен изменяться от 0,3 до 0,7. Так как уплотнение снега нельзя проводить постоянно (свежий снег, выпавший на уже уплотненный слой, будет подвержен ветровой сублимации), равно как нельзя и полностью избежать сублимационных процессов. Хотя, например, в работе известного гляциолога А. К. Дюнина приводится пример, когда простой процесс естественного уплотнения снега под действием суточных колебаний температуры воздуха при проведении экспериментов приводил к полному прекращению ветровой сублимации даже при значительных скоростях ветра, имитированных в экспериментальной установке [20].

Если требуется определить абсолютное значение объема снега, которое участвует в увлажнении почвы при проведении мелиоративных мероприятий, то целесообразно пользоваться формулой (11).

Результаты и обсуждение. Прежде всего, следует обосновать возможность использования допущения, что $R \gg 1/\alpha_0$, т. е. влиянием коэффициента конвективной теплоотдачи на коэффициент теплопередачи от воздуха к поверхности грунта можно пренебречь. Рассмотрим, как изменяется коэффициент теплопередачи в зависимости от термического сопротивления снежного покрова и коэффициента конвективной теплоотдачи. Для этого по формуле (2) были проведены вариантные расчеты, которые представлены в виде 2D-графиков на рисунке 1.

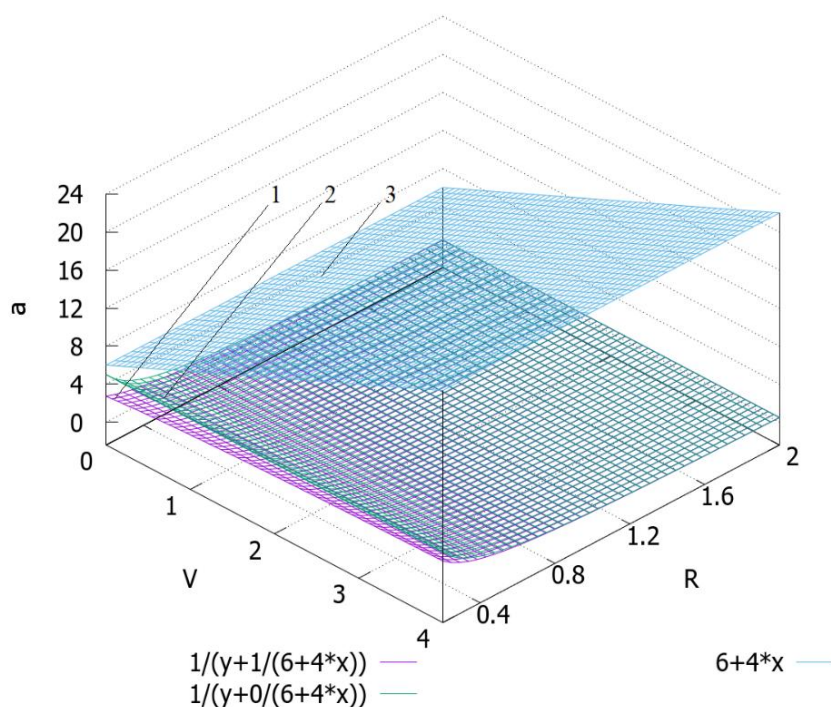


1 – 0,0 м/с; 2 – 1,0 м/с; 3 – 5,0 м/с;
4 – коэффициент конвективной теплоотдачи не учитывается
1 – 0.0 m/s; 2 – 1.0 m/s; 3 – 5.0 m/s;
4 – convective heat transfer coefficient is not taken into account

Рисунок 1 – Изменение коэффициента теплопередачи в зависимости от термического сопротивления снежного покрова при различной средней скорости ветра
Figure 1 – Change in heat transfer coefficient depending on the thermal resistance of snow cover at different average wind speeds

Из графиков, представленных на рисунке 1, видно, что с увеличением термического сопротивления снежного покрова (выше 0,7–0,8 м²/Вт) конвективная составляющая теплообмена, зависящая от средней скорости

ветра в зимний период, практически не оказывает влияния на значение коэффициента теплопередачи, величина которого в этом случае полностью определяется значением термического сопротивления снежного покрова. Кривые на рисунке 1, соответствующие разным значениям среднезимней скорости ветра (от 0,0 до 5,0 м/с) на участке изменения термического сопротивления от 0,8 до 2,0 м²/Вт, практически сливаются. Для наглядности на рисунке 2 приведен 3D-график изменения коэффициента теплопередачи в зависимости от значения конвективной составляющей теплообмена (определяется скоростью ветра) и термического сопротивления снежного покрова (кондуктивной составляющей).



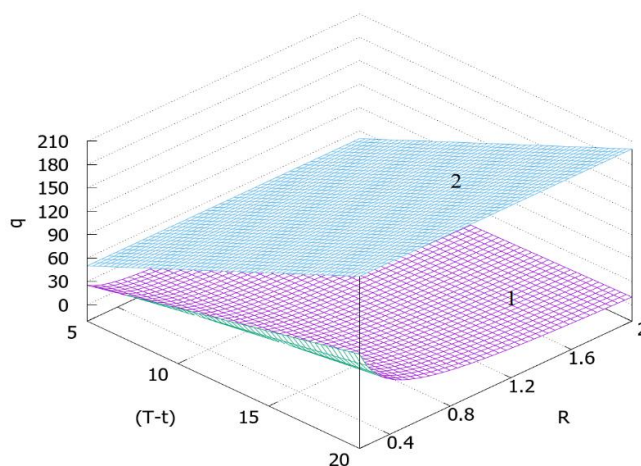
- 1 – с учетом конвективной и кондуктивной (термическое сопротивление) составляющей теплообмена; 2 – без учета конвективной составляющей теплообмена; 3 – без учета кондуктивной составляющей теплообмена
1 – taking into account the convective and conductive (thermal resistance) components of heat exchange; 2 – without taking into account the convective component of heat exchange; 3 – without taking into account the conductive component of heat exchange

Рисунок 2 – Изменение коэффициента теплопередачи в зависимости от среднезимней скорости ветра(V) и термического сопротивления снежного покрова(R)

Figure 2 – Change in heat transfer coefficient depending on average winter wind speed (V) and thermal resistance of snow cover (R)

Характер расположения плоскостей на рисунке 2 подтверждает ранее сделанный вывод о роли конвективной составляющей в определении численного значения коэффициента теплопередачи при наличии на поверхности грунта снежного покрова.

Соответственно и величина теплового потока от грунта к воздуху будет определяться, главным образом, значением термического сопротивления снежного покрова. На рисунке 3 приведен 3D-график изменения удельного теплового потока в зависимости от значения термического сопротивления снежного покрова и температурного напора (разности температур поверхности грунта и атмосферного воздуха). Для сравнения на рисунке 3 приведена поверхность (плоскость 2), характеризующая изменение теплового потока при отсутствии снежного покрова. Рисунок 3 позволяет наглядно убедиться в эффективной роли термического сопротивления снежного покрова в формировании температурного режима деятельного слоя (величине теплового потока от грунта в атмосферу).



1 – с учетом конвективной и кондуктивной (термическое сопротивление) составляющей теплообмена; 2 – без учета кондуктивной составляющей теплообмена
1 – taking into account the convective and conductive (thermal resistance) components of heat exchange; 2 – without taking into account the conductive component of heat exchange

Рисунок 3 – Изменение теплового потока в зависимости от температурного напора ($T - t$) и термического сопротивления снежного покрова (R)

Figure 3 – Change in heat flow depending on the temperature difference ($T - t$) and thermal resistance of snow cover (R)

Вернемся к анализу установленной закономерности изменения теплового потока при проведении тепловой мелиорации уплотнением снежного покрова. Из формулы (9) следует, что степень изменения теплового потока на поверхности грунта при уплотнении снежного покрова для формирования заданного температурного режима деятельного слоя пропорциональна квадрату коэффициента уплотнения и не зависит от теплофизических свойств снега и грунта. Верно утверждение, что при уплотнении снега начальный тепловой поток численно увеличивается пропорционально квадрату коэффициента уплотнения. Следовательно, для охлаждения температуры поверхности грунта до постоянной заданной величины длительность периода охлаждения уменьшается. Другими словами, если мы, например, уплотнили снег с толщины 0,5 м до 0,25 м (коэффициент уплотнения равен двум), то для того, чтобы за 1 месяц температура поверхности грунта понизилась до заданной величины, требуемый тепловой поток должен быть в 4 раза меньше, чем на участке с естественным, не уплотненным снежным покровом. Для наглядности на рисунках 4 и 5 приведены результаты численных расчетов, подтверждающих сформулированное научное положение. На рисунке 4 приведен 3D-график, характеризующий степень увеличения теплового потока на поверхности грунта β при уменьшении толщины снежного покрова путем трамбования с толщины (δ_1 , м) до толщины (δ_2 , м).

Как видно из графика, показатель (критерий) эффективности существенно возрастает при изменении степени уплотнения и не зависит от начальной толщины снежного покрова. На рисунке 5 представлен график изменения теплового потока после трамбования снега q_2 в зависимости от первоначального теплового потока q_1 и степени уплотнения снежного покрова k .

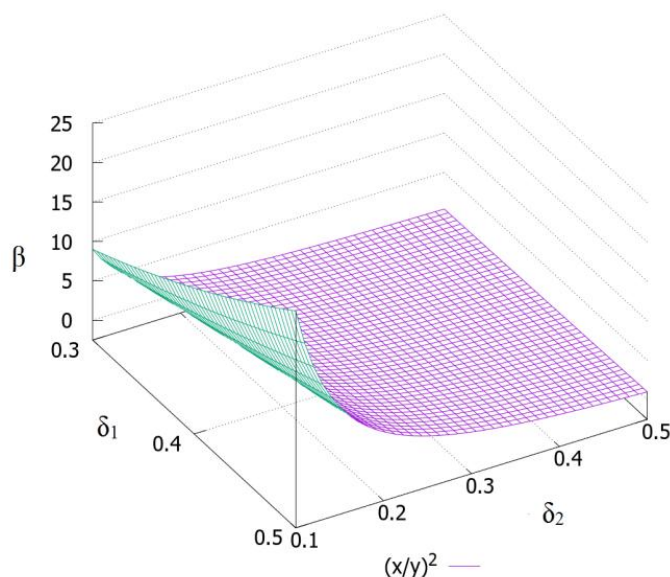


Рисунок 4 – Степень увеличения теплового потока на поверхности грунта β при уменьшении толщины снежного покрова путем трамбования с толщины δ_1 до толщины δ_2 (м)

Figure 4 – Degree of increase in heat flow on the soil surface β with a decrease in the snow cover thickness by compaction from a thickness of δ_1 to δ_2 (m)

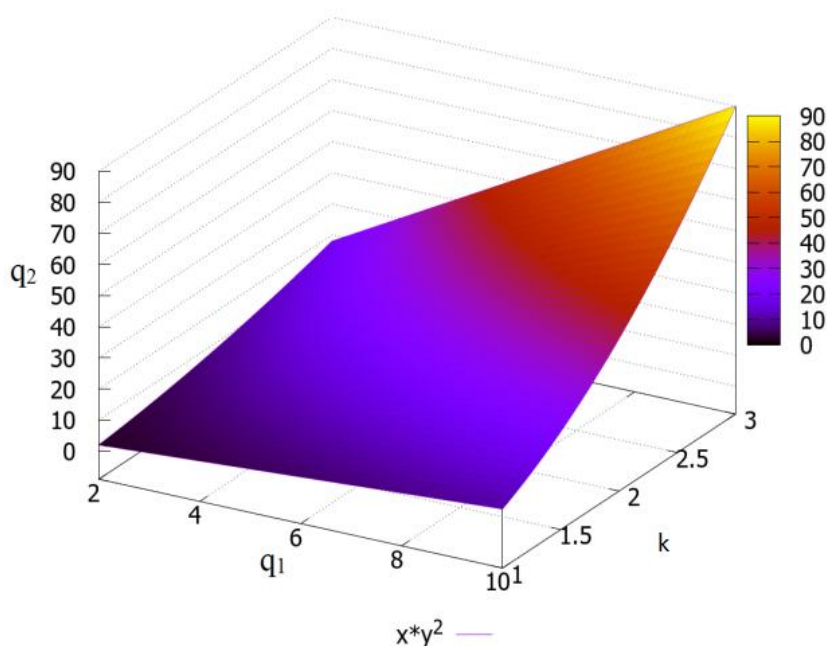


Рисунок 5 – Изменения теплового потока на поверхности грунта q_2 при уменьшении толщины снежного покрова путем трамбования (коэффициент уплотнения k) в зависимости от начального теплового потока q_1

Figure 5 – Changes in the heat flow on the soil surface q_2 with a decrease in the snow cover thickness by compaction (compaction coefficient k) depending on the initial heat flow q_1

Из графика следует, что снежная мелиорация путем трамбования снега является эффективным способом охлаждения грунтов деятельного слоя, которое позволяет значительно увеличить тепловой поток от мерзлого массива в окружающую среду и снизить глубину оттаивания при мелиорации нарушенных термокарстом земель. Причем в каждом конкретном случае с помощью предложенного простого метода можно оценить количественную эффективность применения данного типа снежной мелиорации в конкретных условиях (по сравнению с другими способами охлаждения грунтового массива), не прибегая на первом этапе оценки к сложным теплофизическим и экономическим расчетам. Количественную оценку эффективности снежной мелиорации по степени минимизации потерь влагоемкости снежного покрова от ветровой сублимации определим по формуле (10) путем проведения вариантных расчетов и построения соответствующих зависимостей в виде графиков. На рисунке 6 приведен график изменения потерь влаги в зимний период в снежном покрове (W/W_0) в зависимости от коэффициента ожидаемых потерь от ветровой сублимации снега (f) и степени эффективности трамбования (K).

Как следует из анализа цветовой дифференциации плоскости на графике, область низких значений уменьшения запасов влаги (W/W_0), которая выделена на рисунке 6 синим цветом, значительно меньше области возможных значений коэффициента уменьшения запасов влаги при снижении параметра K , характеризующего эффективность снежной мелиорации (чем меньше коэффициент, тем выше эффективность), выделенного желтым цветом. Причем чем ниже значение коэффициента K , тем сильнее его влияние на степень снижения потерь влаги при увеличении коэффициента сублимационных потерь (f), что собственно напрямую следует из формулы (10), и график на рисунке 6 просто наглядно демонстрирует эту зависимость. На рисунке 7 показано изменение влагоемкости снежного покрова при проведении снежной мелиорации путем трамбования при различной интенсивности потерь от ветровой сублимации снега.

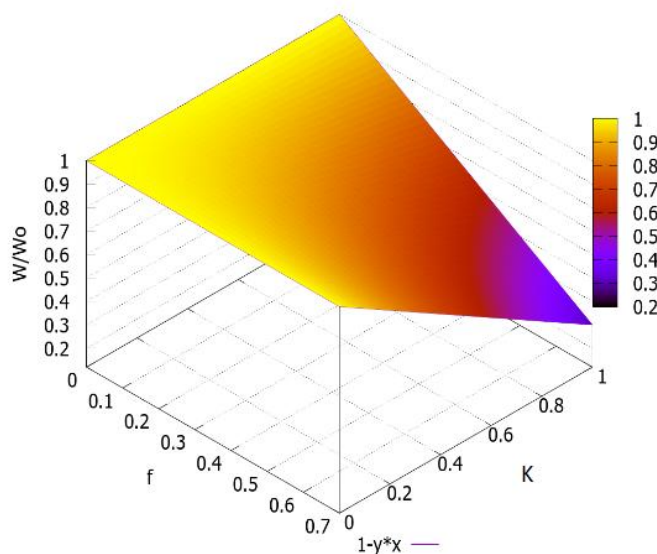


Рисунок 6 – Изменение степени потери влаги (W/W_0) при снежной мелиорации в зависимости от коэффициента потерь от ветровой сублимации (f) и коэффициента эффективности трамбования снежного покрова (K)

Figure 6 – Change in the degree of moisture loss (W/W_0) during snow reclamation depending on the coefficient of losses from wind sublimation (f) and the efficiency coefficient of snow cover compaction (K)

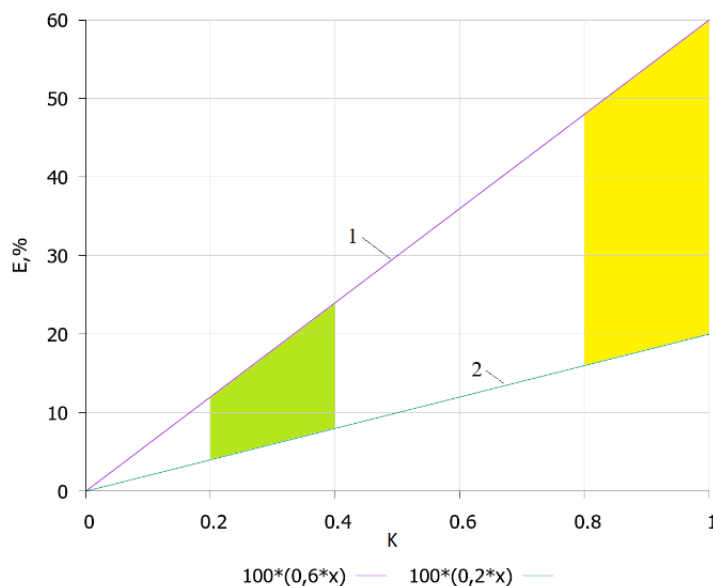


Рисунок 7 – Процент потерь влаги (E , %) при снежной мелиорации в зависимости от коэффициента эффективности трамбования снежного покрова (K) при различном значении интенсивности потерь от ветровой сублимации (f): 1 – 60 %; 2 – 20 %

Figure 7 – Percentage of moisture loss (E , %) during snow reclamation depending on the efficiency coefficient of snow cover compaction (K) at different values of intensity of losses from wind sublimation (f): 1 – 60 %; 2 – 20 %

Графики на рисунке 7 показывают, что как для незначительных потерь влаги (линия 2), так и для значительных потерь (линия 1) за счет ветровой сублимации, область, в которой степень потерь влаги находится выше точности инженерных расчетов (10 %), значительна при любом коэффициенте эффективности снежной мелиорации (K). Это следует из простого сравнения графиков. Для большей наглядности на рисунке 7 желтым и зеленым цветом выделены характерные области, сравнение которых показывает, что уменьшением коэффициента K (увеличением эффективности снежной мелиорации) можно существенно снизить потери влаги в снежном покрове. В реальных условиях это может быть достигнуто, например, периодическим трамбованием снежного покрова сразу после снегопадов.

Представляет интерес оценка влияния зимней мелиорации в рассматриваемом случае на изменение термического сопротивления, которое оказывает влияние на глубину промерзания грунтов (глубину деятельного слоя). Расчеты выполнены с использованием характерных данных, приведенных в работах [16, 17]. Среднее термическое сопротивление снежного покрова при потерях от ветровой сублимации (60 %) от величины выпавших осадков (500 мм) и средней плотности выпавшего снега (200 кг/м^3) будет равно $1,0 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$. При проведении снежной мелиорации путем уплотнения снежного покрова (коэффициент уплотнения 1,5) плотность снега будет равна 300 кг/м^3 , а толщина снежного покрова уменьшится (333 мм). Термическое сопротивление будет равно $1,1 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$, т. е. расчетное увеличение термического сопротивления не составит более 10 %, что вполне укладывается в допустимую точность инженерных расчетов. Следовательно, зимняя мелиорация при сохранении влагоемкости снежного покрова за счет минимизации сублимационных потерь практически не оказывает влияния на увеличение глубины промерзания почвы. Отсюда следует важный вывод: для борьбы с криогенезом степень трамбования должна быть как можно больше, а для сохранения влагоемкости снежного покрова – как

можно меньше. Эти требования определяют и выбор технических способов и средств обеспечения заданного уровня трамбования снежного покрова.

Выполненная оценка показывает, что снежная мелиорация путем трамбования снега позволяет добиться эффекта как в зоне многолетней мерзлоты для восстановления нарушенных термокарстом сельскохозяйственных земель, так и для увеличения запасов влаги в снежном покрове при использовании зимней мелиорации в лесостепной зоне. При этом во втором случае рациональной степенью трамбования можно добиться незначительного увеличения глубины промерзания почвы при значительном увеличении влагоемкости снежного покрова. Поиск оптимального коэффициента уплотнения снежного покрова для достижения максимального эффекта по влагонакоплению является перспективным направлением исследований, имеющим как научное, так и прикладное значение.

На рисунке 8 представлены результаты расчетов по формуле (13) для определения степени увеличения накопления влаги в снежном покрове при проведении снежной мелиорации уплотнением.

Анализ результатов расчетов, представленных в виде трехмерного графика, показывает, что с позиции влагонакопления снежного покрова для весеннего увлажнения плодородного слоя снежная мелиорация является эффективным способом, позволяющим существенно увеличить влагозапас снежного покрова к моменту начала таяния. Причем чем больше в районе земледелия развиты процессы ветровой сублимации (наиболее характерные для степной зоны земледелия), тем больше эффективность. Так, например, при коэффициенте потерь 0,6 (60 %) от начального снегонакопления и среднем коэффициенте эффективности уплотнения 0,5 степень увеличения объема снега на 1 га площади пашни составит 1,75, а при увеличении коэффициента эффективности уплотнения до 0,3 вырастет до 2,1. Таким образом, снежная мелиорация позволяет в среднем почти в два раза увеличить количество влаги, которое поступает в плодородный слой почвы за счет таяния снежного покрова.

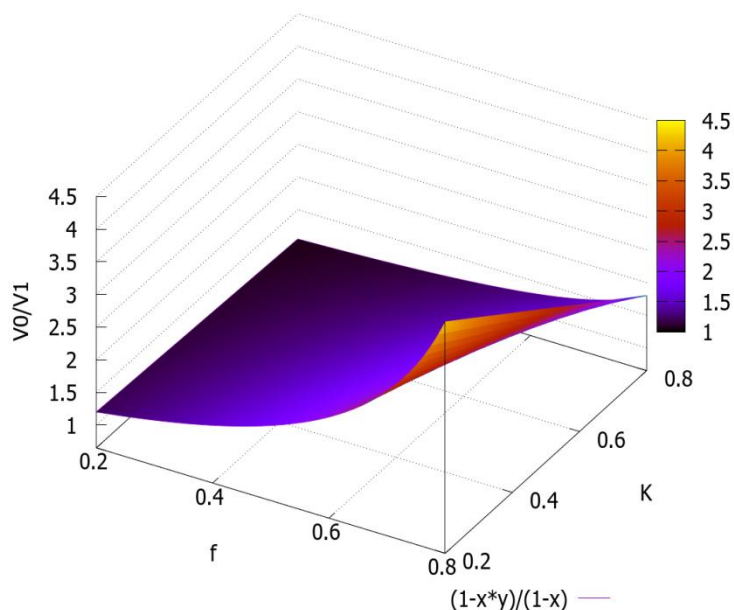


Рисунок 8 – Степень увеличения объема снега на 1 га поверхности земли при снежной мелиорации в зависимости от коэффициента эффективности трамбования снежного покрова (K) при различном значении коэффициента потерь (f) от ветровой сублимации

Figure 8 – The degree of increase in snow volume per 1 ha of the earth's surface during snow reclamation depending on the efficiency coefficient of snow cover compaction (K) with different values of the coefficient of losses (f) from wind sublimation

Рассмотрим пример, используя данные, приведенные в работах [16, 17]. Среднее количество выпавших осадков в районе проведения мелиоративных работ составляет 0,5 м. За счет сублимационных процессов в течение года потери составляют 60,0 %. Количество снега, которое будет израсходовано на увлажнение почвы, составит 200,0 м³/га. Проведение снежной мелиорации позволило снизить потери до величины 18,0 % (при K = 0,3). Количество снега для увлажнения почвы на момент таяния составит 410,0 м³/га. Данные величины являются средними. В реальных условиях они могут быть как ниже, так и выше полученных значений. Однако в целом можно утверждать, что снежная мелиорация трамбованием является эффективным способом повышения снегонакопления.

Выводы. Исследован тепловой поток на поверхности мерзлого грунта при наличии снежного покрова с различным термическим сопротивле-

нием. Показано, что в большинстве случаев, представляющих практический интерес, при вычислении удельного теплового потока от грунта в атмосферу при наличии снежного покрова на поверхности конвективной составляющей в коэффициенте теплопередачи можно пренебречь. Предложены метод и критерий для оценки тепловой эффективности снежной мелиорации в криолитозоне путем уплотнения снежного покрова. Сформулировано и доказано новое научное положение, связывающее степень изменения теплового потока на поверхности грунта при проведении снежной мелиорации со степенью уплотнения снежного покрова.

Предложена следующая формулировка нового научного положения: «Изменение удельного теплового потока на поверхности грунта при уплотнении снежного покрова прямо пропорционально квадрату коэффициента уплотнения и не зависит от теплофизических свойств грунта и снега». Например, если проведено уплотнение снежного покрова с толщины 0,5 м до 0,25 м (коэффициент уплотнения равен двум), то для того, чтобы за 1 месяц температура поверхности грунта понизилась до заданной величины, тепловой поток должен быть в четыре раза меньше, чем на участке с естественным, не уплотненным снежным покровом. Снежная мелиорация путем регулирования степени трамбования снега позволяет добиться эффекта как в зоне многолетней мерзлоты для восстановления нарушенных термокарстом сельскохозяйственных земель, так и для увеличения запасов влаги в снежном покрове при использовании зимней мелиорации в лесостепной зоне. При этом во втором случае рациональной степенью трамбования можно добиться незначительного увеличения глубины промерзания почвы при значительном увеличении влагоемкости снежного покрова. Поиск оптимального коэффициента уплотнения снежного покрова для достижения максимального эффекта по влагонакоплению является перспективным направлением исследований, имеющим как научное, так и прикладное значение. Снежная мелиорация является эффективным способом,

позволяющим существенно увеличить влагозапас снежного покрова к моменту начала таяния. Причем чем больше в районе земледелия развиты процессы ветровой сублимации (наиболее характерные для степной зоны земледелия), тем больше эффективность. В среднем для характерных условий земледелия в лесостепной зоне снежная мелиорация позволяет увеличить удельный снегозапас ($\text{м}^3/\text{га}$) на момент таяния снежного покрова почти в два раза.

Дальнейшие исследования в данной области должны быть направлены на экспериментальное подтверждение новых закономерностей путем проведения натурного эксперимента.

Список источников

1. Шульгин А. М. Снежная мелиорация и климат почвы. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 70 с.
2. Железняк И. И., Саркисян Р. М. Методы управления сезонным промерзанием грунтов в Забайкалье. Новосибирск: Наука. 1987. 128 с.
3. Оптимизация технологии строительства зимних дорог / Е. Ж. Асанкожоев, Э. С. Караев, П. Ю. Третьяков, Л. С. Ничипорук // Инженерный вестник Дона. 2022. № 5(89). С. 473–482. EDN: HXWLIJ.
4. Ашпиз Е.С., Савин А.Н. Сооружение нового и стабилизация эксплуатируемого земляного полотна в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов северного широтного хода // Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике: сб. тр. конф. г. Салехард, 3–12 нояб. 2021 г. Салехард, 2021. С. 27–29. DOI: 10.7868/9785604610848004. EDN: OSXUJM.
5. Лабыкин А. А., Кручинин И. Н., Ахтямов Э. Р. Разработка требований к уплотненному снежному покрову зимних лесных дорог // Деревообрабатывающая промышленность. 2023. № 2. С. 10–19. EDN: JIQCDN.
6. Борисов В. А., Акинин Д. В., Паюл А. Д. Изменения плотности снега при сжимающей нагрузке // Resources and Technology. 2021. Т. 18, № 3. С. 77–91. DOI: 10.15393/j2.art.2021.5843. EDN: LMQJYF.
7. Scientific and human errors in a snow model intercomparison / C. Menard, R. Essery, G. Krinner, C. Brutel-Vuilmet [et al.] // Bulletin of the American Meteorological Society. 2021, Vol. 201, no. 1. P. E61–E79. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0329.1>. EDN: MSKHVJ.
8. Перлыштейн Г. З. Водно-тепловая мелиорация мерзлых пород на Северо-Востоке СССР. Новосибирск: Наука. 1979. 304 с.
9. Гаврильев П. П., Угаров И. С., Ефремов П. В. Особенности использования льдистых пахотных земель в Центральной Якутии в условиях изменения климата // Наука и образование. 2009. № 4. С. 63–65. EDN: KYXTSZ.
10. Жирков А. Ф., Сивцев М. А. Оценка возможности восстановления защитного слоя в условиях Центральной Якутии // Мониторинг в криолитозоне: сб. докл. Шестой конф. геокриологов России с участием рос. и зарубеж. учен., инж. и специалистов. г. Москва, 14–17 июня 2022 г. М.: КДУ, Добросовет, 2022. С. 444–450. EDN: CLXENR.

11. An Assessment of the Possibility of Restoration and Protection of Territories Disturbed by Thermokarst in Central Yakutia, Eastern Siberia / A. Zhirkov, M. Sivtsev, V. Lytkin, A. Kirillin, A. Séjourné, Z. Wen // *Land*. 2023. Vol. 12, no. 1. 17 p. DOI: 10.3390/land12010197. EDN: CSHWRO.

12. Особенности снегонакопления и параметры снежного покрова на Эльконском горном массиве / А. Р. Кириллин, М. Н. Железняк, А. Ф. Жирков, И. Е. Мисайлов, А. Г. Верхотуров, М. А. Сивцев // *Вестник Забайкальского государственного университета*. 2020. Т. 26, № 7. С. 62–76. DOI: 10.21209/2227-9245-2020-26-7-62-76. EDN: FOCISC.

13. Павлов А. В. Мониторинг криолитозоны. Новосибирск: Гео, 2008. 225 с.

14. Котляков В. М., Сосновский А. В. Оценка термического сопротивления снежного покрова по температуре грунта // *Лёд и снег*. 2021. Т. 61, № 2. С. 195–205. DOI: 10.31857/S2076673421020081. EDN: XPBXXL.

15. Галкин А. Ф., Железняк М. Н., Жирков А. Ф. Расчет температуры поверхности дорожного полотна // *Успехи современного естествознания*. 2022. № 11. С. 124–129. DOI: 10.17513/use.37939. EDN: NZGKRZ.

16. Панов В. И. Потери снега на ветро-метельную сублимацию и снос в открытых и лесомелиорированных агроландшафтах степной зоны // *Научно-агрономический журнал*. 2016. № 2(99). С. 10–12. EDN: XBVVRB.

17. Панов В. И. Потери атмосферных осадков с незащищенных полей в степном засушливом субрегионе, их существенное снижение и стабилизация гидроресурсного потенциала земледелия созданием лесомелиорированных (лесоаграрных) бассейновых агроэколандшафтов // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2016. Т. 18, № 2-2. С. 472–478. EDN: WZTWLZ.

18. Кулик К. Н., Барабанов А. Т., Панов В. И. Оптимизация снегораспределения и влагообеспеченности в контурных полевзащитно-стокорегулирующих лесных полосах и в лесомелиорированных ландшафтах // *Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук*. 2012. № 2. С. 58–61. EDN: ORGSOP.

19. Осокин Н. И., Сосновский А. В., Чернов Р. А. Коэффициент теплопроводности снега и его изменчивость // *Криосфера Земли*. 2017. Т. 21, № 3. С. 60–68. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-3(60-68). EDN: YPTHAJ.

20. Дюнин А. К. В царстве снега. М.: URSS. 2021. 168 с.

References

1. Shulgin A.M., 1986. *Snezhnaya melioratsiya i klimat pochvy* [Snow Reclamation and Soil Climate]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 70 p. (In Russian).

2. Zheleznyak I.I., Sarkisyan R.M., 1987. *Metody upravleniya sezonnym promerzaniem gruntov v Zabaykal'ye* [Methods for Managing Seasonal Soil Freezing in Transbaikalia Region]. Novosibirsk, Nauka Publ., 128 p. (In Russian).

3. Asankozhiev E.Zh., Karaev E.S., Tretyakov P.Yu., Nichiporuk L.S., 2022. *Optimizatsiya tekhnologii stroitel'stva zimnikh dorog* [Optimization of winter road construction technologies]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], no. 5(89), pp. 473–482, EDN: HXWLIJ. (In Russian).

4. Ashpiz E.S., Savin A.N., 2021. *Sooruzhenie novogo i stabilizatsiya ekspluatiruemogo zemlyanogo polotna v usloviyakh rasprostraneniya mnogoletnemerzlykh gruntov severnogo shirotnogo khoda* [Construction of a new and stabilization of the exploited subgrade on the conditions of the permafrost soils of the northern latitudinal railway]. *Sovremennye issledovaniya transformatsii kriosfery i voprosy geotekhnicheskoy bezopasnosti sooruzheniy v Arktike: sb. tr. konf.* [Proceed. of the Conference: Modern Studies of the Cryosphere Transformation and Issues of Geotechnical Safety of Structures in the Arctic]. Salekhard, pp. 27–29, DOI: 10.7868/9785604610848004, EDN: OSXUJM. (In Russian).

5. Labykin A.A., Kruchinin I.N., Akhtyamova E.R., 2023. *Razrabotka trebovaniy k uplotnennomu snezhnomu pokrovu zimnikh lesnykh dorog* [Development of requirements for compacted snow cover of winter forest roads]. *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'* [Wood Processing Industry], no. 2, pp. 10-19, EDN: JIQCDN. (In Russian).

6. Borisov V.A., Akinin D.V., Payul A.D., 2021. *Izmeneniya plotnosti snega pri czhimayushchey nagruzke* [Changes in snow density under compressive load]. *Resources and Technology*, vol. 18, no. 3, pp. 77-91, DOI: 10.15393/j2.art.2021.5843, EDN: LMQJYF. (In Russian).

7. Menard C., Essery R., Krinner G., Brutel-Vuilmet C., [et al.], 2021. Scientific and human errors in a snow model intercomparison. *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 201, no. 1, pp. E61–E79, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0329.1>, EDN: MSKHVJ.

8. Perlshtein G.Z., 1979. *Vodno-teplovaya melioratsiya merzlykh porod na Severo-Vostoke SSSR* [Water-Thermal Reclamation of Frozen Rocks at the North-East of the USSR]. Novosibirsk, Nauka Publ., 304 p. (In Russian).

9. Gavriliev P.P., Ugarov I.S., Efremov P.V., 2009. *Osobennosti ispol'zovaniya l'distnykh pakhotnykh zemel' v Tsentral'noy Yakutii v usloviyakh izmeneniya klimata* [Features of the use of ice-rich arable lands in Central Yakutia under climate change]. *Nauka i obrazovanie* [Science and Education], no. 4, pp. 63-65, EDN: KYXTSZ. (In Russian).

10. Zhirkov A.F., Sivtsev M.A., 2022. *Otsenka vozmozhnosti vosstanovleniya zashchitnogo sloya v usloviyakh Tsentral'noy Yakutii* [Assessment of the possibility of restoring the protective layer in Central Yakutia]. *Monitoring v kriolitozone: sb. dokl. Shestoy konferentsii geokriologov Rossii s uchastiem ros. i zarubezhnykh uchenykh, inzhenerov i spetsialistov* [Monitoring in the Cryolithozone: Coll. of Reports of the Sixth Conf. of Geocryologists of Russia with the Participation of Russian and Foreign Scientists, Engineers and Specialists]. Moscow, KDU, Dobrosovets Publ., pp. 444-450, EDN: CLXENR. (In Russian).

11. Zhirkov A., Sivtsev M., Lytkin V., Kirillin A., Séjourné A., Wen Z., 2023. An Assessment of the Possibility of Restoration and Protection of Territories Disturbed by Thermokarst in Central Yakutia, Eastern Siberia. *Land*, vol. 12, no. 1, 17 p., DOI: 10.3390/land12010197, EDN: CSHWRO.

12. Kirillin A.R., Zheleznyak M.N., Zhirkov A.F., Misailov I.E., Verkhoturov A.G., Sivtsev M.A., 2020. *Osobennosti snegonakopleniya i parametry snezhnogo pokrova na El'konskom gornom massive* [Features of snow accumulation and snow cover parameters on the Elkon mountain range]. *Vestnik Zabaykal'skogo gosudarstvennogo universiteta* [Transbaikal State University Journal], vol. 26, no. 7, pp. 62-76, DOI: 10.21209/2227-9245-2020-26-7-62-76, EDN: FOCISC. (In Russian).

13. Pavlov A.V., 2008. *Monitoring kriolitozony* [Permafrost Monitoring]. Novosibirsk, Geo Publ., 225 p. (In Russian).

14. Kotlyakov V.M., Sosnovsky A.V., 2021. *Otsenka termicheskogo soprotivleniya snezhnogo pokrova po temperature grunta* [Estimation of the thermal resistance of snow cover based on the ground temperature]. *Lod i sneg* [Ice and Snow], vol. 61, no. 2, pp. 195-205, DOI: 10.31857/S2076673421020081, EDN: XPBXXL. (In Russian).

15. Galkin A.F., Zheleznyak M.N., Zhirkov A.F., 2022. *Raschet temperatury poverkhnosti dorozhnogo polotna* [Calculation of the surface temperature of the roadway]. *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya* [Advances in Current Natural Sciences], no. 11, pp. 124-129, DOI: 10.17513/use.37939, EDN: NZGKRZ. (In Russian).

16. Panov V.I., 2016. *Poteri snega na vetrometel'nyu sublimatsiyu i snos v otkrytykh i lesomeliorirovannykh agrolandshaftakh stepnoy zony* [Snow losses due to wind-and-snow sublimation and demolition in open and forest-reclaimed agrolandscapes of the steppe zone]. *Nauchno-agronomicheskii zhurnal* [Scientific and Agronomic Journal], no. 2(99). pp. 10-12, EDN: XBVVRB. (In Russian).

17. Panov V.I., 2016. *Poteri atmosferynykh osadkov s nezashchishchennykh poley v stepnom zasushlivom subregione, ikh sushchestvennoe snizhenie i stabilizatsiya gidroresursnogo potentsiala zemledeliya sozdaniem lesomeliorirovannykh (lesoagrarnykh) basseynovykh agroekolandshaftov* [Losses of atmospheric precipitation from unprotected fields in the steppe arid sub-region, their significant reduction and stabilization of the agriculture hydroresource potential by the creation of forest-reclamation (forest-agrarian) basin agro-eco-landscapes]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Bulet. of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], vol. 18, no. 2-2, pp. 472-478, EDN: WZTWLZ. (In Russian).

18. Kulik K.N., Barabanov A.T., Panov V.I., 2012. *Optimizatsiya snegoraspredeleniya i vlogoobespechennosti v konturnykh polezashchitno-stokoreguliruyushchikh lesnykh polosakh i v lesomeliorirovannykh landshaftakh* [Optimizing snow distribution and available moisture supply in contour field-protecting and run-off-regulating forest belts and in forest-reclaimed landscapes]. *Doklady Rossiyskoy akademii sel'skokhozyaystvennykh nauk* [Reports of the Russian Academy of Agricultural Sciences], no. 2, pp. 58-61, EDN: ORGSOP. (In Russian).

19. Osokin N.I., Sosnovsky A.V., Chernov R.A., 2017. *Koeffitsient teploprovodnosti snega i ego izmenchivost'* [Effective thermal conductivity of snow and its variations]. *Kriosfera Zemli* [Earth's Cryosphere], vol. 21, no. 3, pp. 60-68, DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-3(60-68), EDN: YPTHAJ. (In Russian).

20. Dyunin A.K., 2021. *V tsarstve snega* [In the Kingdom of Snow]. Moscow, URSS Publ., 168 p. (In Russian).

Информация об авторах

А. Ф. Галкин – главный научный сотрудник, доктор технических наук, профессор, Институт мерзлотоведения имени П. И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск, Российская Федерация, afgalkin@mail.ru, ORCID: 0000-0002-5924-876X;

М. Н. Железняк – главный научный сотрудник, доктор геолого-минералогических наук, член-корреспондент РАН, Институт мерзлотоведения имени П. И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск, Российская Федерация, fe1956@mail.ru, ORCID: 0000-0003-4124-6579;

А. Ф. Жирков – ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук, Институт мерзлотоведения имени П. И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск, Российская Федерация, zhirkov_af@mail.ru, ORCID: 0000-0001-6721-5338;

Н. А. Плотников – аспирант, Институт мерзлотоведения имени П. И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск, Российская Федерация, plotnikov-nikolay96@mail.ru, ORCID: 0000-0002-6311-1723.

Information about the authors

A. F. Galkin – Chief Researcher, Doctor of Technical Sciences, Professor, Melnikov Permafrost Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation, afgalkin@mail.ru, ORCID: 0000-0002-5924-876X;

M. N. Zheleznyak – Chief Researcher, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Melnikov Permafrost Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation, fe1956@mail.ru, ORCID: 0000-0003-4124-6579;

A. F. Zhirkov – Leading Researcher, Candidate of Technical Sciences, Melnikov Permafrost Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation, zhirkov_af@mail.ru, ORCID: 0000-0001-6721-5338;

N. A. Plotnikov – Postgraduate Student, Melnikov Permafrost Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation, plotnikov-nikolay96@mail.ru, ORCID: 0000-0002-6311-1723.

Вклад авторов: А. Ф. Галкин – разработка метода исследования, анализ результатов, написание статьи. М. Н. Железняк – формирование основной концепции, целей и задач исследования, формулирование выводов, участие в написании статьи. А. Ф. Жирков – участие в разработке метода исследования, численный анализ результатов, участие в обосновании основных научных положений и написании статьи. Н. А. Плотников – аналитический обзор, анализ и графическое представление результатов, участие в формулировке основных выводов и написании статьи.

Все авторы в равной степени несут ответственность за нарушения в сфере этики научных публикаций.

Contribution of the authors: A. F. Galkin – development of the research method, analysis of results, writing the article. M. N. Zheleznyak – formation of the main concept, goals and objectives of the research, formulation of conclusions, participation in writing the article. A. F. Zhirkov – participation in the research method development, numerical analysis of results, participation in substantiation of the main scientific provisions and writing the article. N. A. Plotnikov – analytical review, analysis and graphical presentation of results, participation in formulation of the main conclusions and writing the article.

All authors are equally responsible for ethical violations in scientific publications.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 17.03.2025; одобрена после рецензирования 20.06.2025; принята к публикации 25.06.2025.

The article was submitted 17.03.2025; approved after reviewing 20.06.2025; accepted for publication 25.06.2025.