

СТАТЬИ

УДК 536.21:625.87

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ДОРОЖНОГО ПОЛОТНА**Галкин А.Ф., Железняк М.Н., Жирков А.Ф.***Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, e-mail: afgalkin@yandex.ru*

Одним из важных показателей, используемых в тепловых расчетах при проектировании автомобильных дорог в криолитозоне, является температура внешней поверхности дорожной одежды или, при отсутствии таковой, поверхности дорожного полотна. В работе исследовано влияние температурных условий эксплуатации и теплофизических свойств грунтов дорожного основания на изменение температуры поверхности дорожного полотна. Рассмотрены условия эксплуатации автомобильных дорог в зимний и летний периоды года. Приведены расчетные зависимости для определения безразмерной и размерной температуры поверхности дороги. Выполнен комплексный качественный и количественный анализ влияния температурных условий эксплуатации и теплофизических свойств грунтов основания на изменение безразмерной температуры поверхности дороги. Установлены основные качественные и количественные характеристики влияния температурного фактора, коэффициента теплоусвоения грунта и скорости ветра на безразмерную температуру поверхности дороги. В частности, показано, что коэффициент теплоусвоения грунта дорожного основания сильнее влияет на температуру поверхности дороги в зимний период. При этом зависимость безразмерной температуры от коэффициента теплоусвоения снижается с течением времени как для летнего, так и зимнего периода приблизительно в одинаковом темпе. Результаты численных расчетов представлены в виде 2D- и 3D-графиков, которые позволяют наглядно оценить влияние исходных климатических и теплофизических параметров на диапазон изменения безразмерной температуры поверхности дорожного полотна в различные периоды года.

Ключевые слова: автомобильная дорога, криолитозона, климат, скорость ветра, температура поверхности, температура воздуха, коэффициент теплоусвоения

CALCULATION OF THE SURFACE TEMPERATURE OF THE ROADWAY**Galkin A.F., Zheleznyak M.N., Zhirkov A.F.***P.I. Melnikov Institute of Permafrost Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, e-mail: afgalkin@yandex.ru*

The purpose of the work was to study the influence of temperature conditions of road operation conditions and thermophysical properties of the soils of the road base on the change in the dimensionless temperature of the roadway surface. The operating conditions of roads in the winter and summer period of the year are considered. Calculated dependencies for determining the dimensionless and dimensional temperature of the road surface are given. A comprehensive qualitative and quantitative analysis of the influence of temperature conditions of road operating conditions and thermophysical properties of road base soils on changes in the dimensionless temperature of the roadway surface is carried out. The main qualitative and quantitative characteristics of the influence of the temperature factor, the coefficient of heat absorption of the soil and the wind speed on the dimensionless temperature of the road surface have been established. In particular, it is shown that the coefficient of thermal assimilation of the soil of the road base has a stronger effect on the temperature of the road surface in winter. At the same time, the dependence of the dimensionless temperature on the heat absorption coefficient decreases over time, both for the summer and winter periods at approximately the same pace. The results of numerical calculations are presented in the form of 2D and 3D graphs, which make it possible to visually assess the influence of the initial climatic and thermophysical parameters on the range of changes in the dimensionless temperature of the roadway surface in the summer and winter periods of the year.

Keywords: highway, permafrost, climate, wind speed, surface temperature, air temperature, heat absorption coefficient, soil

Температурный режим дорожного полотна и основания во многих случаях является определяющим фактором безопасной и надежной эксплуатации автомобильных дорог в районах распространения многолетней и островной мерзлоты [1-3]. Особенно, как отмечают многие исследователи [4-6], важно учитывать тепловой фактор при наличии в зоне теплового влияния дороги льдогрунтовых и ледяных тел различного генезиса [7-9]. Существенная зависимость прочностных свойств льда, льдогрунтов и дисперсных пород от температуры (даже в диапазоне отрицательных значений) [10-12] значительно осложняет как выбор пра-

вильных технических решений при проектировании, так и обеспечение заданного уровня надежности и безопасности при эксплуатации дорог в криолитозоне. На формирование температурного режима объектов антропогенного воздействия человека на окружающую среду (к которым можно отнести и объекты транспортного сообщения – железные и автомобильные дороги) оказывают влияние различные факторы, такие как теплофизические свойства грунтов, наличие ледяных включений в зоне теплового влияния, скорость и температура воздуха на конкретном участке дороги, вид покрытия и конструкция дорожной одеж-

ды и т.д. [13-15]. Каждый фактор в той или иной степени определяет уровень негативного влияния антропогенного воздействия на окружающую среду [16-18]. Поэтому важно уже на стадии проектирования определить степень ожидаемого теплового воздействия на грунтовое основание и зону теплового влияния проектируемой или реконструируемой автомобильной дороги [19-21]. Одним из важных показателей, используемых в тепловых расчетах при проектировании автомобильных дорог в криолитозоне, является температура внешней поверхности дорожной одежды или, при отсутствии таковой, поверхности дорожного полотна [22].

Целью настоящей работы являлось исследование влияния климатических условий (температуры и скорости воздуха), а также теплофизических свойств грунтов дорожного основания на изменение температуры поверхности дорожного полотна.

Материалы и методы исследования

Опираясь на зависимость, приведенную в работе [22], расчетную формулу для определения безразмерной температуры поверхности дороги запишем в следующем виде:

$$Q = (T - T_e) / (t - T_e), \quad (1)$$

где Q – безразмерная температура поверхности дорожного полотна; T – температура поверхности дорожного полотна, °С; T_e – температура на глубине зоны теплового влияния поверхности дороги, °С; t – температура воздуха, °С.

С другой стороны, используя известное решение одномерного уравнения теплопроводности Фурье при граничных условиях третьего рода, можно записать [23; 24]:

$$Q = 1 / (1 + D / \alpha \sqrt{3\tau}), \quad (2)$$

$$D = \sqrt{(\rho c \lambda)}, \quad (3)$$

где D – коэффициент теплоусвоения грунта дорожного основания, Дж/м²Кс^{0,5}; α – коэффициент конвективного теплообмена, Вт/м²К; τ – время, с; ρ – плотность грунта, кг/м³; c – удельная теплоемкость грунта, Дж/кг×К; λ – теплопроводность грунта, Вт/м×К.

Коэффициент конвективного теплообмена между воздухом и поверхностью дороги может быть найден по формуле [25; 26]:

$$\alpha = 6,16 + 4,19V, \quad 0 \leq V \leq 5, \quad (4)$$

где α – коэффициент конвективного теплообмена, Вт/м²К; V – средняя скорость ветра на рассматриваемом участке дороги, м/с.

Собственно размерное значение температуры поверхности дорожного полотна, выраженное в градусах Цельсия, может быть определено по простой формуле, вытекающей из выражения (1):

$$T = T_e + (t - T_e)Q. \quad (5)$$

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ формул (1), (2) и (3) показывает, что температура поверхности дороги в различные сезоны года зависит от теплофизических свойств подстилающего грунта в летний и зимний периоды: чем больше отличие свойств грунтов в талом и мерзлом состоянии, тем больше разница температурой поверхности дорожного полотна и температурой атмосферного воздуха. При этом зависимость температуры поверхности от коэффициента конвективной теплоотдачи (скорости ветра) и времени обратная: чем больше их значения, тем разница между температурами воздуха и поверхности дороги меньше. В работе [26] показано, что при увеличении значения коэффициента конвективного теплообмена (средней скорости ветра на рассматриваемом участке трассы) температура поверхности дороги будет близка к температуре атмосферного воздуха.

Для достижения цели были проведены варианты расчеты, результаты которых представлены в виде графиков на рисунках 1-3. При проведении расчетов были использованы исходные данные, характерные для различных климатических условий эксплуатации автомобильных дорог в криолитозоне: температура горных пород на глубине зоны теплового влияния в диапазоне от -1,0 до -7,0 °С; среднелетняя температура атмосферного воздуха в диапазоне от +8,0 до +12,0 °С; среднезимняя температура в диапазоне от -15,0 до -25,0 °С. Коэффициент теплоусвоения грунта был принят переменным, изменяющимся в диапазоне от 1200 до 1500 Дж/м²Кс^{0,5} в летний период года. И в интервале от 1500 до 1800 Дж/м²Кс^{0,5} в зимний период года. Коэффициент теплоотдачи для летнего периода принимался равным 15,0 Вт/м²К, а для зимнего 12,0 Вт/м²К.

На рис. 1 представлены 3D-графики изменения безразмерной температуры дорожного полотна в летний (А) и зимний (Б) периоды года в зависимости от температуры грунта и средней температуры воздуха на рассматриваемом участке трассы.

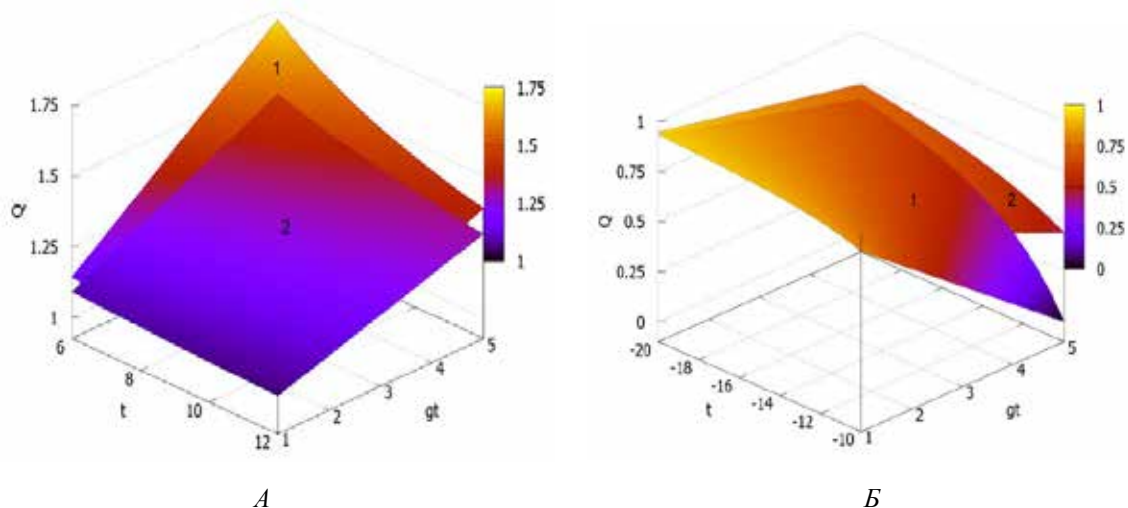


Рис. 1. Изменение безразмерной температуры поверхности дороги в зависимости от средних значений температур воздуха и средних отклонений температуры воздуха и поверхности дороги при различной естественной температуре пород: 1 – $-1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – $-5,0\text{ }^{\circ}\text{C}$; А) в теплый (летний) период года; Б) в холодный (зимний) период года

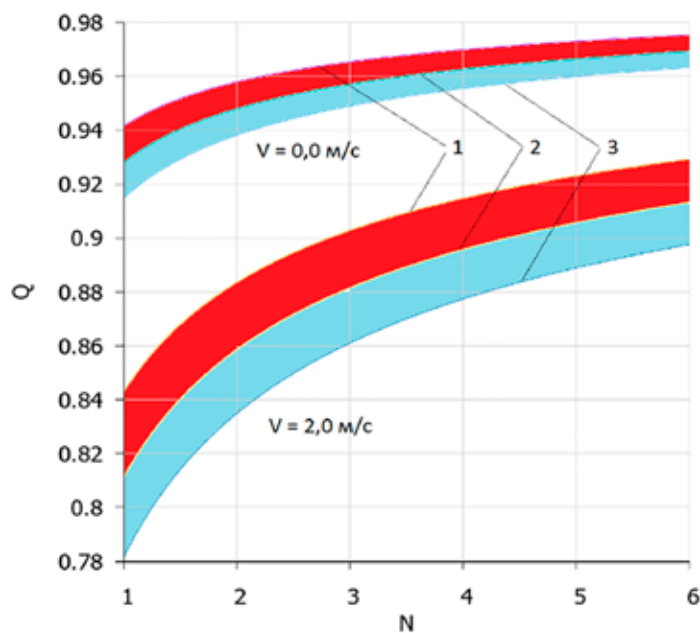


Рис. 2. Изменение параметра Q в зависимости от показателя теплоусвоения грунта « D » ($\text{Дж}/\text{м}^2\text{Кс}^{0,5}$) при различной длительности рассматриваемого периода « N » (месяцы): 1 – $D = 1200$; 2 – 1500 ; 3 – 1800

Из графиков видно, что безразмерная температура существенно зависит от разности температур поверхности дороги и воздуха как в летний, так и в зимний периоды года. Причем в оба периода при увеличении разности температур между атмосферным воздухом и поверхностью дорожного полотна значение безразмерной температуры уменьшается. Сравнение характера плоско-

стей, например № 1 и № 2 на рисунке 1, подтверждает этот вывод.

На рис. 2 представлены графики изменения значений безразмерной температуры поверхности дороги на рассматриваемом участке трассы в различные периоды года в зависимости от коэффициента теплоусвоения грунтов дорожного основания.

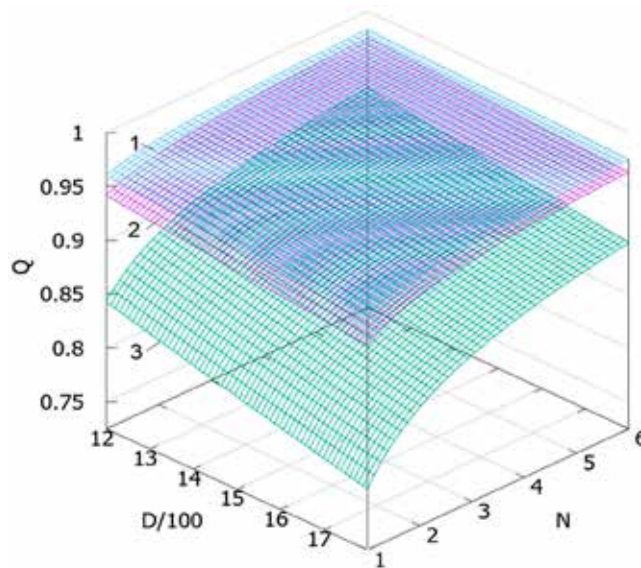


Рис. 3. Изменение параметра Q в зависимости от показателя теплоусвоения грунта и длительности рассматриваемого периода N (месяцы) для различных средних скоростей ветра: 1 – 2,0 м/с; 2 – 1,5 м/с; 3 – 0,0 м/с

Анализ графиков на рисунке 2 позволяет сделать следующие выводы. Коэффициент теплоусвоения грунта сильнее влияет на температуру поверхности грунта в зимний период, чем в летний. При этом зависимость безразмерной температуры от коэффициента теплоусвоения снижается с течением времени как для летнего, так и зимнего периода приблизительно в одинаковом темпе. Средняя скорость ветра на конкретном участке трассы также оказывает существенное влияние на значение безразмерной температуры поверхности дороги как в зимний, так и в летний периоды года, что необходимо учитывать в тепловых расчетах при обосновании проектных решений строительства автомобильных дорог в криолитозоне. Причем это влияние остается не постоянным и снижается с увеличением длительности рассматриваемого временного периода.

Так, например, изменение средней скорости ветра с 0,0 до 2,0 м/с при длительности рассматриваемого периода в 1 месяц (для коэффициента теплоусвоения грунта «D» 1800,0 Дж/м²Кс^{0.5}) приводит к уменьшению безразмерной температуры в 1,17 раза. А при длительности рассматриваемого периода в 5 месяцев – в 1,08 раза. С уменьшением коэффициента теплоусвоения грунта в 1,5 раза (с 1800 до 1200), т.е. при переходе от зимнего к летнему периоду года, степень уменьшения составляет 1,12 и 1,05 соот-

ветственно. То есть с течением времени влияние скорости ветра на значение безразмерной температуры как в летний, так и в зимний периоды снижается. Но темп изменения данного параметра в зимний период почти в 1,3 раза выше. Это свидетельствует о более сильном влиянии скорости ветра на значение безразмерной температуры в зимний период, чем в летний.

На рисунке 3 представлены обобщающие 3D-графики изменения безразмерной температуры поверхности дорожного полотна в зависимости от показателя теплоусвоения грунта и длительности рассматриваемого периода N (месяцы) для различных средних скоростей ветра.

Графики наглядно подтверждают сделанные ранее выводы о степени влияния теплофизических свойств грунтов дорожного основания и климатических параметров в зоне эксплуатации автомобильной дороги на температуру поверхности дорожного полотна. Графики также указывают на правомерность использования средней температуры ветра на рассматриваемых участках при проведении тепловых расчетов. Об этом свидетельствует сравнительный характер плоскостей 1 и 2 на рисунке: изменение скорости ветра в 1,3 раза (с 1,5 до 2,0 м/с) не приводит к изменению безразмерной температуры более чем на 3-7%. То есть ошибка вычисления укладывается в допустимый в инженерной практике диапазон ($\leq 10,0\%$).

Заключение

Выполнен комплексный качественный и количественный анализ влияния температурных условий эксплуатации автомобильных дорог и теплофизических свойств грунтов дорожного основания на изменение безразмерной температуры поверхности дорожного полотна. В частности, показано, что значение безразмерной температуры поверхности дороги существенно зависит от разности температур поверхности дороги и атмосферного воздуха как в летний, так и в зимний периоды года. Причем, независимо от периода года, при увеличении разности температур между атмосферным воздухом и поверхностью дорожного полотна значение безразмерной температуры уменьшается. Коэффициент теплоусвоения грунта дорожного основания сильнее влияет на температуру поверхности дороги в зимний период, чем в летний. При этом зависимость безразмерной температуры от коэффициента теплоусвоения снижается с течением времени как для летнего, так и зимнего периода приблизительно в одинаковом темпе. С увеличением длительности временного периода влияние скорости ветра на значение безразмерной температуры (как в летний, так и в зимний сезоны года) снижается. Но темп изменения данного параметра в зимний период почти в 1,3 раза выше. Это свидетельствует о более сильном влиянии скорости ветра на значение безразмерной температуры в зимний период, чем в летний.

Результаты численных расчетов представлены в виде 2D- и 3D-графиков, которые позволяют наглядно оценить влияние исходных климатических и теплофизических параметров на диапазон изменения безразмерной температуры поверхности дорожного полотна в летний и зимний периоды года.

Статья имеет прежде всего методическое значение и позволяет на конкретном примере детально проследить пути качественного и количественного анализа влияния исходных параметров на конечный результат при проведении инженерных расчетов. Статья может быть полезна как научным работникам в области инженерной геокриологии, так и инженерам-проектировщикам дорожной отрасли. Статья может представлять методический и научный интерес для аспирантов, а также для студентов, обучающихся по специальности 08.02.05 «Строительство и эксплуатация автомобильных дорог и аэродромов». Дальнейшие исследования

должны быть направлены на оценку изменения температуры поверхности дорожного полотна в переходные периоды года: периоды оттаивания или промерзания грунтов дорожного основания.

Список литературы

1. Шац М.М. Современное состояние городской инфраструктуры г. Якутска и пути повышения ее надежности // Геориск. 2011. № 2. С. 40–46.
2. Сериков С.И., Шац М.М. Морозобойное растрескивание грунтов и его роль в состоянии поверхности и инфраструктуры г. Якутска // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. 2018. № 1. С. 56–69. DOI: 10.15593/2409-5125/2018.01.04.
3. Шестернев Д.М., Литовко А.В. Комплексные исследования по выявлению деформаций на автомобильной дороге «Амур» // Материалы докладов XIV Общероссийской научно-практической конференции и выставки «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации». М.: Геомаркет, 2018. С. 309-314.
4. Железняк М.Н., Шестернев Д.М., Литовко А.В. Проблемы устойчивости автомобильных дорог в криолитозоне // Материалы докладов XIV Общероссийской научно-практической конференции и выставки «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации» М.: Геомаркет, 2018. С. 223-227.
5. Кондратьев В.Г., Кондратьев С.В. Как защитить федеральную автодорогу «Амур» Чита – Хабаровск от опасных инженерно-геокриологических процессов и явлений // Инженерная геология. 2013. № 5. С. 40-47.
6. Станиловская Ю.В., Мерзляков В.П., Сергеев Д.О., Хименков А.Н. Оценка опасности полигонально-жильных льдов для линейных сооружений // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2014. № 4. С. 367–378.
7. Галкин А.Ф. Программа исследований теплового режима грунтов при наличии крупных ледяных включений в породах гелиотермозоны // Энергобезопасность и энергосбережение. 2021. № 1. С.40-44. DOI 10.18635/2071-2219-2021-1-40-44.
8. Галкин А.Ф., Панков В.Ю. Влияние льдистости грунта на глубину оттаивания дорожного основания // Арктика и Антарктика. 2022. № 2. С. 13-19. DOI: 10.7256/2453-8922.2022.2.38103.
9. Шапран В.В., Фазилова З.Т. Факторы, оказывающие влияние на развитие продольных профильных деформаций земляного полотна в криолитозоне // Мир транспорта. 2020. Т. 18. № 2. С. 82–101.
10. Вотяков И.Н. Физико-механические свойства мерзлых и оттаивающих грунтов Якутии. Новосибирск: Наука, 1975. 176 с.
11. Teng J., Shan F., He Z., Zhang S., Sheng D. Experimental study of ice accumulation in unsaturated clean sand. Géotechnique. 2018. DOI: 10.1680/jgeot.17.P.208
12. Guofang Xu, Jilin Qi, Wei Wu. Temperature Effect on the Compressive Strength of Frozen Soils: A Review. Recent Advances in Geotechnical Research. Springer Series in Geomechanics and Geoenvironmental Engineering. 2019. P. 227-236.
13. Гречищев С.Е. Чистотинов Л.В., Шур Ю.Л. Криогенные физико-геологические процессы и их прогноз. М.: Недра, 1980. 383 с.
14. Шур Ю.Л. Верхний горизонт толщи мерзлых пород и термокарст. Новосибирск: Наука, 1988. 213 с.
15. Варламов С.П., Жирков А.Ф., Находкин Д.А. Температурный режим почвогрунтов при нарушении покровов в современных климатических условиях Центральной Якутии // Наука и образование. 2017. № 4 (88). С. 65-71.
16. Жирков А.Ф., Варламов С.П., Железняк М.Н. Результаты годичного цикла наблюдений температурного режима грунтов в естественных условиях и при нарушении

покровов // *Материалы пятой конференции геокриологов России*. 2016. Часть 5-7. С. 52-58.

17. Калиничева С.В., Федоров А.Н. Прогноз изменения температуры мерзлотных ландшафтов при удалении напочвенного покрова // *География и краеведение в Якутии и сопредельных территориях Сибири и Дальнего Востока*. Якутск, 2022. С. 40-44.

18. Galkin A.F., Pankov V.Yu. Thermal Protection of Roads in The Permafrost Zone. *Journal of Applied Engineering Science*. 2022. Vol. 20. № 2. P. 395-399. DOI: 10.5937/jaes0-34379.

19. Бессонов И.В., Жуков А.Д., Боброва Е.Ю., Говряков И.С., Горбунова Э.А. Анализ конструктивных решений в зависимости от типа изоляционных материалов в дорожных покрытиях в многолетнемерзлых грунтах // *Транспортное строительство*. 2022. № 1. С. 14-17. DOI: 10.18635/2071-2219-2020-4-24-28.

20. Galkin A.F. Controlling The Thermal Regime of the Road Surface in the Cryolithic Zone. *Transportation Research Procedia*. 2022. Vol. 63. P. 1224-1228. DOI: 10.1016/j.trpro.2022.06.128.

21. Давыдов В.А., Бондарева Э.Д. Изыскания и проектирование автомобильных дорог на многолетнемерзлых грунтах. Омск: ОГПИ, 1989. 183 с.

22. Панков В.Ю., Фёдоров Я.В. Безразмерная температура поверхности дорожной одежды // *Тенденции развития науки и образования*. 2022. № 89(1). С. 51-64. DOI: 10.18411/tmio-09-2022-16.

23. Гудмен Т.Р. Применение интегральных методов в нелинейных задачах нестационарного теплообмена // *Проблемы теплообмена*. М.: Атомиздат, 1967. С. 41-95.

24. Galkin A.F. Calculation of parameters of cryolithic zone mine openings thermal protection coating. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. № 8. P. 64-69.

25. Перлыштейн Г.З. Водно-тепловая мелиорация мерзлых пород на Северо-Востоке СССР. Новосибирск: Наука, 1979. 304 с.

26. Панков В.Ю., Бурнашева С.Г. Влияние скорости ветра на температуру поверхности дорожного полотна // *Тенденции развития науки и образования*. 2020. № 8. С. 116-121. DOI: 10.18411/lj-08-2020-63.