

ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

УДК 528.44:558.321.7

*БАЗАВЛУК ВЛАДИМИР АЛЕКСЕЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент,
tam7618@yandex.ru*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

*Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30*

*СЕРЯКОВ СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ, канд. геол.-мин. наук, доцент,
svstpu@mail.ru*

*Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30*

ВЛИЯНИЕ ИНВЕРСИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА НА ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ОСВАИВАЕМЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Представлены концептуальные подходы к изучению геокриологических процессов в карьерах, горные породы которых используются в основаниях транспортных сооружений. Дана сравнительная оценка проблем процессов теплообмена приходной и расходной составляющих радиационно-теплого баланса. Для расходной составляющей теплового баланса в глубоких открытых карьерах установлена зависимость инверсионного температурного градиента от значений зимних температур воздуха на прилегающих к ним территориях.

Предложены данные для расчета конструкций земляного полотна промышленных дорог в глубоких карьерах криолитозоны, полученные в результате многолетних натурных исследований мерзлотно-грунтовых условий Якутии.

Ключевые слова: температура; инверсия; глубина; промерзание; оттаивание; процессы; теплообороты; зависимость; градиент; баланс; радиационный; освоение; карьеры.

*VLADIMIR A. BAZAVLUK, PhD, A/Professor,
tam7618@yandex.ru*

*Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia*

*SERGEY V. SERYAKOV, PhD, A/Professor,
svstpu@mail.ru*

Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia

AIR TEMPERATURE INVERSION EFFECT ON PERMAFROST CONDITIONS OF DEVELOPED TERRITORIES

The paper presents the concepts studying geocryolithic processes in pits used for transport facility construction. The comparison is given for heat exchange processes of receipt and account components of radiation and thermal balance. The thermal balance component is estimated for open pits depending on the inversion temperature gradient and winter air temperatures in the territories under study. The data are presented for the road bed design in deep cryolithic zones obtained as a result of long-term field research of permafrost in Yakutia.

Keywords: temperature; inversion; depth; frost penetration; thawing; processes, thermal economy; dependence; gradient; balance; radiation; development; open pit.

При хозяйственном освоении северных территорий Якутии и Дальнего Востока в толще многолетнемерзлых пород отрабатывают промышленные карьеры глубиной до нескольких сотен метров. На прилегающих к карьерам территориях прокладывают сети транспортных трубопроводов, дорог промышленного и общего пользования. Внутри карьеров строят дороги, размещают различного рода площадки, водоотводные и другие сооружения. Производственное освоение территорий сопровождается неизбежным нарушением и изменением мерзлотно-грунтовых условий как по глубине отрабатываемых карьеров, так и по высотным отметкам рельефа прилегающей к ним местности. Эти изменения происходят с разной интенсивностью во времени.

Обобщенным показателем изменения мерзлотно-грунтовых условий считают глубину сезонного оттаивания мерзлых пород и продолжительность формирования температурного режима горных пород в земляном полотне линейно-протяженных и площадных объектов, расположенных на территориях с различными высотными отметками [8]. Прогнозирование мерзлотных условий в карьерах и на прилегающих территориях целесообразно выполнять, используя метод аналогий в сочетании с математическим методом.

К компонентам природной среды относятся прежде всего естественные покровы (снежный, растительный, водный), рельеф (абсолютная и относительная высотная отметка поверхности, крутизна и экспозиция склонов), состав и влажность покровных и подстилающих отложений, заболоченность, гидрологические условия и др. [8].

Все эти факторы определяют условия инсоляции поверхностей, величину альбедо и все тепловые процессы, происходящие в горных породах. В результате в тех широтах, где приход космической радиации велик, могут формироваться, существовать и развиваться мерзлые толщи, и, наоборот, в зонах с небольшим количеством поступающей радиации широкое развитие получают талики [8, 11].

Природными компонентами, определяющими глубину сезонного оттаивания и промерзания, а также время формирования температурного режима горных пород, являются температура воздуха и составляющие радиационного

баланса. Важными факторами являются также поступление тепла от прямой коротковолновой солнечной радиации, отраженной и рассеянной радиации небосвода, инсоляция солнцем поверхности объектов, например, транспортных сооружений, расположенных на разных высотных отметках рельефа. Режимы воздействия природных факторов на мерзлотные условия имеют свои особенности в годовом цикле. Формирование сезонно- и многолетнемерзлых горных пород связано с радиационно-тепловым обменом на земной поверхности.

Уравнение радиационно-теплого баланса за год обычно представляется в виде

$$R = Q_{\text{п}} - Q_{\text{o}}, \quad (1)$$

где R – радиационно-тепловой баланс; $Q_{\text{п}}$ – поглощенная радиация; Q_{o} – отраженная радиация.

Величину поглощенной радиации определяют по формуле

$$Q_{\text{п}} = (Q + q)(1 - a), \quad (2)$$

величину отраженной радиации определяет по формуле

$$Q_{\text{o}} = I + LE + P + B. \quad (3)$$

Тогда радиационно-тепловой баланс на территориях исследований в общем виде представляется зависимостью

$$(Q + q)(1 - a) = I + LE + P + B, \quad (4)$$

где Q – прямая солнечная радиация, поступающая на земную поверхность, кДж/см² в год; q – рассеянная солнечная радиация, поступающая на эту же поверхность, кДж/см² в год; a – альbedo поверхности, в долях ед.; I – эффективное излучение земной поверхности, кДж/см² в год; LE – затраты тепла поверхности на испарение, кДж/см² в год; P – затраты тепла на турбулентный теплообмен; B – поток тепла между подстилающей поверхностью и нижележащими грунтами (величина теплооборота через поверхность), кДж/см² в год.

По уравнению (1) годового радиационного баланса не удается вскрыть его изменчивость структуры во времени. Также невозможно проследить однозначную связь закономерностей формирования сезонно- и многолетнемерзлых толщ с составляющими теплообмена на поверхности земли [8].

В приведенном уравнении значения теплооборотов в почвенном слое за год принимаются равными нулю и поэтому исключаются из рассмотрения. Разность между положительной и отрицательной частями годового теплооборота, благодаря наличию различных природных ритмов, незначительна. Однако она на протяжении многих лет (в геологических масштабах) приводит к большим суммарным теплооборотам в верхних слоях литосферы и в нижних слоях атмосферы и становится достаточной для образования мерзлых пород на глубину нескольких сотен метров.

На ход изменения теплового состояния горных пород и грунтов в приполярных исследуемых районах большое влияние оказывают происходящие в приземных слоях атмосферы зимние инверсионные воздушные процессы,

которые особенно ярко проявляются при отрицательных температурах воздуха ниже минус 20 °С, рис. 1 [1, 4].

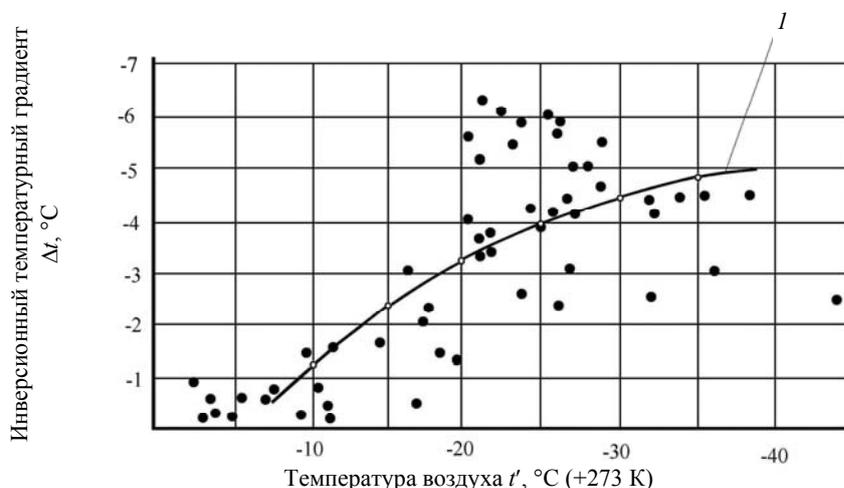


Рис. 1. Зависимость инверсионного температурного градиента воздуха в карьере Δt от температуры воздуха на прилегающей местности t' :

● – экспериментальные данные; ○ – расчетные данные; 1 – кривая зависимости

Многими учеными в ходе экспериментальных исследований в природных условиях отмечена важность влияния этого природного фактора на формирование мерзлотно-грунтовых условий в горных породах [9, 10].

Проведенными нами исследованиями установлено, что в глубоких карьерах Якутии в зимний период температура воздуха на пониженных высотных отметках существенно отличается от температуры воздуха на прилегающей территории за счет влияния зимней температурной приземной нисходящей инверсии воздуха. Она способствует понижению температуры воздуха в глубоких карьерах в пределах от минус 0,2 до минус 5,4 °С на каждые 100 м понижения высотных отметок (рис. 1) [1].

Температуру воздуха в карьерах на разных высотных отметках на любую зимнюю дату можно определять по формуле

$$t = t' + k\Delta t, \quad (5)$$

где t – прогнозируемая средняя температура воздуха в глубоких карьерах на разных горизонтах на любую дату зимнего периода, °С; t' – средняя температура воздуха на прилегающей к карьере местности на ту же дату по данным ближайшей метеостанции или метеопоста, °С; k – коэффициент, характеризующий взаимное высотное расположение метеостанции и строительной площадки на горизонтах, равный 0,01 от разности соответствующих высотных отметок; Δt – инверсионный температурный градиент воздуха в зимний период, °С.

Коэффициент k определяют по формуле

$$k = 0,01 (A - B), \quad (6)$$

где А и В – высотные отметки точек расположения соответственно метеостанции и строительной площадки, м.

Для северных условий приполярных районов Якутии и Дальнего Востока инверсионный температурный градиент воздуха можно выразить зависимостью

$$\Delta t = -0,005t'^2 + 0,39t' - 2,573. \quad (7)$$

Уравнение выражает эмпирическую зависимость инверсионного температурного градиента воздуха от температуры воздуха на прилегающей к карьере территории.

Для исследуемых карьеров Якутии выполнена проверка соответствия полученного уравнения данным наблюдений по критерию Стьюдента. При корреляционном отношении $n = 0,74$, средней квадратической ошибке теоретического корреляционного отношения, равного 0,059, количестве наблюдений 58 с вероятностью 0,99 значения климатических коэффициентов для карьера равны $x = -0,005$; $y = 0,397$; $z = -2,573$.

Полученная зависимость является достаточной для инженерных расчетов в практическом применении.

Искусственный рельеф местности в открытых карьерах усиливает процесс хода приземной инверсии воздуха. Охлаждение воздуха в ясную зимнюю погоду особенно велико в котловинах, в замкнутых понижениях рельефа и особенно в карьерах, откуда выхоложенный воздух не находит выхода.

Подобные процессы происходят также на территориях долинного пространства вечномёрзлых грунтов, только в меньшей мере [12].

Влияние инверсии зимней температуры воздуха способствует формированию нового микроклимата, значительному накоплению (аккумуляции) холода в карьерах и в пониженных местах рельефа, интенсивному охлаждению горных пород после их отработки. Исследованиями и расчетами установлено, что, например, на этих территориях в глубоких карьерах за зимний период на каждые 100 м понижения высотных отметок горизонтов можно ожидать дополнительное накопление холода до 850 градусосуток [4].

В летнее время (июнь–июль), когда в этих районах наблюдается продолжительное (до 23–24 ч/сут) солнечное сияние под влиянием воздействия прямого облучения, отраженной и рассеянной радиации небосвода, в карьерах происходит интенсивное нагревание вмещающих горных пород, конструкций дорог с последующим сезонным протаиванием земляного полотна и основания транспортных сооружений. Эти естественные процессы приводят к понижению прочностных характеристик горных пород, в строительных конструкциях к возможной потере устойчивости транспортных сооружений и их разрушению, что подтверждается многими фактами на практике [5, 6, 9].

На разные высотные отметки карьеров в зависимости от их размеров поступает неодинаковое количество радиационного тепла, что приводит к различным значениям глубины сезонного оттаивания пород [5, 6]. Кроме того, как показали наши исследования, за счет закрытости части небосвода

краями карьера при его диаметре 2000 м и крутизне откоса 1,22 рад (70°) количество тепла от рассеянной радиации небосвода, поступающего на глубину 500 м, уменьшается на 30–36 % по сравнению с теплом, поступающим на дневную поверхность или на поверхность дорог, проложенных в карьерах на небольших глубинах (до 10 м). При отсутствии данных по радиационно-тепловому балансу в глубоких карьерах для определения количества тепла от рассеянной радиации небосвода на разные глубины можно использовать региональные корреляционные графики взаимосвязи количества поступающего тепла и размеров карьеров в плане (рис. 2).

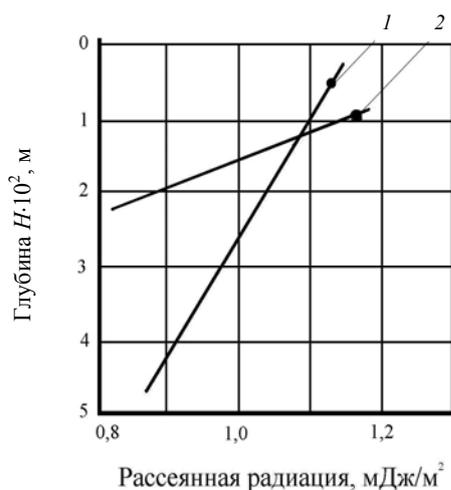


Рис. 2. Зависимость поступления тепла от рассеянной радиации за год на поверхность дорог, проложенных на разных глубинах карьеров с диаметром по верхним кромкам:
1 – до 2000 м; 2 – свыше 2000 м

Продолжительность прямого солнечного облучения поверхности откосов и берм карьеров зависит также от экспозиции склонов. На южных склонах карьеров продолжительность облучения поверхности полков и проложенных по ним промышленных дорог на 25–30 % больше, чем на полках с дорогами, проложенными вдоль северных склонов. В результате этого количество тепла за счет отраженной солнечной радиации от откосов прилегающих бортов карьера, поступающего на поверхность дорог, проложенных по бермам вдоль борта с северной экспозицией склонов, почти на 70 % меньше, чем для дорог, проложенных вдоль борта с южной экспозицией склонов [4].

Результаты натурных исследований в глубоких карьерах позволили установить количественную взаимосвязь между низкими температурами воздуха, накоплением в них холода, уменьшением поступления в карьеры летнего тепла от прямой, рассеянной и отраженной радиации и уменьшением глубины сезонного оттаивания мерзлых пород в земляном полотне дорог, проложенных на нижних горизонтах. С понижением высотных отметок горизонтов на каждые 100 м происходит сокращение на 3–5 % срока формирования тем-

пературного режима пород в земляном полотне дорог по сравнению с вышележащими горизонтами. Одновременно с этим уменьшается на 5–7 % как срок стабилизации положения поверхности мерзлых пород, так и глубина сезонного оттаивания горных пород в основании земляного полотна карьерных дорог.

Установленные зависимости рекомендуется учитывать при расчетах конструкций земляного полотна и дорожных одежд промышленных дорог в карьерах и за их пределами, а на территориях естественных рельефов – при расчетах величин заглубления трубопроводных коммуникаций, транспортирующих, например, жидкие и газообразные энергоресурсы [14].

Мерзлотные процессы в горных породах и грунтах, кроме их учета, можно регулировать и ими управлять [3, 6, 11]. Так, в последние годы разработаны рациональные методы и рекомендации по регулированию мерзлотного состояния грунтов в основаниях транспортных сооружений, учитывающих влияние составляющих внешнего теплообмена, теплооборотов в грунтовых массивах и энергии внешних воздействий [2, 7, 10, 11].

Разработанные рекомендации нашли применение в проектировании и строительстве карьерных дорог на территориях криолитозоны [3].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Базавлук, В.А.* Влияние особенностей зимней инверсии температуры воздуха на дорожное строительство в условиях глубоких карьеров Якутии / В.А. Базавлук // Проектирование, строительство, ремонт и содержание автомобильных дорог и мостов в условиях Сибири. – Томск : Изд-во Томск. ун-та, 1984. – С. 9–13.
2. *Базавлук, В.А.* Проектирование автомобильных дорог в глубоких карьерах с учетом влияния тепла рассеянной радиации небосвода / В.А. Базавлук // Проектирование автомобильных дорог в сложных природных условиях Сибири. – Омск : ОмПИ, 1985. – С. 88–92.
3. *Базавлук, В.А.* Временные рекомендации по строительству и содержанию дорог в карьере / В.А. Базавлук. – Мирный : Якуталмаз, 1977. – 21 с.
4. *Базавлук, В.А.* Оценка инверсионного охлаждения воздуха и пород в глубоких карьерах Западной Сибири / В.А. Базавлук, Т.В. Потатуева // Капитальные научные издания «Геокриология СССР». Средняя Сибирь. – М. : Недра, 1989. – С. 375–376.
5. *Базавлук, В.А.* Влияние инверсии температуры воздуха на изменение мерзлотно-грунтовых условий в глубоких карьерах / В.А. Базавлук, Т.В. Потатуева, А.Я. Тулаев // Проблемы геокриологии Забайкалья. – Чита, 1984. – С. 164–165.
6. *Дубенков, А.А.* Особенности структурно-модульного проектирования организации строительства дорог на многолетнемерзлых грунтах / А.А. Дубенков, Т.В. Боброва, М.С. Перфильев // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2014. – № 6. – С. 168–181.
7. *Иванов, В.В.* Геоэкологические особенности освоения месторождений полезных ископаемых Якутии / В.В. Иванов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2013. – № 8. – С. 59–62.
8. *Методические рекомендации* по применению конструктивных мероприятий для сохранения вечномерзлых грунтов в основаниях земляного полотна и искусственных сооружений на автомобильных дорогах Центральной Якутии – М. : ОАО «ЦНИИС», 2011. – 90 с.
9. *Мерзлотоведение* (краткий курс): учебник для вузов / В.А. Кудрявцев, Н.Ф. Полтев, Н.Н. Романовский [и др.]. – М. : Изд-во МГУ, 1981. – 210 с.
10. *Пассек, В.В.* Оценка эффективности глубинного охлаждения грунтов термопорами по результатам натурных наблюдений / В.В. Пассек, Г.М. Поз // сб. Строительство желез-

- ных и автомобильных дорог в районах вечной мерзлоты : научн. тр. ОАО ЦНИИС. – 2011. – Вып. № 263. – Ч. 5. – С. 34–38.
11. *Цернант, А.А.* Развитие научно-методической базы технического нормирования железнодорожного строительства в криолитозоне / А.А. Цернант // сб. Строительство железных и автомобильных дорог в районах вечной мерзлоты : научн. тр. ОАО ЦНИИС. – 2011. – Вып. № 263. – Ч. 5. – С. 6–33.
 12. *Цернант, А.А.* Инновационные технологии управления температурой грунтовых массивов транспортных сооружений в арктических широтах / А.А. Цернант // Технологии: Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2013. – № 3. – С. 26–31.
 13. *Эгштейн, Г.М.* К вопросу о температурной инверсии приземных слоев воздуха в долинном распространении многолетнемерзлых пород в условиях Забайкалья и Приамурья / Г.М. Эгштейн // Мерзлотные исследования. – М. : 1961. – Вып. I. – С. 77–81.
 14. Исследование прочностных и деформативных характеристик глинистых грунтов земляного полотна автомобильных дорог Новосибирской области / В.А. Базавлук, С.В. Ефименко, В.П. Базуев, К.Д. Бычков // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2000. – № 1. – С. 291–294.

REFERENCES

1. *Bazavluk V.A.* Vliyanie osobennosti zimnei inversii temperatury vozdukha na dorozhnoe stroitel'stvo v usloviyakh glubokikh kar'erov Yakutii [Influence of features of winter air temperature inversion on road construction in deep pits of Yakutia], *Proektirovanie, stroitel'stvo, remont i sodержanie avtomobil'nykh dorog i mostov v usloviyakh Sibiri*. Tomsk : TSU Publ., 1984. Pp. 9–13. (rus)
2. *Bazavluk V.A.* Proektirovanie avtomobil'nykh dorog v glubokikh kar'erakh s uchetom vliyaniya tepla rasseyannoi radiatsii nebosvoda [Design of highways in deep pits under scattered radiation heat of firmament]. *Proektirovanie avtomobil'nykh dorog v slozhnykh prirodnykh usloviyakh Sibiri*. Omsk : OMPI Publ., 1985. Pp. 88–92. (rus)
3. *Bazavluk V.A.* Temporary recommendations about construction and the maintenance of roads in career. – Mirnyi : Yakutalmaz, 1977. 21 p.(rus)
4. *Bazavluk V.A., Potatuyeva T.V.* Otsenka inversionnogo okhlazhdeniya vozdukha i porod v glubokikh kar'erakh Zapadnoi Sibiri [Estimation of inversion air cooling and deep pits rocks of Western Siberia]. *Kapital'nye nauchnye izdaniya «Geokriologiya SSSR»*. Srednyaya Sibir'. Moscow : Nedra Publ., 1989. Pp. 375–376. (rus)
5. *Bazavluk V.A., Potatuyeva T.V., Tulayev A.Ya.* Vliyanie inversii temperatury vozdukha na izmenenie merzlotno-gruntovykh uslovii v glubokikh kar'erakh [Influence of inversion of air temperature on change of merzlotno-soil conditions in deep pits]. *Problemy geokriologii Zabaikal'ya*. Chita : 1984. Pp. 164–165. (rus)
6. *Dubenkov A.A., Bobrova T.V., Perfil'ev M.S.* Osobennosti strukturno-modul'nogo proektirovaniya organizatsii stroitel'stva dorog na mnogoletnemerzlykh gruntakh [Modular design properties of road construction on permafrost soils]. *Vestnik TSUAB*. 2014. No. 5. Pp. 168–181. (rus)
7. *Ivanov V.V.* Geoekologicheskie osobennosti osvoeniya mestorozhdenii poleznykh iskopayemykh Yakutii [Geocological features of development of mineral deposits in Yakutia]. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2013. No. 8. Pp. 59–62. (rus)
8. *Metodicheskie rekomendatsii po primeneniyu konstruktivnykh meropriyatii dlya sokhraneniya vechnomerzlykh gruntov v osnovaniyakh zemlyanogo polotna i iskusstvennykh sooruzhenii na avtomobil'nykh dorogakh Tsentral'noi Yakutii* [Methodical recommendations on preservation of permafrost soil based on road bed and highways construction in Yakutia]. Moscow : OAO TsNIIS, 2011. 90 p. (rus)
9. *Kudryavtsev V.A., Poltev N.F., Romanovsky N.N., et al.* Merzlotovedenie (kratkii kurs): uchebnyk dlya vuzov [Permafrostology. Textbook]. Moscow : MSU Publ., 1981. 240 p. (rus)
10. *Pasak V.V., Poz G.M.* Otsenka effektivnosti glubinnogo okhlazhdeniya gruntov termoporami po rezul'tatam naturnykh nablyudeni [Efficiency of soil cooling with thermometers]. sb. *Stroitel'stvo zheleznykh i avtomobil'nykh dorog v raionakh vechnoi merzloty : nauchn. tr.*

- ОАО ТсНИИС [Construction iron and highways in permafrost regions]. 2011. No. 263. Pp. 34–38. (rus)
11. Tsernant A.A. Razvitie nauchno-metodicheskoi bazy tekhnicheskogo normirovaniya zheleznodorozhnogo stroitel'stva v kriolitozone [Development of scientific and methodical base of technical rationing of railway construction under permafrost conditions]. sb. Stroitel'stvo zheleznnykh i avtomobil'nykh dorog v raionakh vechnoi merzloty : nauchn. tr. ОАО ТсНИИС [Construction iron and highways in permafrost regions]. 2011. No. 263. Pp. 6–33. (rus)
 12. Tsernant A.A. Innovatsionnye tekhnologii upravleniya temperaturoi gruntovykh massivov transportnykh sooruzhenii v arkticheskikh shirotax [Innovative technologies of management of temperature of soil massifs of transport constructions in the Arctic latitudes]. *Construction Materials, the Equipment, Technologies of XXI Century*, 2013. No. 3. Pp. 26–31. (rus)
 13. Egstein G.M. K voprosu o temperaturnoi inversii prizemnykh sloev vozdukha v dolinnom rasprostranении mnogoletne-merzlykh porod v usloviyakh Zabaikal'ya i Priamur'ya [Temperature inversion of air ground layers in long-term frozen rock distribution under permafrost conditions in Transbaikalia and Priamurye]. *Merzlotnye issledovaniya*. Moscow : 1961. No. I. Pp. 77–81. (rus)
 14. Bazavluk V.A., Efimenko S.V., Bazuev V.P., Bychkov K.D. Issledovanie prochnostnykh i deformativnykh kharakteristik glinistykh gruntov zemlyanogo polotna avtomobil'nykh dorog Novosibirskoi oblasti [Strength deformation properties of road bed soils in Novosibirsk region]. *Vestnik TSUAB*. – 2000. No. 1. Pp. 291–294. (rus).