Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>
Russian journal of transport engineering

2020, №1, Том 7 / 2020, No 1, Vol 7 <https://t-s.today/issue-1-2020.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/01SATS120.pdf>

DOI: 10.15862/01SATS120 (<http://dx.doi.org/10.15862/01SATS120>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Зайцев А.А., Артюшенко И.А. Исследование грунтов основания Красноярского края и способ их усиления // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2020 №1, <https://t-s.today/PDF/01SATS120.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/01SATS120

For citation:

Zaitsev A.A., Artyushenko I.A. (2020). The study of the soil of the base of the Krasnoyarsk territory and the method of strengthening. *Russian journal of transport engineering*, [online] 1(7). Available at: <https://t-s.today/PDF/01SATS120.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/01SATS120

УДК 625.12:691.4:624.131.537

ГРНТИ 67.29.63

Зайцев Андрей Александрович

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия

Доцент кафедры «Путь и путевое хозяйство»

Кандидат технических наук, доцент

E-mail: andrei.zaitsev2010@yandex.ru

Артюшенко Игорь Александрович

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия

Аспирант кафедры «Проектирование и строительство железных дорог»

E-mail: tywka351@mail.ru

Исследование грунтов основания Красноярского края и способ их усиления

Аннотация. Пути сообщения в России по праву занимают одно из ключевых мест в народном хозяйстве в связи с географическими условиями, технологическими особенностями экономики и возможностью максимального использования транзитного потенциала страны. Проблема модернизации транспортной системы России, ее адаптации к требованиям функционирования народного хозяйства и внешнеэкономических связей становится все более актуальной для регионов Севера.

В рамках основного этапа экспедиции «Трансполярная магистраль», проведенной Русским географическим обществом (РГО) совместно с Российским университетом транспорта (РУТ) с 19 сентября 2019 года по 15 октября 2019 года специалистами Российского университета транспорта обследованы территории Красноярского края для оценки возможности проектирования и строительства путей сообщения в данных регионах.

Отсутствие транспортной инфраструктуры, непредсказуемость поведения мерзлых грунтов при промерзании-оттаивании, наличие слабых грунтов в основаниях сооружений, сложные природно-климатические условия, все эти факторы обуславливают сложность строительства в данных регионах.

В данной статье рассмотрено определение прочностных характеристик грунтов с помощью динамического пенетрометра-плотометра Panda в полевых условиях. Сделаны выводы о целесообразности использования данных грунтов в основаниях сооружений.

В связи с отсутствием в Норильском районе карьеров по добыче гранитного щебня и сложность транспортировки данного материала, проанализировано применение отходов Норильской металлургии в качестве замены щебня.

Результаты, изложенные в статье, являются частью диссертационного исследования Артюшенко И.А. «Усиление основания земляного полотна вертикальными столбами из щебня на участках с многолетнемерзлыми грунтами».

Ключевые слова: земляное полотно; железная дорога; автомобильная дорога; транспорт; многолетнемерзлые грунты; вертикальные столбы из щебня; усиление земляного полотна

Введение

Экспедицией «Трансполярная магистраль», проведенной Русским географическим обществом (РГО) совместно с Российским университетом транспорта (МИИТ), затронута обширная территория – участки в пределах Норильского промышленного района (база МЧС Норильск – Оганерский район), район, подчиненный администрации г. Дудинка, Енисейский район, Туруханский район и район под административным управлением г. Игарка.

Район в долине реки Енисей характеризуется сложными мерзлотными условиями. Здесь отмечаются участки сплошной и прерывистой мерзлоты. Но есть участки, где многолетнемерзлые породы отсутствуют. Отопляющее влияние на грунты основания оказывают водоемы, заболоченность территории, надмерзлотные воды на склонах и логах. Кроме того, в связи с процессом строительства в долине р. Енисей произошло нарушение природной обстановки, тем самым изменив температурный режим грунтов [1].

В ходе экспедиции сотрудниками Российского университета транспорта была поставлена задача проанализировать прочностные характеристики грунтов данного района для оценки дальнейшего использования их в качестве оснований транспортных сооружений. Для исследования прочностных свойств и уплотнения грунтов по глубине был взят французский прибор Panda от компании Sol Solution [2].

Целью исследования является анализ прочностных характеристик грунтов основания и, в случае несоответствия нормам исследуемых грунтов, предложение способов их усиления и уплотнения. Для достижения указанной цели использовались общенаучные методы, сравнительный анализ, лабораторные и полевые испытания.

1. Описание принципа работы прибора Panda

Panda – легкий (общий вес оборудования 20 кг) ручной динамический конусный пенетrometer для тестирования грунтов и материалов, широко использующийся во Франции и других странах центральной Европы. Принцип работы – использование переменной энергии.

Прибор Panda может эксплуатироваться одним человеком для проверки грунта практически в любом месте на глубине до 6 метров. Удар от молотка по наковальне инструмента обеспечивает подвод энергии. Встроенный микропроцессор записывает два параметра для каждого удара молотка: скорость удара и глубину проникновения конуса, измеряя выходной сигнал от двух датчиков. Акселерометр на головке инструмента измеряет скорость. На рисунке 1 показаны основные составляющие прибора Panda [3].

Рисунок 1. Основные составляющие прибора Panda [3]

Динамическое сопротивление конуса (q_d) и текущая глубина рассчитываются и отображаются в режиме реального времени на экране микропроцессора.

Динамическое сопротивление конуса (q_d) рассчитывается по формуле [4]:

$$q_d = \frac{1}{A} * \frac{E}{e} * \frac{1}{1 + \frac{P}{M}}, \quad (1)$$

где q_d – сопротивление кончика динамического конуса; A – площадь конуса (2 или 4 см²); E – переменная энергия, передаваемая системе каждый удар; e – глубина измеряется каждый удар; P – вес загнанной системы в почву (наковальня + стержни + конус); M – вес молотка (1,7 кг).

Благодаря определению сопротивления конуса, можно рассчитать несущую способность грунта – давление выдерживающие грунтовым массивом и уплотнение грунта по глубине.

Для исследования грунта на его несущую способность (q_{ult}) рассчитывается по динамическому сопротивлению конуса (q_d) следующим образом:

$$q_{ult} = \frac{q_d}{5}, \quad (2)$$

где q_d – сопротивление кончика динамического конуса; 5–7 – коэффициенты безопасности для анализа несущей способности.

Анализ плотности грунтов прибором Panda происходит все по тому же сопротивлению конуса. Для каждого из типов грунтов строятся 2 линии (красная и зеленая) – это линии максимального и минимального уплотнения данного вида грунта.

На рисунке 2 показаны зоны уплотнения грунта по глубине: зона уплотнения/переуплотнения (зеленая зона) и зона разуплотнения (красная зона). Зеленая зона представляет выбранный уровень уплотнения материала и, следовательно, значения, нанесенные на график. Желтая зона – зона нормального уплотнения грунта [5].

В приборе Panda данные зоны показаны линиями. Красная линия представляет погрешность в 2–3 %, ниже которой уплотнение материала не должно падать, в то время как область между двумя линиями (красная и зеленая) известна как область допуска.

Рисунок 2. Зоны уплотнения грунта по глубине [3]

2. Использование прибора Panda при проведении 2-го этапа экспедиции «Трансполярная магистраль»

В рамках экспедиции было проанализировано 3 точки прибором динамической пенетрацией Panda.

1. Точка юг Ванкорского месторождения.

На данной территории в 2009 году стоял вахтовый поселок геофизиков, который возводился на насыпном грунте. Было принято решение провести анализ грунтов основания как в тундровой части, так и на насыпном грунте. Геологические условия представлены песком и мягкопластичной супесью, в тундре глубина слоя песка 0,25 м, на насыпном грунте – 0,7 м.

Несущая способность первого слоя, который в обоих случаях сложен песком средней крупности, отличаются. У объекта на насыпном грунте из-за послойного уплотнения песка несущая способность больше в 2 раза (0,53 МПа), чем у объекта в тундровой зоне (0,26 МПа). Но во втором слое (супесь) в тундровой зоне сопротивление конуса, следовательно, и несущая способность возрастает за счет пластичности супеси.

Как видно на рисунках 3 и 4, уплотнение песка и на насыпи, и в тундре равно 90 %, только в случае с насыпью слой уплотненного грунта равен 0,7 м, а в тундре 0,3 м. Из этого

можно сделать вывод о том, что разуплотнение супеси в тундре будет происходить раньше (быстрее) и требует либо дополнительного уплотнения супеси, либо так же, как и на насыпи (при ведении земляных работ) следует досыпать песок и производить послойное уплотнение.

Рисунок 3. Уплотнение грунта по глубине на точке юг Ванкорского месторождения испытание в тундре (разработано авторами)

Рисунок 4. Уплотнение грунта по глубине на точке юг Ванкорского месторождения испытание на насыпи (разработано авторами)

2. Точка вблизи зимника Игарка-Ванкорское месторождение.

Интерес данной местности для исследования выражен тем, что рядом с данной точкой находится зимник и здесь же рядом имеется зона болотистой местности.

Было решено выполнить испытания на болоте и сопоставить их с результатами испытаний на зимнике. Сложена данная местность мохо-дерновым покровом глубиной 0,3 м и тугопластичной глиной, вскрытой на глубине 0,3 м, слагающей мощностью глубиной до 4 м. Забой штанги производился на 1,5 м из-за вязкости глины.

Несущая способность первого слоя (0,7 МПа) и второго слоя (2,32 МПа) на зимнике больше, чем возле зоны болота первого слоя (0,6 МПа) и второго слоя (2,2 МПа). Это говорит о том, что прочностные свойства грунтов основания на зимники имеют большие значения, чем в зоне болота.

Данные уплотнения грунта представлены на рисунках 5 и 6.

На зимнике (рис. 5) за счет проезда по нему техники, происходит уплотнение грунта. Можно заметить небольшой разуплотнённый участок, но он не оказывает большого влияния на несущую способность зимника. На участке вблизи болота (рис. 6) наоборот в большей мере присутствует разуплотненный грунт. На это влияет обводнённость грунтов и их естественная низкая плотность.

Рисунок 5. Уплотнение грунта по глубине на точке вблизи зимника Игарка-Ванкорское месторождение. Испытание на зимнике (разработано авторами)

Рисунок 6. Уплотнение грунта по глубине на точке вблизи болота
Игарка-Ванкорское месторождение. Испытание на зимнике (разработано авторами)

3. Точка Ермаково.

Ермаково – поселок в Красноярском крае. Бывший Центр 503 стройки.

Был произведен анализ несущей способности и уплотнения грунтов вблизи р. Енисей. В геологическом отношении сложение в данной местности в верхней части представлена растительным слоем и глиной в обводненном и влажном состоянии.

На 0,5 м залегает растительный слой, показатели несущей способности растительного слоя (0,54 МПа) больше, чем у глины (0,47 МПа). Это объясняется тем, что в данной местности присутствует мощный травяной слой, который благодаря своим глубоким корням улучшает грунты основания.

На рисунке 7 показано уплотнение грунтов в данной местности, которое крайне слабое. Имеются большие зоны разуплотненного грунта. Требуется дополнительное уплотнение грунтов.

Таким образом, применение прибора динамической пенетрации Panda позволяет произвести первичные предположения об условиях использования в качестве оснований различных грунтов на разных точках местности. По данным испытаний на разных точках местности можно сделать выводы о том, что многие грунты основания не соответствуют требуемой несущей способности и не имеют требуемого уплотнения.

Рисунок 7. Уплотнение грунта по глубине на точке Ермаково (разработано авторами)

Для улучшения прочностных характеристик грунтов и уплотнения их до должного уровня авторами предложен способ усиления грунтов основания вертикальными столбами из щебня.

3. Описание технологии усиления грунтов основания вертикальными столбами из щебня

Технология усиления грунтов вертикальными столбами из щебня (щебеночными сваями) наилучшим образом подходит для улучшения грунтов основания и повышения несущей способности сооружения.

Вертикальные столбы из щебня – тип обработки грунта глубинной вибрацией с подачей щебня на дно формируемой скважины, при которой глубинный вибратор используется для создания непрерывных колонн из щебня с заданными длиной и диаметром [6]. Структура сооружения вертикальных столбов из щебня представлена на рис. 8.

Использование вертикальных столбов из щебня – это использование материалов с высокой прочностью на сдвиг, что в свою очередь создает боковое сопротивление в грунте. Благодаря использованию вертикальных столбов из щебня происходит улучшение прочностных характеристик грунтов основания, которое уменьшает осадку в фундаментах и увеличивает несущую способность грунта [7].

Рисунок 8. Технологический процесс устройства вертикальных столбов из щебня [6]:

1 – виброколонна погружается с помощью вибрации и подачи воздуха (иногда с минимальной подачей воды для прохождения плотных слоев); 2 – щебень вводится через специальный привод вдоль вибропогружателя под давлением сжатого воздуха; 3 – виброколонна совершает попеременные движения вверх и вниз для уплотнения щебня и формирования тела сваи (при этом также уплотняется и улучшается окружающий грунтовый массив)

В статье [8] проведенные исследования по моделированию напряженно деформируемого состояния сооружения, усиленного вертикальными столбами из щебня на участках с многолетнемерзлыми грунтами, которые показали эффективность данной технологии. Положительное влияние технологии усиления вертикальными столбами из щебня на температуру грунтов основания в криолитозоне рассмотрено в статье [9].

4. Использование отходов норильской металлургии в качестве заполнителя вертикальных столбов при усилении грунтов оснований в криолитозоне

Как известно, в данных районах нет в значительных объемах освоенных карьерных запасов щебня, поэтому специалистами РУТ (МИИТ) в ходе экспедиции были проанализированы местные условия и выявлено, что при подсыпке на дорогах и отдельных территориях города Норильск в большом количестве используются отработанные горные породы (металлургические шлаки).

Рисунок 9. Классификация металлургических шлаков [10]

К отходам металлургического производства относят скальные, вскрышные породы, хвосты обогащения, металлургические шлаки и т. п.

Металлургическими шлаками называют легкоплавкие силикатные материалы, которые получают в виде отходов при выплавке металлов из руд. Они образуются в виде расплава различных окислов в процессе выплавки, рафинирования и переплавки металлов и их сплавов [10]. Классификация металлургических шлаков приведена на рис. 9.

Авторами были отобраны пробы для оценки в лабораторных условиях возможности использования данного материала в качестве замены щебня в вертикальном столбе.

Первое испытание – прочность данного материала и сопоставление с прочностью щебня.

Для начала наброску из техногенного камня дробили до определенной фракции щебня 20–40 мм. На рисунке 10 показана дробленая горная порода.

Рисунок 10. Дробленая горная порода (фото авторов)

Испытания проводились согласно ГОСТ 8269.0-97¹.

Для определения горной породы на дробимость были выполнены следующие действия.

Пробы горных пород просеивали через сита из стандартного набора с диаметром отверстий 5, 10, 20, 40 и 70 мм (рис. 11).

Рисунок 11. Сита для просеивания горной породы (фото авторов)

¹ ГОСТ 8269.0-97. Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний. – Москва: Стандартинформ, 2018. – 57 с.

Пробу горной породы засыпали в цилиндр с высоты 150 мм так, чтобы после разравнивания верхний уровень материала примерно на 15 мм не доходил до верхнего края цилиндра (рис. 12). Затем в цилиндр вставили плунжер так, чтобы плита плунжера была на уровне верхнего края цилиндра. После этого цилиндр поместили на нижнюю плиту пресса. Прессовая нагрузка составляла до 200 кН.

Рисунок 12. Испытуемые образцы в цилиндре диаметром 150 мм для испытаний фракций 20–40 мм (фото авторов)

После сжатия испытываемую пробу высыпали из цилиндра и взвесили. Затем ее просеяли в зависимости от размера испытываемой фракции через сито с отверстием размером 5,0 мм – для щебня размером фракции от 20 до 40 мм.

Обработка результатов испытаний

Дробимость D_p , с точностью до 1 % определена по формуле

$$D_p = \frac{m - m_1}{m} \cdot 100, \quad (3)$$

где m – масса испытываемой пробы, г; m_1 – масса остатка на контрольном сите после просеивания раздробленной в цилиндре пробы, г.

$$m = 3859 \text{ г}; m_1 = 3356 \text{ г}$$

$$D_p = \frac{3859 - 3356}{3859} \cdot 100 = 13,03\%$$

По ГОСТ 8267-93²: М 1200.

Результат: Марка по дробимости составляет М 1200, относится к высокопрочным горным породам. Пригодна для строительства железных дорог, мостов и других сооружений, которые подвержены большим нагрузкам, в том числе для усиления оснований земляного полотна.

Аналогично было проведено испытания для фракции 10–20 мм, которые показали результат по марке дробимости М 1400.

² ГОСТ 8267-93. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия. – Москва: Стандартинформ, 2018. – 16 с.

Были проведены испытания для горной породы по определению величины потери массы после испытаний на сопротивление удару на копре, которые показали положительный результат, сопоставимый с I категорией величины потери массы.

В ходе испытаний была измерена радиоактивность Норильского шлака. Измерения радиоактивности данной породы показали положительный результат: 0,346 Бк/кг, что по ГОСТ 30108-94³ позволяет отнести испытываемый материал к I классу, пригодному для всех категорий строительства. Надфоновая доза излучения – 0 мкЗв/ч; $\sum = 0$ част / см² мин.; $\sum \alpha = 0$ част / см² мин.; $\sum \gamma = 0,15$ мкР/ч. Данные результаты соответствуют естественному почвенному уровню.

Вывод

Благодаря использованию новейшего оборудования пенетрации Panda, удалось определить текущее состояние грунтов основания в районах Красноярского края и сделать выводы о их дальнейшем усилении вертикальными столбами из щебня. В качестве заполнителя вертикальных столбов и устройства нижних слоев земляного полотна предложено использовать отходы Норильской металлургии, которые благодаря проведенным испытаниям, оказались целесообразны с точки зрения физико-механических характеристик и вероятных экономических предпосылок.

³ ГОСТ 30108-94. Материалы и изделия строительные. Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов. – Москва: МНТКС, 1995. – 11 с.

ЛИТЕРАТУРА

1. Замолотчикова, С.А. Мерзлотно-геологические процессы в долине Енисея и их изменение в связи со строительством / Замолотчикова С.А., Кондратьев В.Г., Полтев Н.Ф., Чушкина Н.И. // Сборник «Исследования и материалы по строительству и эксплуатации зданий и сооружений на мерзлых грунтах», СССР, 1974. – Выпуск ХСІ. – С. 27–30.
2. Amor, S.J. Panda dynamic cone penetrometer assessment / Amor S.J., Burtwell M.H., Turner A.S. // Transport Research Laboratory, Old Wokingham Road, Crowthorne, Berkshire, 1999.
3. Langton, D.D. The panda light-weight penetrometer for soil investigation and monitoring material compaction // Soil Solution Ltd, 8 Marlowe Court, Macclesfield, Cheshire, 2000. – 16 p.
4. Cassan, M. Les essais in situ en mécanique des sols // Volume 1 réalisation et interprétation, Eyrolles, 1988. – P. 146–151.
5. Zhou, S. Caracterisation des sols de surface a l'aide du penetrometer dynamic léger a energie variable type Panda // Formation Doctorale “Materiaux, Structures, Fiabilité en Génie Civil et Génie Mécanique” Laboratoire d’Accueil: LERMES/CUST, Université Blaise Pascal, 1997. – P. 291–304.
6. Деген, У. Использование щебеночных и песчаных свай для усиления слабых грунтов основания транспортных сооружений / Деген У., Долгов, П.Г. // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути. Труды XIV Международной научно-технической конференции. Чтения, посвященные памяти профессора Г.М. Шахунянца. – Москва, 05–06 апреля 2017. – С. 73–74.
7. Salahi, A. Evaluation of stone columns versus liquefaction phenomenon / Salahi A., Niroumand H., Kassim Khairul // Scientific World Journal, 2015. – №20. – P. 739–759.
8. Шепитько, Т.В. Армирование грунтов основания вертикальными столбами из щебня в криолитозоне / Шепитько Т.В., Артюшенко И.А., Долгов П.Г. // Мир транспорта, 2019. – Том 17, №4. – С. 68–78.
9. Шепитько Т.В., Артюшенко И.А. Влияние вертикальных столбов из щебня на криогенные процессы грунтов основания земляного полотна // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2019 №4, с. 11. <https://t-s.today/PDF/10SATS419.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/10SATS419.
10. Валуев, Д.В. Технологии переработки металлургических отходов: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 196 с.

Zaitsev Andrey Aleksandrovich

Russian university of transport, Moscow, Russia
E-mail: andrei.zaitsev2010@yandex.ru

Artyushenko Igor Aleksandrovich

Russian university of transport, Moscow, Russia
E-mail: tywka351@mail.ru

The study of the soil of the base of the Krasnoyarsk territory and the method of strengthening

Abstract. Railways in Russia rightfully occupy one of the key places in the national economy in connection with the geographical conditions, technological features of the economy and the possibility of maximizing the use of the country's transit potential. The problem of modernizing the transport system of Russia, its adaptation to the requirements of the functioning of the national economy and foreign economic relations is becoming increasingly relevant for the regions of the North. As part of the main stage of the expedition "Transpolar Highway", conducted by the Russian Geographical Society (RGS) together with the Russian University of Transport (RUT) from September 19 2019 to October 15 2019, specialists from the Russian University of Transport examined the territory of the Krasnoyarsk Territory to assess the possibility of designing and building tracks messages in these regions. The lack of transport infrastructure, the unpredictability of the behavior of frozen soils during freezing-thawing, the presence of weak soils in the foundations of structures, difficult climatic conditions, all these factors determine the complexity of construction in these regions. This article describes the determination of the strength characteristics of soils using a dynamic Panda penetrometer-density meter in the field. Conclusions are made about the appropriateness of using these soils in the foundations of structures. Due to the lack of quarries for the production of crushed granite in the Norilsk region and the difficulty of transporting this material, the use of Norilsk metallurgy waste as a replacement for crushed stone was analyzed. The results presented in the article are part of the dissertation research I. Artyushenko "Reinforcement of the subgrade base with vertical columns of crushed stone in areas with permafrost soils".

Keywords: subgrade; railway; highway; transport; permafrost soils; vertical columns of crushed stone; subgrade reinforcement

REFERENCES

1. Zamolotchikova S.A., Kondrat'ev V.G., Poltev N.F., Chushkina N.I. (1974). Merzlotno-geologicheskie protsessy v doline Eniseya i ikh izmenenie v svyazi so stroitel'stvom. [*Permafrost-geological processes in the Yenisei Valley and their change in connection with the construction.*] USSR, pp. 27–30.
2. Amor S.J., Burtwell M.H., Turner A.S. (1999). *Panda dynamic cone penetrometer assessment*. Old Wokingham Road, Crowthorne, Berkshire: Transport Research Laboratory.
3. Langton D.D. (2000). The panda light-weight penetrometer for soil investigation and monitoring material compaction. *Soil Solution Ltd, 8 Marlowe Court, Macclesfield, Cheshire*, p. 16.
4. Cassan M. (1988). In situ tests in soil mechanics. *Realization and interpretation, Eyrolles*, (1), pp. 146–151.
5. Zhou S. (1997). *Caracterisation des sols de surface a l'aide du penetrometer dynamic leger a energie variable type Panda*. Laboratoire d'Accueil: LERMES/CUST, Universite Blaise Pascal, pp. 291–304.
6. Degen U., Dolgov, P.G. (2017). Ispol'zovanie shchebenochnykh i peschanykh svay dlya usileniya slabykh gruntov osnovaniya transportnykh sooruzheniy. [*Use of crushed stone and sand piles to strengthen weak soils of the base of transport facilities.*] Moscow, pp. 73–74.
7. Salahi A., Niroumand H., Kassim Khairul (2015). Evaluation of stone columns versus liquefaction phenomenon. *Scientific World Journal*, 20, pp. 739–759.
8. Shepit'ko T.V., Artyushenko I.A., Dolgov P.G. (2019). Base soil reinforcement with vertical columns of crushed stone in the permafrost zone. *World of transport*, 4(17), pp. 68–78 (in Russian).
9. Shepitko T.V., Artyushenko I.A. (2019). The influence of vertical columns of crushed stone on the cryogenic processes of the soil base of the subgrade. *Russian journal of transport engineering*, [online] 4(6), p. 11. Available at: <https://t-s.today/PDF/10SATS419.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/10SATS419.
10. Valuev D.V. (2012). *Tekhnologii pererabotki metallurgicheskikh otkhodov: uchebnoe posobie*. [*Metallurgical Waste Processing Technologies: A Tutorial.*] Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University, p. 196.