

И.В. Лугин, Е.Л. Алферова

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА В ГРУНТОВЫЙ МАССИВ ИЗ ДВУХПУТНОГО ТОННЕЛЯ МЕТРОПОЛИТЕНА МЕЛКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ

Рассмотрено влияние глубины заложения и теплофизических свойств грунтов на тепловой поток из двухпутного тоннеля метрополитена в окружающий грунтовый массив при различных климатических условиях. Определена величина запаздывания колебаний между пиковыми значениями величин теплового потока и температур атмосферного воздуха, влияющая на расчетные значения теплового баланса и на расчетный воздухообмен.

Ключевые слова: тепловой поток, двухпутный тоннель, метрополитен, грунтовый массив, тепловой баланс, тоннельная вентиляция, теплофизические свойства грунта.

Современные мировые тенденции свидетельствуют об изменении конструктивных решений и способов строительства метрополитенов. Все чаще применяют вместо двух однопутных тоннелей, традиционных для России и СНГ, один двухпутный, проходимый щитом большого диаметра. Эксплуатация линии метрополитена с двухпутным тоннелем требует новых подходов в проектировании тоннельной вентиляции. До 2020 г. планируется пустить в эксплуатацию участки с двухпутным тоннелем в Новосибирском (ст. «Гусинобродская» и «Молодежная»), Московском (Кожуховская линия) и Екатеринбургском метрополитенах (вторая линия). Опыта проектирования и эксплуатации таких линий метрополитенов в России нет, поэтому задачи разработки систем тоннельной вентиляции и режимов их работы, особенно для линий мелкого заложения, весьма актуальны.

Основная задача тоннельной вентиляции — поддержание воздушно-теплового баланса в тоннеле. Воздухообмен в тоннеле в большинстве случаев определяется необходимостью удаления теплоизбытков, которые зависят от внутренних (частота движения, скорость и масса поездов, пассажиропоток, освещенность тоннеля, оборудование) и внешних факторов (регион проклад-

ки метрополитена, глубина заложения, теплофизические свойства грунтов и их гидрогеология). Теплопотери, в основном, это потери тепла в грунтовой массив, окружающий тоннель. Из теплопоступлений и теплопотерь выводится тепловой баланс. По требованиям [1], при расчете вентиляции, необходимо определять нестационарный тепловой поток из тоннелей в грунт в теплый период года, а также из грунта в тоннели в холодный период года. Для метрополитенов мелкого заложения, из-за небольшой толщины слоя грунта до поверхности, возникает опосредованный теплообмен с атмосферным воздухом через грунт, способный достигать существенных значений. Все тепло, что не ушло в грунт, требуется удалять средствами тоннельной вентиляции, то есть подавать необходимое для охлаждения тоннеля количество наружного воздуха.

Строительные и конструктивные особенности двухпутного тоннеля приняты по конструкторской документации. Рассмотрен круглый двухпутный тоннель, радиусом 4700 мм (рис. 1), с вентиляционным каналом вверху тоннеля, отделенного от путевого отсека фальшпотолком.

Определение нестационарного теплового потока проведено с использованием программной реализации расчета теплопередачи методом конечных элементов. Такой способ расчета уже использовался при исследованиях тепловых потоков для однопутных тоннелей лабораторией рудничной аэродинамики Института горного дела СО РАН и их результаты показали хорошую сходимость с натурными экспериментами [2–3].

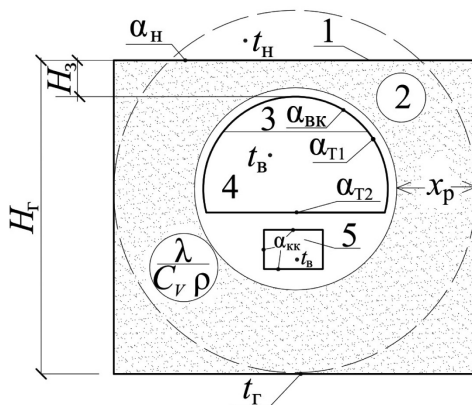


Рис. 1. Геометрическая модель «тоннель-грунт»: 1 – дневная поверхность; 2 – грунт; 3 – вентканал дымоудаления; 4 – путевой отсек; 5 – воздушно-кабельный канал; H_3 – глубина заложения тоннеля, м; H_T – расчетная толщина грунта, м; x_p – толщины грунта, где температура прогретой его толщи близка к естественной температуре грунта, м; t_n , t_B , t_T – температуры, соответственного, наружного и внутреннего воздуха и грунта на глубине H_T ; α_{vk} , α_n , α_{T1} , α_{T2} , α_{kk} – коэффициенты теплоотдачи поверхностей для граничных условий третьего рода, соответственно, верх вентканала, поверхности Земли, боковой стеки тоннеля, пола тоннеля, воздушно-кабельного канала, Вт/(м²·К)

На рис. 1 изображена геометрическая модель исследуемой области «тоннель-грунт» и указаны граничные и начальные условия. Габариты расчетной области заданы в соответствии с предварительно определенной зоной прогретого грунта [4], что позволило минимизировать размеры расчетной модели и сократить машинное время на вычисления.

Граничные условия моделирования включают в себя условия первого рода на нижней границе модели – это температура естественного состояния грунта на данной глубине, условие третьего рода – дневная поверхность и внутренняя поверхность стенок тоннеля, условие второго рода – теплообмен на боковых границах расчетной области равен нулю, т.к. они находятся за границами прогретой зоны.

Глубина заложения тоннеля H_3 здесь – это расстояние от дневной поверхности до верхнего свода тоннеля. Исследованы пять глубин заложения: 1, 5, 10, 15 и 20 м (рассматривается метрополитен мелкого заложения). H_r – толщина грунта в рассматриваемой модели, принималась из условия, что расстояние до нижней образующей поверхности тоннеля от нижнего края грунтового массива не менее x_p , которая определяется по формуле [4]:

$$x_p = 67,8 \cdot (aZ)^{0,5} = 67,8 \cdot (Z\lambda/(\rho C_v))^{0,5},$$

где Z – годовой период колебания температур, $Z = 8760$ сут.; λ – теплопроводность грунта, Вт/(м · К); ρ – плотность грунта, кг/м³; C_v – теплоемкость грунта, Дж/(м³ · К); $a = \lambda/(\rho C_v)$ – температуропроводность грунта, м²/с. От температуропроводности зависит скорость распространения температурных изменений в грунте, а также скорость их затухания с глубиной. В природе грунтовой массив многослойный, состоит из разных по теплофизическим свойствам грунтов, с постоянно изменяющимися их толщинами. В работе рассматривается не слоистый, а сплошной грунт, но с различной температуропроводностью от 4 до $8 \cdot 10^{-7}$ м²/с с шагом 10^{-7} м²/с, характерной для большинства грунтов [5–9].

Изменение температур наружного t_n и внутреннего t_v воздуха во времени задается гармоническим законом:

$$t_n = a \cdot \cos(z) + b \text{ и } t_v = c \cdot \cos(z) + d,$$

где коэффициенты $a = t_{vII} - b$, $b = (t_1 + t_{vII})/2$, $d = t_{тП} - c$, $c = (t_{хП} + t_{тП})/2$; t_1 и t_{vII} – среднемесячные температуры за январь и июль соответственно [10], °С; $t_{тП}$ и $t_{хП}$ – расчетные температуры внутреннего воздуха в тоннеле в теплый и холодный периоды года

соответственного, °С; z – время в сутках, за начало отсчета принято 1 июля.

Расчетные параметры микроклимата внутреннего воздуха [1]:

- в теплый период (ТП) года:

а) для городов с расчетными температурами наружного воздуха по параметру A [11] 24 °С и менее при пропускной способности линии 40 пар поездов в час – не выше 33 °С;

б) для городов с расчетными температурами наружного воздуха по параметру A более 24 °С независимо от пропускной способности линии – не выше 35 °С.

- в холодный период (ХП) года:

а) для городов с расчетной температурой наружного воздуха для теплого периода года по параметру A 24 °С и менее – не выше чем на 2 °С естественной температуры грунта, но не ниже 5 °С;

б) для городов с расчетной температурой наружного воздуха для теплого периода года по параметру A более 24 °С – не выше естественной температуры грунта, но не ниже 10 °С.

Естественная температура грунта $t_{гр}$, окружающего тоннель на глубинах НЗ, а также температура грунта t_r на глубине НГ находится по формуле [4]:

$$t_{сп} = t_{сп.год.в} + 1,3\Delta t + \frac{H}{30} - \frac{h_{геод}}{200} \pm \frac{A_0}{e \sqrt{az}}$$

где $t_{сп.год.в}$ – среднегодовая температура воздуха, °С; Δt – перепад температур между средней температурой воздуха за год и среднегодовой температурой на дневной поверхности земли, °С; $h_{геод}$ – высота данного места [12], м, для городов принималась высота их центров; H – глубина, на которой рассчитывается температура, м; A_0 – суточная амплитуда колебаний температуры на дневной поверхности земли, °С; a – температуропроводность грунта, м²/с; e – основание натурального логарифма; знак «+» ставится при расчете $t_{гр}$ в ТП, знак «-» при расчете $t_{гр}$ в ХП.

В табл. 1 приведены данные для задания циклического годового изменения температур t_n и t_b для Новосибирска и Москвы.

Для определения коэффициента теплоотдачи α в тоннелях метрополитена использована формула [4]:

$$\alpha = 2,64\epsilon_c \frac{(\rho_v v_0)^{0,8}}{d_3^{0,2}}$$

где ϵ_c – коэффициент, учитывающий влияние шероховатости поверхности; v_0 – средняя скорость движения воздуха в тоннеле, м/с; ρ_v – плотность воздуха в тоннеле, кг/м³; $d_3 = 4F/\Pi$ – гид-

Таблица 1

Данные для задания циклического годового изменения температур наружного и внутреннего воздуха

Город				Новосибирск	Москва	
Среднемесячные температуры наружного воздуха, °С	t_1			-17,3	-7,8	
	t_{VII}			19,4	18,7	
Параметр А для ТП, °С				22,7	22,4	
Естественная температура грунта $t_{гр}$, окружающего тоннель, °С, на глубине, м	Глубина заложения, м	1	Период года	ТП	14,2	15,1
				ХП	-4	1,1
	5	ТП		6,5	9,2	
		ХП		4	7,3	
	10	ТП		5,5	8,5	
		ХП		5,3	8,3	
15	ТП, ХП	5,6	8,6			
	20	ТП, ХП	5,8	8,7		
t_b , °С	ТП			33		
	ХП			5		
Коэффициенты	a			18,35	13,25	
	b			1,05	5,45	
	c			14		
	d			19		

равлический эквивалентный диаметр рассматриваемого воздушного канала, м; F – площадь поперечного сечения канала, м²; P – периметр этого канала, м. В табл. 2 указаны рассчитанные значения коэффициентов теплоотдачи, используемых в модели.

На рис. 2. показаны удельные тепловые потоки в грунт для Новосибирска и Москвы при одинаковой глубине заложения (15 м) и грунтов с одинаковыми теплофизическими свойствами.

Таблица 2

Коэффициент теплоотдачи для расчетных поверхностей

Поверхность теплоотдачи	Верх вентканала $\alpha_{вк}$	Поверхность Земли α_n	Боковой стенки тоннеля $\alpha_{Т1}$	Пола тоннеля $\alpha_{Т2}$	Воздушно-кабельного канала $\alpha_{кк}$
Коэффициент теплоотдачи поверхности, Вт/(м ² · К)	8,7	23	8,05	8,1	8,7

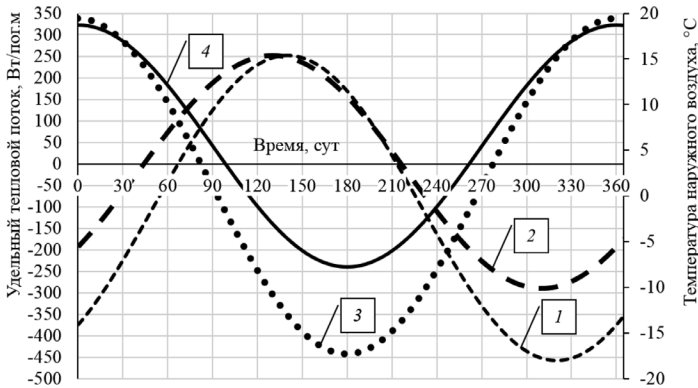


Рис. 2. Температуры наружного воздуха и удельные тепловые потоки на глубине 15 м при теплопроводности грунта $7 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$: 1 – удельный тепловой поток в грунт, г. Новосибирск; 2 – то же, г. Москва; 3 – $t_{\text{н}}$ г. Новосибирск; 4 – $t_{\text{н}}$ г. Москва

ми (теплопроводность $a = 7 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$). Пиковые значения удельного теплового потока отличаются на 169 Вт/пог.м, это 36,9%. Сдвиги по фазе составляют 140 суток для Москвы и 144 для Новосибирска.

На рис. 3. показаны удельные тепловые потоки в грунт для Новосибирска при одинаковой глубине заложения (15 м) для грунтов с различными теплофизическими свойствами. Пиковые значения удельного теплового потока отличаются на 99–262 Вт/пог.м, это 28,6–51,5%. Сдвиги по фазе составляют 130–146 суток.

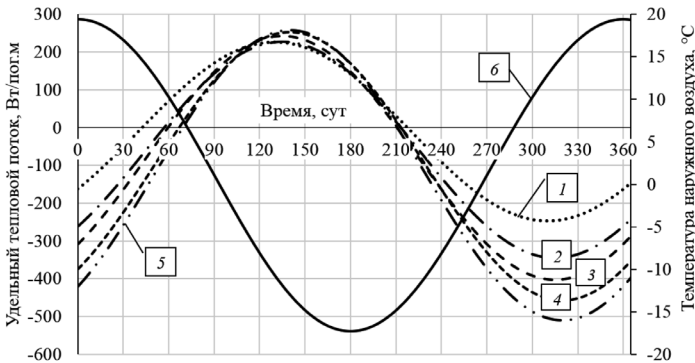


Рис. 3. Удельный годовой тепловой поток в грунт в г. Новосибирске на глубине 15 м при различных значениях теплопроводности: 1 – $4 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$; 2 – $5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$; 3 – $6 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$; 4 – $7 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$; 5 – $8 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$; 6 – температура наружного воздуха, °С

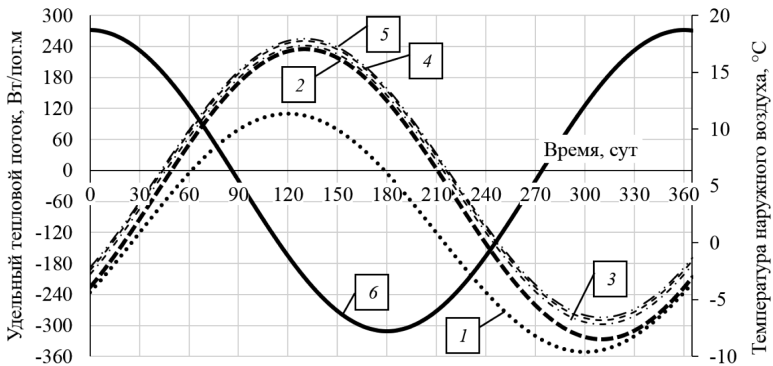


Рис. 4. Удельный годовой тепловой поток в грунт в г. Москва при температуре $5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ на различной глубине заложения тоннеля: 1 – на глубине 1 м; 2 – 5 м; 3 – 10 м; 4 – 15 м; 5 – 20 м; 6 – температура наружного воздуха

На рис. 4 показаны удельные тепловые потоки в грунт для Москвы при одинаковых теплофизических свойствах грунтов (температуропроводность $5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$) и различной глубине заложения тоннеля. Пиковые значения удельного теплового потока отличаются на 5–67 Вт/пог.м, это 1,6–19%. Сдвиги по фазе составляют для этих условий 120–130 суток.

Таким образом, удельный тепловой поток в грунт q , Вт/пог. м, в течение года также, как и температуру, можно описать синусоидой:

$$q = e + f \cdot \cos(z - \Delta),$$

где z – день года в отсчете от первого июля, сут; e и f – коэффициенты; Δ – сдвиг по фазе, сут, колебаний температур атмосферного воздуха и теплового потока в грунт, объясняющийся и зависящий от тепловой инерции окружающего тоннель массива грунта. Этот сдвиг необходимо учитывать при определении расчетного периода для нахождения теплового баланса и расчетного воздухообмена. Значения коэффициентов e , f и сдвига Δ приведены в табл. 3.

Тепловой поток Q , Вт, для определения теплового баланса определится как:

$$Q = q \cdot l_{\text{пер}},$$

где $l_{\text{пер}}$ – длина перегона, м. Он так же будет изменяться по синусоидальному закону, где пересечения нулевой отметки будут разделяться на теплопотери и теплопоступления.

Выводы: выведена зависимость величины теплового поток в грунт из двухпутного тоннеля метрополитена от глубины за-

Таблица 3

Данные для расчета уравнений удельного теплового потока q в грунт для Новосибирска и Москвы при различной глубине в зависимости от температуропроводности грунта: первая строка – коэффициент e , вторая – коэффициент f , третья – фаза Δ , сут.

Температуропроводность, м ² /с	Глубина заложения, м				
	1	5	10	15	20
Новосибирск					
$4 \cdot 10^{-7}$	-116	-40	-23	-14	-11
	206	247	237	237	236
	115	130	130	130	130
$5 \cdot 10^{-7}$	-159	-59	-35	-23	-17
	223	286	271	272	271
	120	135	135	135	135
$6 \cdot 10^{-7}$	-201	-81	-49	-33	-25
	237	322	304	304	304
	120	135	140	140	140
$7 \cdot 10^{-7}$	-241	-103	-64	-44	-34
	249	355	336	334	335
	120	140	145	144	144
$8 \cdot 10^{-7}$	-277	-125	-80	-57	-44
	259	384	366	361	363
	120	140	146	146	146
Москва					
$4 \cdot 10^{-7}$	-88	-31	-18	-12	-10
	210	244	236	236	236
	120	125	125	125	125
$5 \cdot 10^{-7}$	-121	-46	-28	-19	-15
	231	281	270	270	270
	120	130	130	130	130
$6 \cdot 10^{-7}$	-153	-62	-39	-27	-21
	249	316	303	302	302
	125	130	135	135	135
$7 \cdot 10^{-7}$	-183	-79	-51	-36	-29
	264	347	334	332	333
	126	133	137	140	137
$8 \cdot 10^{-7}$	-210	-96	-63	-46	-37
	278	375	363	359	360
	130	135	140	140	140

ложения, теплофизических свойства грунта, климатических условия местности возведения метрополитена. Показано, что при глубина заложения больше 15 м не оказывает существенного влияния на величину теплового потока в грунт. Определен сдвиг по фазе между колебаниями температуры атмосферного воздуха и теплового потока в грунт, который необходимо учитывать при определении расчетного теплового баланса и воздухообмена.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *СП 120.13330.2012*. Метрополитены. Актуализированная редакция СНиП 32-02-2003. Введ. 01-01-2013. М., 2012. – 267 с.
2. *Красюк А. М., Лугин И. В.* Экспериментальное исследование температуры обделок тоннеля и массива окружающего грунта в метрополитене мелкого заложения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № S3. – С. 124–129.
3. *Красюк А. М., Лугин И. В., Пьянкова А. Ю.* Определение размеров массива грунта, подверженного тепловому влиянию подземных станций и тоннелей метрополитена // ФТПРПИ. – 2015. – № 1. – С. 122–128.
4. *Цодиков В. Я.* Вентиляция и теплоснабжение метрополитенов. – М.: Недра, 1975. – 237 с.
5. *Карнаухов Н. Н., Кушир С. Я., Горелов А. С., Долгих Г. М.* Механика мерзлых грунтов и принципы строительства нефтегазовых объектов в условиях Севера. – М.: Центрилитнефтегаз, 2008. – 432 с.
6. *Яковлев Р. Н.* Универсальный фундамент. Технология ТИСЭ. – М.: ООО «Аделант», 2010. – 59 с.
7. *Куликов Ю. Г., Дубнов Ю. Д.* Методические указания по испытанию вечномерзлых глинистых грунтов в полевых условиях: методические указания. – М.: Главтранспроект, 1969. – 58 с.
8. *Трофимов В. Т., Королев В. А., Вознесенский Е. А. и др.* Грунтоведение. 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова, 2005. – 1024 с.
9. *Мазуров Г. П.* Физико-механические свойства мерзлых грунтов. – Л.–М.: Стройиздат, 1964. – 45 с.
10. *СП 131.13330.2012*. Строительная климатология Актуализированная редакция СНиП 23-01-99*. Введ. 01-01-2013. М., 2012.
11. *СНиП 2.04.05-91**. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Введ. 01-01-1992. М., 1999. – 72 с.
12. *Карта высот* [Электронный ресурс] // Российский УКВ портал, 2003–2015. – Режим доступа: <http://www.vhfdx.ru/karta-vyisot> (дата обращения: 19.11.2015). **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Лугин Иван Владимирович*¹ – старший научный сотрудник,
e-mail: ivlugin@misd.nsc.ru,

*Алферова Елена Леонидовна*¹ – младший научный сотрудник,
e-mail: alferova@mosk.ru,

¹ Институт горного дела Сибирского отделения РАН (ИГД СО РАН).

**STUDY OF HEAT TRANSFER RATE
BETWEEN SOIL ARRAY AND DOUBLE-TRACK
TUNNEL OF SHALLOW SUBWAY**

The paper considers that the influence of depth and thermal properties on soil heat flux from double-track subway tunnel in the surrounding soil array under different climatic conditions. The size of the delay fluctuation between peak values of heat flux and temperature of atmospheric air. It shown that this delay affects the calculated values of the heat balance and the calculated air.

Key words: heat flow, double-track tunnel, underground, soil mass, heat balance, tunnel ventilation, thermo-physical properties of the soil.

AUTHORS

Lugin I.V.¹, Senior Researcher, e-mail: ivlugin@mysd.nsc.ru,

Alferova E.L.¹, Junior Researcher, e-mail: alferova@mosk.ru,

¹ Chinakal Institute of Mining of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 630091, Novosibirsk, Russia.

REFERENCES

1. *Metropoliteny. SP 120.13330.2012. Aktualizirovannaya redaktsiya* SNiP 32-02-2003. Vved. 01.01.2013 (Subways. SP 120.13330.2012. Revised edition of SNiP 32-02-2003. Introduction 01.01.2013), Moscow, 2012, 267 p.
2. Krasnyuk A.M., Lugin I.V. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2008, no S3, pp. 124–129.
3. Krasnyuk A.M., Lugin I.V., P'yankova A.Yu. *Fiziko-tehnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2015, no 1, pp. 122–128.
4. Tsodikov V.Ya. *Ventilyatsiya i teplosnabzhenie metropolitenov* (The heat supply and ventilation of subways), Moscow, Nedra, 1975, 237 p.
5. Karnaukhov N.N., Kushnir S.Ya., Gorelov A.S., Dolgikh G.M. *Mekhanika merzlykh gruntov i printsipy stroitel'stva neftegazovykh ob'ektov v usloviyakh Severa* (Mechanics of frozen soils and the principles of construction of oil and gas facilities in the North), Moscow, TsentrLitneftegaz, 2008, 432 p.
6. Yakovlev R.N. *Universal'nyy fundament. Tekhnologiya TISE* (Universal Foundation. Technology TISE), Moscow, OOO «Adelant», 2010, 59 p.
7. Kulikov Yu.G., Dubnov Yu.D. *Metodicheskie ukazaniya po ispytaniyu vechnomerzlykh glinistykh gruntov v polevykh usloviyakh: metodicheskie ukazaniya* (Methodological guidelines for the testing of permafrost clay Grun experts in the field. Instructional guidelines), Moscow, Glavtransport, 1969, 58 p.
8. Trofimov V.T., Korolev V.A., Voznesenskiy E.A. *Gruntovedenie*. 6-e izd. (Soil science, 6th edition), Moscow, Izd-vo MGU, 2005, 1024 p.
9. Mazurov G.P. *Fiziko-mekhanicheskie svoystva merzlykh gruntov* (Physical and mechanical properties of frozen soils), Leningrad—Moscow, Stroyizdat, 1964, 45 p.
10. *Stroitel'naya klimatologiya. SP 131.13330.2012. Aktualizirovannaya redaktsiya* SNiP 23-01-99*. Vved. 01.01.2013 (Construction climatology. SP 131.13330.2012. Revised edition of SNiP 23–01–99*. Introduction 01.01.2013), Moscow, 2012.
11. *Otoplenie, ventilyatsiya i konditsionirovanie vozdukh. SNiP 2.04.05-91**. Vved. 01.01.1992 (SNiP 2.04.05-91*. Heating, ventilation and air conditioning. Introduction 01.01.1992), Moscow, 1999, 72 p.
12. Map of heights. Russian VHF portal, 2003–2015, available at: <http://www.vhfdx.ru/karta-vyisot> (accessed: 19.11.2015).