

УДК 551.345.2 (470.13)

В.З. Хилимонюк¹, Г.П. Пустовойт², М.В. Филатова³**ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД ПРИ ЗАГРЯЗНЕНИИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ УГОЛЬНОЙ ПЫЛЬЮ НА ТЕРРИТОРИИ ПЕЧОРСКОГО УГОЛЬНОГО БАССЕЙНА**

Приведена количественная оценка влияния загрязнения поверхности территории угольной пылью на температурный режим многолетнемерзлых пород в районах Печорского угольного бассейна.

Ключевые слова: многолетнемерзлые породы, радиационно-тепловой баланс, загрязнение, угольная пыль, температурный режим.

The evaluation of influence of surface pollution by black dust on permafrost soils thermal regime in the Pechora coal basin is presented.

Key words: permafrost soils, surface radiation and thermal balance, pollution by black dust, thermal regime.

Введение. Температурный режим многолетнемерзлых пород во многом определяется структурой радиационно-теплого баланса поверхности. Влияние освоения территорий угольных месторождений на радиационный баланс выражается в ослаблении интенсивности суммарной радиации, увеличении поглощения коротковолновой радиации и уменьшении эффективного излучения Земли. Причина этого заключена в загрязнении атмосферы и поверхности земли угольной пылью, что связано с работой угледобывающих предприятий. Например, в атмосфере Воркутинского угледобывающего комплекса во взвешенном состоянии находятся тонны пылеватых частиц. В период инверсии пылеватые частицы скапливаются в нижних слоях атмосферы и осаждаются в основном на поверхности. В районе г. Воркута по данным изучения снежного покрова средняя величина пылевых падений за период с 1991 по 1996 г. составила 260,2 кг/(км²·сут) [Государственный доклад., 2001]. В районе Интинского комплекса угледобычи загрязненность снежного покрова превышает 140 ПДК [Оберман и др., 2004].

Как известно, один из важных параметров в тепловом балансе Земли — альbedo поверхности (*A*), это отношение отраженной части радиации ко всей приходящей к Земле радиации. О том, что изменение альbedo поверхности влияет на количество поглощенной коротковолновой радиации, а следовательно, и на температурный режим пород, известно давно, качественные последствия наблюдаются повсеместно в виде радиационно-тепловых таликов. По данным [Горбачева, 1984; Ершов, 1968], при загрязнении поверхности, особенно снежного покрова, угольной

пылью, альbedo может уменьшаться в 2 раза и более. В шахтных поселках отражательная способность снежного покрова составляет всего 30–35%, в то время как в зонах с минимальной запыленностью достигает 80%. Загрязненный снег поглощает примерно вдвое больше тепла, чем чистый. В связи с этим в зоне максимальной запыленности весной возникают условия для ускоренного снеготаяния. Мы создали математическую модель и расчетными методами проанализировали влияние изменения альbedo поверхности при загрязнении угольной пылью на температуру пород.

Краткая характеристика района исследований.

Территория Печорского угольного бассейна расположена в восточной части Большеземельской тундры и представляет собой пологохолмистую равнину, средние абсолютные отметки поверхности составляют 50–180 м. В основном преобладают аккумулятивный ледово-морской, морской и озерно-аллювиальный типы рельефа; лишь в Приуралье развиты участки денудационной и денудационно-аккумулятивной равнин [Оберман, 2000].

Территория сложена породами палеозоя и мезозоя, повсеместно перекрытыми мощной толщей четвертичных отложений (до 150 м). Они представлены преимущественно породами глинисто-суглинистого состава, подстилаемыми и перекрываемыми песками, песками с галькой и галечниками.

Особенности рельефа, преимущественно суглинистый состав четвертичных отложений и распространение многолетнемерзлых пород (ММП) предопределили повышенную заболоченность и разветвленность гидрографической сети. Характерно наличие

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геокриологии, ст. науч. с., доцент, канд. геол.-минер. н., *e-mail:* vanda@geol.msu.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геокриологии, ст. науч. с., канд. техн. н., *e-mail:* egc@geol.msu.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геокриологии, магистрант.

множества озер, в основном термокарстового, а также ледникового, старичного, лагунного, тектонического генезиса. Широко распространены плоские и полигональные торфяники, заболоченные низины и хасыреи.

Климат на территории бассейна определяется положением региона в субарктическом поясе с малой солнечной радиацией зимой, воздействием северных морей и интенсивным западным переносом воздушных масс. Характерные особенности климата — его суровость, смена продолжительной холодной зимы коротким нежарким летом [Атлас..., 1997].

Геокриологические условия исследуемого района характеризуются большим разнообразием. Здесь выделяются три мерзлотные зоны — массивно-островного, прерывистого и сплошного распространения многолетнемерзлых пород [Геокриология СССР, 1988]. В зоне островного распространения мерзлые породы занимают от 10 до 60% территории. Верхняя поверхность мерзлых пород залегает на глубине от 4–6 до 20–40 м; нижняя — на глубине 70–90 м, редко до 180 м. Температура мерзлых пород на подошве слоя годовых теплооборотов изменяется от нуля до $-2,5$ °С. В зоне прерывистого распространения ММП мерзлые породы занимают до 85–90% территории зоны. Площадь несквозных таликов достигает 40–60% территории. Глубина верхней поверхности мерзлых пород изменяется от нескольких метров до 40 м. Наименьшая глубина нижней поверхности мерзлых пород отмечена на глубине 15–20 м, наибольшая — на глубине 200 м. В среднем мощность мерзлых пород составляет 60–70 м. Температура мерзлых пород на подошве слоя годовых теплооборотов изменяется от нуля до $-1,5$... $-2,0$ °С. В зоне сплошного распространения ММП мерзлые породы занимают до 95% территории и имеют мощность до 150–180 м. Температура мерзлых пород варьирует от нуля до $-3,5$ °С. Температура пород несквозных таликов на подошве слоя годовых теплооборотов не превышает 2 °С.

Распространение почв и растительности обусловлено комплексом физико-географических факторов. Рассматриваемая территория находится в тундровой и лесотундровой зонах, где господствуют ерниковая тундра и тундровые почвы с залегающими вблизи земной поверхности переувлажненными горизонтами. Здесь преобладают минеральные и оторфованные участки с блочностью различного характера.

Методика оценки изменения температурного режима ММП в результате загрязнения угольной пылью. Оценку изменения температурного режима ММП в результате загрязнения угольной пылью проводили на примере опорных участков Интинского и Воркутинского промышленных районов, расположенных в различных климатических и геокриологических условиях.

Территория Интинского участка находится в зоне влияния нескольких шахт Интинского промышленного района. Участок расположен в пределах

южной геокриологической лесотундровой подзоны с редкоостровным (до 10%) распространением многолетнемерзлых пород, приуроченных к торфяникам; максимальная мощность ММП до 15 м.

Второй опорный участок расположен в Воркутинском промышленном районе в области прерывистого распространения многолетнемерзлых пород (до 80%), максимальная мощность ММП достигает 150–180 м. Талики преимущественно радиационно-тепловые, приурочены к участкам аномально большого снежного накопления (>1 м), выявлены также гидрогенные, нередко сквозные, подрусловые и пойменные талики. На рассматриваемом участке, в отличие от остальной территории, в результате техногенного воздействия мерзлые породы занимают около 50% площади.

Территорию каждого опорного участка делили в соответствии с данными работ [Хрусталева, 1971; Горбачева, 1984] по степени загрязнения поверхности угольной пылью на три зоны — зону естественного ландшафта, удаленную от источника загрязнения на 25 км и более; зону с незначительной степенью загрязнения на расстоянии от 6 до 25 км от источника и зону сильного загрязнения на расстоянии 5–6 км от источника.

Для каждой выделенной зоны характерны свои значения альбедо поверхности: чем ближе территория к источнику загрязнения, тем меньше ее отражательная способность, причем такая закономерность наблюдается не только в период залегания снежного покрова, но и в летние месяцы. Значения основных составляющих радиационно-теплого баланса (коротковолновая радиация ($Q_{\text{сум}}$), эффективное длинноволновое излучение ($I_{\text{эф}}$), затраты тепла на испарение (LE), а также температура воздуха взяты с ближайших метеорологических станций с актинометрическими наблюдениями (табл. 1, 2) [Барашкова и др., 1961; Павлов, 1975, 1980]. Значения альбедо (A) поверхности принимались для каждой выделенной зоны в зависимости от степени загрязнения по экспериментальным данным В.М. Горбачевой [Горбачева, 1984] и Э.Д. Ершова [Ершов, 1968]. Соответствующие среднемесячные значения температуры дневной поверхности ($T_{\text{п}}$), найденные из расчета радиационно-теплого баланса ($T_{\text{п}} = T_{\text{в}} + [Q_{\text{сум}}(1 - A) - I_{\text{эф}} - LE]/\alpha_{\text{т}}$), представлены в табл. 1 и 2. При этом в Интинском районе на расстоянии 6–25 км от источника среднегодовая температура дневной поверхности составляла $-2,7$, в 5–6 км от источника $-1,9$, на естественном ландшафте $-2,9$ °С (табл. 1), а в Воркутинском районе она была равна $-4,95$; $-4,3$ и $-5,1$ °С соответственно (табл. 2).

Затем была поставлена задача — количественно оценить, как изменение температуры дневной поверхности влияет на температуру многолетнемерзлых пород. При этом перенос тепла в породах рассматривался как кондуктивный, описываемый уравнением теплопроводности. Из-за однородности площадки в плане можно считать, что тепловые потоки идут

только в вертикальном направлении, поэтому задачу считали одномерной. В этом случае уравнение теплопроводности можно записать в виде

$$C \partial T / \partial t = \partial (\lambda \partial T / \partial z) / \partial z, \quad (1)$$

где C — объемная теплоемкость, МДж/(м³·°С); T — температура, °С; λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); t — время, ч.; z — глубина, м.

При фазовых превращениях лед–вода теплопроводность и теплоемкость пород изменяются, поэтому уравнение теплопроводности записывается отдельно

для талой и мерзлой зон, т.е. получается система двух уравнений с двумя неизвестными значениями температуры: $T_1(z, t)$ в талой зоне и $T_2(z, t)$ — в мерзлой. Положение границы раздела фаз — также неизвестная функция времени, которая определяется из специфического условия — условия Стефана, которое представляет собой закон сохранения энергии при выделении скрытой теплоты фазового перехода:

$$L_v \frac{dh}{dt} = \lambda_2 \frac{\partial T_2(z, t)}{\partial z} \Big|_{z=h} - \lambda_1 \frac{\partial T_1(z, t)}{\partial z} \Big|_{z=h}, \quad (2)$$

Таблица 1

Суммарная коротковолновая радиация ($Q_{\text{сум}}$, Вт/м²), эффективное длинноволновое излучение ($I_{\text{эф}}$, Вт/м²), затраты тепла на испарение (LE , Вт/м²), коэффициент турбулентного теплообмена (α_T , Вт/(м²·К)), температура воздуха ($T_{\text{в}}$, °С), коэффициент теплообмена, учитывающий влияние растительного и снежного покровов (α , Вт/(м²·К)), альbedo (A , доли ед.) и температура дневной поверхности ($T_{\text{п}}$, °С) в Интинском районе

Показатели	Месяцы											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$Q_{\text{сум}}$	3,2	19,1	68,4	157	175	207	218	137	62,0	28,6	4,8	1,6
$I_{\text{эф}}$	8,0	12,7	25,4	28,6	54,1	57,2	68,4	46,1	30,2	19,1	14,3	11,1
LE	—	—	—	—	—	59,3	66,7	26,1	—	—	—	—
α_T	14,5	12,7	14,4	13,9	14,3	13,9	13,6	13,3	12,7	13,3	14,4	14,4
$T_{\text{в}}$	-19,2	-18,7	-15,4	-6,4	0,1	8,5	13,8	11,0	5,5	-2,8	-11,6	-17,4
α	0,87	0,70	0,70	1,04	1,97	8,0	8,0	8,0	8,0	4,41	1,39	1,04
В естественных условиях												
A	0,68	0,72	0,69	0,70	0,25	0,10	0,14	0,13	0,13	0,40	0,76	0,70
$T_{\text{п}}$	-19,7	-19,3	-15,7	-5,1	5,5	13,5	17,7	14,5	7,4	-2,9	-12,5	-18,1
В зоне 6–25 км от источника												
A	0,54	0,60	0,60	0,54	0,25	0,10	0,14	0,13	0,13	0,40	0,45	0,50
$T_{\text{п}}$	-19,7	-19,1	-15,3	-3,3	5,6	13,5	17,7	14,5	7,4	-2,9	-12,4	-18,1
В зоне 5–6 км от источника												
A	0,30	0,25	0,20	0,20	0,20	0,07	0,09	0,08	0,08	0,18	0,30	0,30
$T_{\text{п}}$	-19,6	-18,6	-13,4	0,6	6,1	13,9	18,5	15,0	7,6	-2,5	-12,4	-18,1

Таблица 2

Суммарная коротковолновая радиация ($Q_{\text{сум}}$, Вт/м²), эффективное длинноволновое излучение ($I_{\text{эф}}$, Вт/м²), затраты тепла на испарение (LE , Вт/м²), коэффициент турбулентного теплообмена (α_T , Вт/(м²·К)), температура воздуха ($T_{\text{в}}$, °С), коэффициент теплообмена, учитывающий влияние растительного и снежного покровов (α , Вт/(м²·К)), альbedo (A , доли ед.) и температура дневной поверхности ($T_{\text{п}}$, °С) в Воркутинском районе

Показатели	Месяцы											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$Q_{\text{сум}}$	1,6	15,1	73,9	122	173	211	210	92,2	45,3	17,5	4,8	0,0
$I_{\text{эф}}$	17,0	13,8	30,2	28,6	70,0	84,3	70,0	33,4	20,7	12,7	13,7	19,1
LE	—	—	—	—	—	59,3	66,7	26,1	—	—	—	—
α_T	14,8	13,7	14,5	13,8	14,6	14,9	14,2	13,8	13,1	13,7	14,6	14,9
$T_{\text{в}}$	-20,1	-19,8	-17,0	-9,3	-2,7	6,1	12,3	9,7	4,0	-4,8	-12,8	-16,9
α	1,40	1,16	1,04	1,16	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	2,67	1,86	1,51
В естественных условиях												
A	0,68	0,72	0,69	0,70	0,25	0,10	0,14	0,13	0,13	0,40	0,76	0,70
$T_{\text{п}}$	-21,2	-20,6	-17,5	-8,7	1,5	9,4	15,5	11,3	5,5	-4,9	-13,7	-18,3
В зоне 6–25 км от источника												
A	0,54	0,60	0,60	0,54	0,25	0,10	0,14	0,13	0,13	0,40	0,45	0,50
$T_{\text{п}}$	-21,2	-20,4	-17,0	-7,3	1,6	9,4	15,5	11,3	5,5	-4,9	-13,6	-18,3
В зоне 5–6 км от источника												
A	0,30	0,25	0,20	0,20	0,20	0,07	0,09	0,08	0,08	0,18	0,30	0,30
$T_{\text{п}}$	-21,2	-20,0	-15,0	-4,3	2,2	9,9	16,3	11,7	5,7	-4,7	-13,5	-18,3

Таблица 3

Теплофизические характеристики пород

Генезис и возраст пород	Литологический состав	Плотность в сухом состоянии, кг/м ³	Суммарная влажность, доли единицы	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)		Объемная теплоемкость, МДж/(м ³ ·°С)		Объемная теплота фазовых переходов, МДж/м ³
				талой	мерзлой	талой	мерзлой	
gII ₂₋₄ , gmII ₂₋₄ , gIII ₂₋₄ , gIII ₂	Суглинок	1800	0,18	1,57	1,80	3,16	2,40	108,3
bIII-IV	Торф-1	200	4,0	0,80	1,33	3,76	2,38	267,5
bIII-IV	Торф-2	100	6,0	0,40	0,70	2,72	1,67	200,6

где L_v — скрытая теплота фазового перехода на единицу объема; h — текущая координата фазовой границы, рассматриваемая как неизвестная функция времени; индексы 1 и 2 относятся к талой и мерзлой зонам соответственно.

Задача решалась численно методом конечных разностей по программе ТЕПЛО, разработанной на кафедре геоэкологии МГУ под руководством проф. Л.Н. Хрусталева при участии одного из авторов статьи [Основы геоэкологии, 1999]. Глубина расчетной области принята равной 20 м, так как на этой глубине все сезонные колебания практически затухают. На нижней границе расчетной области ставилось граничное условие 2-го рода с нулевым тепловым потоком (геотермическим потоком тепла из недр пренебрегаем ввиду его малости). На верхней границе было задано условие 3-го рода, т.е. температура дневной поверхности ($T_{п}$) и коэффициент теплообмена (α), учитывающий влияние растительного и снежного покровов (табл. 1, 2).

Расчеты проводились для разрезов ММП, наиболее представительных на каждом участке. На Воркутинском участке многолетнемерзлые породы наблюдаются на двух типах ландшафтов — на пологоувалистых, холмисто-грядовых равнинах, в верхней части разреза сложенных ледниковыми и ледниково-морскими отложениями (g, gmII₂₋₄, gIII₂₋₄, gIII₂), и на бугристо-западинном ландшафте с болотными отложениями (bIII-IV). Первый представлен на всю толщу (20 м) покровными суглинками, второй — с поверхности до глубины 2 м сложен торфами (торф-1), ниже — суглинками. На Интинском участке расчеты выполнены для торфяников (торф-2), с глубины 3 м подстилаемых суглинками (до 20 м). Расчетные теплофизические характеристики пород, принятые по данным СНИП 2.02.04-88, представлены в табл. 3.

Результаты расчетов. Анализ полученных результатов для Воркутинского района (табл. 4) показал, что температура однородного массива покровных суглинков постепенно повышается во времени (расчет на 20 лет) по всей толще разреза ниже глубины сезонно-талого слоя (СТС) на всей запыленной территории. При этом мощность сезонно-талого слоя изменяется следующим образом. В зоне наибольшей удаленности от источника загрязнения (от 6 до 25 км),

где запыление слабое и неравномерное, практически не наблюдается увеличения глубины СТС, которая составляет около 137 см, а повышение температуры пород на 0,2 °С укладывается в погрешности расчетов. В зоне, близкой к источнику загрязнения (до 6 км), произойдет повышение температуры пород на 0,65 °С, а глубина оттаивания грунта составит 145 см (при 136 см на естественном ландшафте). Следовательно, за 20 лет эксплуатации месторождения только за счет изменения альбедо поверхности глубина сезонного оттаивания вблизи углепромышленного комплекса на 9 см больше, чем на естественном ландшафте. Это, конечно, незначительное увеличение глубины оттаивания, но следует учитывать, что это только один из многочисленных параметров техногенеза при угледобыче, причем наименее значимый.

Для неоднородного по глубине массива пород (второй тип разреза) прослеживается такая же тенденция к повышению температуры пород во времени на загрязненной угольной пылью территории, т.е. примерно 0,2–0,7 °С в зависимости от удаленности. Но глубина сезонного оттаивания за расчетные 20 лет даже при повышении температуры на 0,7 °С остается практически неизменной (разница 3–4 см) (табл. 4). Это объясняется залеганием с поверхности торфа мощностью 2 м.

Таблица 4

Результаты расчетов температуры многолетнемерзлых пород ($T_{пр}$, °С) на глубине 10 м и глубины СТС ($H_{стс}$, м) в Воркутинском районе

Тип разреза	Годы	Естественный ландшафт		Удаление от 6 до 25 км		Удаление до 6 км	
		$T_{пр}$, °С	$H_{стс}$, м	$T_{пр}$, °С	$H_{стс}$, м	$T_{пр}$, °С	$H_{стс}$, м
Суглинок	0	-2,05	1,36	-2,05	1,36–1,37	-2,05	1,36
	2			-2,03		-1,94	1,37
	5			-2,00		-1,74	1,39
	10			-1,97		-1,55	1,42
	20			-1,94		-1,40	1,45
Торф до глубины 2 м, далее суглинок до 20 м	0	-2,56	0,63	-2,56	0,63–0,64	-2,56	0,63
	2			-2,55		-2,46	0,63
	5			-2,52		-2,26	0,64
	10			-2,48		-2,07	0,65
	20			-2,45		-1,91	0,67

Таблица 5

Результаты расчетов температуры многолетнемерзлых пород ($T_{пр}$, °C) на глубине 10 м и глубины СТС ($H_{стс}$, м) в Интинском районе

Тип разреза	Годы	Естественный ландшафт		Удаление от 6 до 25 км		Удаление до 6 км	
		$T_{пр}$, °C	$H_{стс}$, м	$T_{пр}$, °C	$H_{стс}$, м	$T_{пр}$, °C	$H_{стс}$, м
Торф до глубины 3 м, далее суглинок до 20 м	0	-0,5	0,71	-0,5	0,72	-0,5	0,7
	2			-0,5		-0,4	0,72
	5			-0,5		-0,3	0,77
	10			-0,4		-0,2	0,88
	20			-0,4		-0,1	1,05

В Интинском районе на территории, удаленной от 6 до 25 км от источника загрязнения, температура многолетнемерзлых пород на глубине 10 м практически не изменяется (табл. 5). При этом глубина слоя сезонного оттаивания также остается практически неизменной и составляет около 0,7 м. На сильно запыленной территории вблизи промышленной зоны (до 6 км) температура ММП повышается на 0,4 °C, что приводит к постепенному увеличению глубины оттаивания и понижению кровли многолетнемерзлых пород до глубины 1,05 м за 20 лет. Таким образом, наблюдаются деградация многолетнемерзлых пород и переход слоя сезонного оттаивания в слой промерзания глубиной до 0,73 м. Так как многолетнее оттаивание происходит на торфяниках, это приведет к усилению заболачивания территории.

Заключение. Анализ фактических данных о динамике температурного режима многолетнемерзлых

пород на территории Печорского угольного бассейна показал изменение среднегодовой температуры и глубины сезонного оттаивания, обусловленное разными техногенными факторами, в том числе загрязнением поверхности земли угольной пылью. Для оценки влияния пылевого загрязнения проведено математическое моделирование температурного режима пород и дан прогноз на 20 лет. Расчеты выполнены для разных типов ландшафта, которые расположены на разном расстоянии от углепромышленного комплекса и соответственно имеют разную степень загрязнения.

Полученные нами данные показали, что многолетнемерзлые породы по-разному реагируют на изменение температуры дневной поверхности в зависимости не только от типа разреза (состав и состояние пород, их температурный режим), но и от широтно-зональных и климатических факторов. В северной геокриологической зоне с прерывистым (80%) распространением низкотемпературных (-2,0...-2,5 °C) многолетнемерзлых пород влияние загрязнения угольной пылью незначительно. Однако совместное влияние загрязнения и современного потепления климата может привести к негативным изменениям свойств грунтов оснований зданий, возведенных с сохранением их мерзлого состояния. В южной геокриологической зоне с высокотемпературными (-0,5 °C) многолетнемерзлыми породами наблюдается и большая реакция на изменение температурного режима поверхности. В результате, по прогнозам за 20 лет, произойдет опускание кровли ММП и образование мерзлоты несливающегося типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Атлас Республики Коми по климату и гидрологии. М.: Дрофа: ДиК, 1997. 116 с.

Барашкова Е.П., Гаевский В.П., Дьяченко Л.Н. и др. Радиационный режим территории СССР. Л.: Гидрометиздат, 1961. 527 с.

Геокриология СССР / Под ред. Э.Д. Ершова. Т. 1. Европейская территория СССР. М.: Недра, 1988. 358 с.

Горбачева В.М. Город в Заполярье и окружающая среда. Л.: Стройиздат, 1984. 100 с.

Государственный доклад о состоянии окружающей природной среды Республики Коми в 2000 г. Сыктывкар: Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Коми; Госкомэкология Республики Коми, 2001.

Ершов Э.Д. Принципы и приемы управления сезонным оттаиванием—промерзанием пород на примере Анадырско-го района: Автореф. канд. дисс. М.: МГУ, 1968.

Оберман Н.Г. Геоэкологическая съемка территории деятельности ГПП «Поляруралгеология» масштаба 1: 1000 000. Кн. 1. Воркута, 2000. 600 с.

Оберман Н.Г., Шеслер И.Г., Рубцов А.И. Экология Республики Коми и восточной части Ненецкого автономного округа. Сыктывкар, 2004. 256 с.

Основы геокриологии. Ч. 5. Инженерная геокриология. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1999. 526 с.

Павлов А.В. Расчет и регулирование мерзлотного режима почвы. М.: Наука, 1980. 240 с.

Павлов А.В. Теплообмен почвы с атмосферой в северных и умеренных широтах территории СССР. Якутск, 1975. 302 с.

Хрусталева Л.Н. Температурный режим вечномерзлых грунтов на застроенной территории. М.: Наука, 1971. 168 с.

Поступила в редакцию
21.06.2010