

УДК 551.34+631.417.1:631.811.1(571.56)

Предварительный анализ запасов органического углерода и азота в породах ледового комплекса Центральной Якутии

А.Г. Шепелев*, Е.В. Старостин^{**,***}, А.Н. Фёдоров^{*,***}, Т.Х. Максимов^{**,***}

*Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, г. Якутск

**Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск

***Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, г. Якутск

В статье обобщены данные по запасам органического углерода и азота многолетнемерзлых пород в различных регионах северного полушария. Установлено, что в регионах Аляски и Канады сосредоточено больше запасов органического углерода и азота (около 70,0 кг $C_{орг}/m^2$ и 6,33 кг $N_{орг}/m^2$) по сравнению с Северо-Восточной Сибирью (22,0 кг $C_{орг}/m^2$ и 2,13 кг $N_{орг}/m^2$). Проведены рекогносцировочные исследования запасов углерода и азота в глубинах более одного метра на ледовом комплексе Центральной Якутии. Показано, что в верхнем метре ледового комплекса депонировано 55,0% органического углерода от общих запасов его в почве, а во втором метре – 40,5% $C_{орг}$. В трехметровой толще зарегистрированы наименьшие запасы $C_{орг}$, около 29,0%. Суммарное количество запасов органического углерода и азота распределено в ряду: деятельный слой – защитный слой – многолетняя мерзлота. В условиях бореального пояса высокое отношение углерода к азоту способствует слабой минерализации и медленному разложению органического материала, находящегося в почве, что влияет на обогащение почвы азотом.

Ключевые слова: органическое вещество, углерод, азот, запасы, многолетнемерзлая толща.

Preliminary Analysis of Stocks of Organic Carbon and Nitrogen in the Upper Part of the Ice Complex in Central Yakutia

A.G. Shepelev*, E.V. Starostin^{**,***}, A.N. Fedorov^{*,***}, T.Chr. Maximov^{**,***}

*Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk

**Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, Yakutsk

***IREC BEST, North-Eastern Federal University, Yakutsk

The paper summarizes the data on stocks of organic carbon and nitrogen in permafrost in different regions of the northern hemisphere. It was found that in the regions of Alaska and Canada there are more stocks of organic carbon and nitrogen in the permafrost (about 70.0 kg TOC/m^2 and 6.33 kg N/m^2) in comparison with the permafrost in North-Eastern Siberia (22.0 kg TOC/m^2 and 2.13 kg N/m^2). We conducted reconnaissance studies of carbon and nitrogen reserves in the depths of one meter at the ice complex in Central Yakutia. It was shown that in the upper meter of the ice complex it is deposited 55.0% of the organic carbon of the total reserves in the soil, and in the second meter - 40.5% TOC . In the three-meter thickness the smallest stocks TOC are registered, which is about 29.0%. The total sum of stores of organic carbon and nitrogen is distributed in the line: an active layer - a protective layer - permafrost.

Under the conditions of the boreal zone a high ratio of carbon to nitrogen contributes to weak mineralization and slow decomposition of organic material in the soil, which affects the enrichment (accumulation) of soil with nitrogen.

Key words: organic matter, carbon, nitrogen, stocks, permafrost.

ШЕПЕЛЕВ Андрей Геннадиевич – к.б.н., с.н.с., carbon-shag@yandex.ru; СТАРОСТИН Егор Вячеславович – аспирант, ev.starostin@s-vfu.ru; ФЁДОРОВ Александр Николаевич – к.г.н., в.н.с., fedorov@mpi.ysn.ru; МАКСИМОВ Трофим Христофорович – д.б.н., t.c.maximov@ibpc.ysn.ru.

Введение

Изучение углерода и азота – органических веществ мерзлотных почв, являющихся одними из основных компонентов педосферы в области распространения многолетней мерзлоты, имеет большую научную значимость в связи с усилением антропогенного воздействия и недостаточной изученностью вопроса. Основная доля имеющегося научного материала по данной проблематике касается арктических и субарктических ландшафтов России, Канады и США, рассматриваемыми объектами исследований которых являются тундры и лесотундры [1–12]. Значительно меньше литературы по бореальным лесам [1, 13, 5, 14, 15].

Почвы криолитозоны и подстилающие их многолетнемерзлые породы являются резервуаром законсервированного углерода. Его накопление происходило на протяжении геологически длительного времени [16, 17]. Органический углерод, захороненный в многолетнемерзлых породах, представлен гумусоподобными веществами, гумусовыми соединениями, а также в виде растворенного органического вещества. Около 2/3 органического углерода земных экосистем земного шара аккумулируется в почве – 1395 Гт. Из этого количества 192 Гт или 14% приходится на экосистемы тундры и лесотундры, а на бореальные леса – 13%, где он депонирован в основном в толще многолетней мерзлоты [12]. Не стоит упускать из виду и тот факт, что при деградации многолетнемерзлых толщ ископаемый углерод в форме CO_2 и CH_4 будет поступать в атмосферу, тем самым участвовать в процессах образования парниковых газов [1, 11, 17, 18].

В значительной ли степени будут изменяться величины потоков углерода и азота в результате оттаивания многолетней мерзлоты? И насколько они будут зависеть от масштаба локальных факторов, скорости криогенных процессов или главную роль в этом определит изменение климата? Конечные результаты этих процессов остаются неопределенными.

Цель данной работы – оценить запасы органического углерода и азота в деятельном слое, а также на глубинах более 1 м в ледовом комплексе, как потенциально опасных источниках эмиссии парниковых газов в условиях изменяющегося климата.

Материалы и методы исследования

Участок наших исследований расположен на аласе Тенгюргестях, что в 3,5 км к северо-востоку от с. Чюйя Мегино-Кангаласского района Республики Саха (Якутия), в 3 км к юго-западу от мониторингового полигона Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН «Юкэчи». В гео-

лого-геоморфологическом отношении участок исследований относится к Лено-Амгинскому междуречью и является частью Центральноякутской низменности, лежащей в провинции Среднесибирской возвышенности [19], с позиции ландшафтоведения – на Лено-Амгинской аласной провинции физико-географической страны Средняя Сибирь [20]. Район характеризуется широким развитием термокарстовых форм рельефа [21]. Мощность ледового комплекса (ЛК) составляет 10–12 м, а глубина его залегания – 2 м. Формирование отложений ЛК происходило в суровых климатических условиях позднего плейстоцена (от 13700 ± 530 до 22300 ± 1200 лет назад) при температуре грунтов не выше – 10°C [22].

По почвенно-географическому районированию исследуемая территория относится к бореальному (умеренно-холодному) поясу Восточно-Сибирской мерзлотно-таежной области, к Центрально-Якутской провинции среднетаежной подзоны мерзлотно-таежных и палевых почв [23].

Содержание органического углерода ($\text{C}_{\text{орг}}$) и азота ($\text{N}_{\text{орг}}$) в деятельном слое мерзлотной палевой оподзоленной почвы, а также в многолетнемерзлых грунтах определяли на элементном анализаторе CN «Thermo scientific Flash 2000» (США). Плотность почвы в естественном сложении определяли буровым методом [24]. Расчет общих запасов общего углерода и азота органического вещества почвы проводили согласно [25]. Статистическая обработка данных велась в системе «Statistica 6.0», StatSoft (США).

Работа проводилась в контексте сравнения результатов обобщенных литературных материалов по органическому веществу мерзлотных почв северного полушария и собственных данных, полученных на рассматриваемом участке.

Результаты и обсуждение

Обобщенная оценка запасов $\text{C}_{\text{орг}}$ и $\text{N}_{\text{орг}}$ на территории северного полушария представлена в табл. 1. Усредненные запасы $\text{C}_{\text{орг}}$ в верхнем метровом слое в зависимости от приуроченности к ландшафту можно расположить в следующий ряд ($\text{кг}/\text{м}^2$): бореальные леса – 22,8; лесотундра и тундра – 23,6. В региональной последовательности большими запасами углерода обладают зоны Аляски и Канады – до $70,0 \text{ кг } \text{C}_{\text{орг}}/\text{м}^2$, за ними следуют Центральная Сибирь ($35,6 \text{ кг}/\text{м}^2$), север европейской части России ($24,5 \text{ кг}/\text{м}^2$) и Северо-Восточная Сибирь ($22 \text{ кг}/\text{м}^2$). Якутия, являясь в географическом понимании крупным регионом России, обладает гетерогенностью почвенного покрова и разнообразными природными ландшафтами, что подразумевает широкий диапазон изменения запасов углерода от 7,9 до $35 \text{ кг}/\text{м}^2$ в верхнем метровом слое.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЗАПАСОВ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА И АЗОТА В ПОРОДАХ

Для нас наибольший интерес представляли слои глубже 1 м, находящиеся в многолетнемерзлом состоянии долгое время, поскольку аккумуляция органического вещества осуществлялась не только в деятельном слое, но и в многолетнемерзлых толщах, которые могут содержать значительные количества $C_{орг}$ и $N_{орг}$. Следует принять во внимание, что при современном состоянии климата возможно оттаивание сверху многолетнемерзлых пород в результате повышения температуры, а это усилит минерализацию органического вещества почвы в виде CO_2 . Расчёты показали (табл. 1), что депони-

рованный $C_{орг}$ в верхней 3-метровой толще составляет 15,5–29,0% от общих запасов углерода в почве. В 2-х метрах заключено 30,0–40,5% углерода, а в первом метре – 34,2–55,0%. Как видно, наибольшими запасами $C_{орг}$ располагает верхний метровый слой почвы за счет наличия в нем полуразложившихся и разложившихся древесных и растительных остатков, в том числе наличия корней. Присутствие запасов в нижних слоях объясняется тем, что в условиях пониженных температур $C_{орг}$ содержится в устойчивых соединениях и его накопление во втором и третьем метре почвы напрямую

Т а б л и ц а 1

Сравнительная оценка запасов органического углерода и общего азота в различных регионах северного полушария

Регион	Зона	Почвы	Слой почвы, см	Запасы $C_{орг}$, кг/м ²	Запасы $N_{общ}$, кг/м ²	Литературные источники
	Бореальные леса	Торфяники	0–100	16,0 – 23,9	Не оценивались	G. Grosseetal., 2011 [1]
	Тундра			9,0 – >50		
	Бореальные леса	Камбисоли		13,5		C. L. Ping et al., 2010 [13]
		Подзолы		16,8		
		Глейсоли		26,2		
		Криоземы		43,3		
	Тундра, оз. Хили	Гелисоли		50,0		C. E. Hicks Pries et al., 2012 [2]
	Тундра, арктическая прибрежная равнина	Гелисоли		69,9		J. G. Bockheim, 2007 [3]
Гелисоли		16,9				
р. Иткиллик	Ледовый комплекс	0–100	32,5	Не оценивались	M. Kanevskiy et al., 2011 [4]	
		100–1350	29,4			
		1350–3130	79,9			
		0–3130	141,8			
Северная Америка (Аляска и Канада)		Гелисоли	0–100	70,0	6,9	J. W. Harden et al., 2012 [26]
			100–200	50,0		
			200–300	40,0		
			0–300	160,0		
	Не указана	Гелисоли	0–100	45,0	7,5	
			100–200	33,0		
			200–300	32,0		
		Гелисоли	0–100	39,0	4,6	
			100–200	21,0		
200–300			11,0			
Канада	Бореальные леса	Турбик криосоли	0–100	6,0 –>50	Не оценивались	G. Grosseetal., 2011[1]
	Тундра	Гелисоли		6,0 –>50		
Северо-Восточная Европейская часть России (Республика Коми)	Еловый лес	Гистосоли/ Альбелювисоли	0–100	16,0	Не оценивались	P. Kuhry et al., 2002 [5]
	Лесотундра	Гистосоли	0–100	24,5		G. Hugelius et al., 2011 [6]

1	2	3	4	5	6	7
Центральная Сибирь (Красноярский край)	Горная лесотундра, плато Путорана	Глееземы	0–100	35,6	1,46	Y. Matsuura et al., 1997 [7]
Среднее по Восточной Сибири	Земли покрытые лесом	Не указано	0–100	16,5	1,43	О.В. Честных и др., 2004 [27]
	Земле не покрытые лесом	Не указано		16,1	1,25	
Среднее (Центральная и Восточная Сибирь, Центральная Аляска)	Не указана	Гелисоли	0–100 0–300	8,8 18,4	Не оценивались	P. Kuhry et al., 2013 [28]
		Гелисоли	0–100 100–200 0–300	21,2 20,7 58,1	Не оценивались	
		Гелисоли	0–100 0–300	5,1 5,3	Не оценивались	
Северо-Восточная Сибирь (Якутия)	Колымская низменность	Криоземы типичные	0–100	14,9	Не оценивались	Н.С. Мергелов, В.О. Таргульян, 2011 [8]
		Криоземы грубогумуси-рованные		12,1		
		Аллювиальные дерновые		35,0		
		Торфяно-глееземные		30,5		
		Криоземы перегнойные		14,0		
		Криоземы глееватые		11,4		
		Торфяно-криоземные глеевые		14,8		
	Глееземы	10,0				
Дуванный яр, р. Колыма	Палеокриопочвы	0–100	31–63		J. Strauss et al., 2012 [9]	
Северо-Восточная Сибирь (Якутия), Оймякон	Горная лесотундра	Арктические пустынные	0–100	21,6	1,15	Y. Matsuura et al., 1997 [7]
Северная Якутия	Горная тундра	Не указано	0–100	7,9	Не оценивались	О.В. Честных и др., 1999 [10]
	Арктическая тундра	Не указано		9,2		
	Типичная тундра	Не указано		10,4		
	Южная тундра	Не указано		12,1		
	Лесотундра	Не указано		14,5		
Не указано	Среднее по всем типам почв	0–300	50–100	Не оценивались	E. A. G. Schuur et al., 2015 [29]	
Северо-Восточная Сибирь (Якутия)	Лесотундра, редкостойная и северная тайга	Криоземы, палевые	0–100	22,0	Не оценивались	Д. Г. Щепашенко и др., 2013 [14]
	Средняя тайга	Мерзлотно-таёжные		15,9		
Центральная Якутия (правый берег р. Лена), полигон Юкэчи	Бореальные леса	Палевые	0–100 100–200 200–250 0–250	17,1 15,3 6,3 38,7	1,03 0,75 0,35 2,13	Настоящая работа

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЗАПАСОВ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА И АЗОТА В ПОРОДАХ

Т а б л и ц а 1 (окончание)

1	2	3	4	5	6	7	
Северо-Восточная Европейская часть России. Северо-Восточная Сибирь. Казахстан. Монголия. Северная Америка (Аляска и Канада). Скандинавия, Гренландия, Исландия	Средние данные по циркумполярной мерзлотной зоне	Гелисоли	0–100	67,2	Не оценивались	C. Tarnocai et al., 2009 [11]	
			100–200	62,0			
			200–300	41,5			
			0–300	170,7			
		Гелисоли	0–100	61,0			
			100–200	53,1			
			200–300	45,1			
			0–300	159,2			
		Гелисоли	0–100	142,6		Не оценивались	G. Hugelius et al., 2014 [30]
			100–200	142,5			
			200–300	67,0			
			0–300	352,1			
Гелисоли	0–100	49,3					
	100–200	43,6					
	200–300	24,8					
	0–300	117,7					
Гелисоли	0–100	33,0	Не оценивались				
	100–200	23,2					
	200–300	20,1					
	0–300	76,3					
Гелисоли	0–100	25,3		Не оценивались			
	100–200	27,0					
	200–300	21,6					
	0–300	73,9					

не связано с обогащением их органическим веществом. Так, предполагают [8], что в результате гравитационных и криогенных миграций подвижные гумусовые вещества проникают вглубь по почвенной толще к многолетнемерзлым породам. Следовательно, гумусовые вещества при замедленной скорости разложения в условиях низких температур постепенно накапливаются вниз по профилю.

Другой причиной нахождения запасов углерода в нижележащих слоях является то, что в верхних частях многолетнемерзлой толщи находится консервированный $S_{орг}$. По определению радиоуглеродной лаборатории Института мерзлотоведения СО РАН аналогичные отложения ледового комплекса зоны сочленения Тюнгулонской террасы р. Лены с Абалахской равниной на Лено-Амгинском междуречье имеют абсолютный возраст от 13700 ± 530 до 22300 ± 1200 лет [22], то есть ледовый комплекс в этом районе образовался в позднем плейстоцене.

Общие запасы $N_{орг}$ в почвах изменяются в очень широких пределах в зависимости от биоклиматических условий. В составе гумуса почв азота содержится малое количество (5–10%), но его общее содержание, например, для условий суббореального пояса в почвах тем выше, чем они богаче углеродом. Этого нельзя сказать об эко-

системах умеренно-холодного климата, к которым принадлежат бореальные леса и мерзлотные почвы. Процессы деструкции и минерализации органического вещества в них происходят в основном в верхнем ежегодно оттаивающем слое, а микробиологическая активность почвы имеет низкие показатели, поэтому значительное количество азота находится в составе труднорастворимого органического вещества. Вследствие этого наблюдаются незначительные запасы общего азота по всем изученным слоям почвы (рис. 1–2).

Так, по нашим исследованиям в Мегино-Кангаласском районе Республики Саха (Якутия) запасы $N_{орг}$ в слое почвы 0–250 см составляли $2,13 \text{ кг/м}^2$, тогда как в Аляске и Канаде средние запасы $N_{орг}$ находятся в пределах $6,33 \text{ кг/м}^2$, то есть почти в 3 раза больше. В лесотундре Восточной Сибири в одном метре сосредоточено порядка $1,46 \text{ кг } N_{орг}/\text{м}^2$, на Северо-Востоке Сибири (Центральная Якутия) – $1,03 \text{ кг } N_{орг}/\text{м}^2$.

На рис. 2 и в табл. 2 приведены абсолютные величины запасов $S_{орг}$ и $N_{орг}$ в мерзлотной палеовой оподзоленной почве на ледовом комплексе. Значения абсолютных запасов углерода и азота, в результате дифференциации элементарных слоев принятой в мерзлотоведении, значительно отлича-

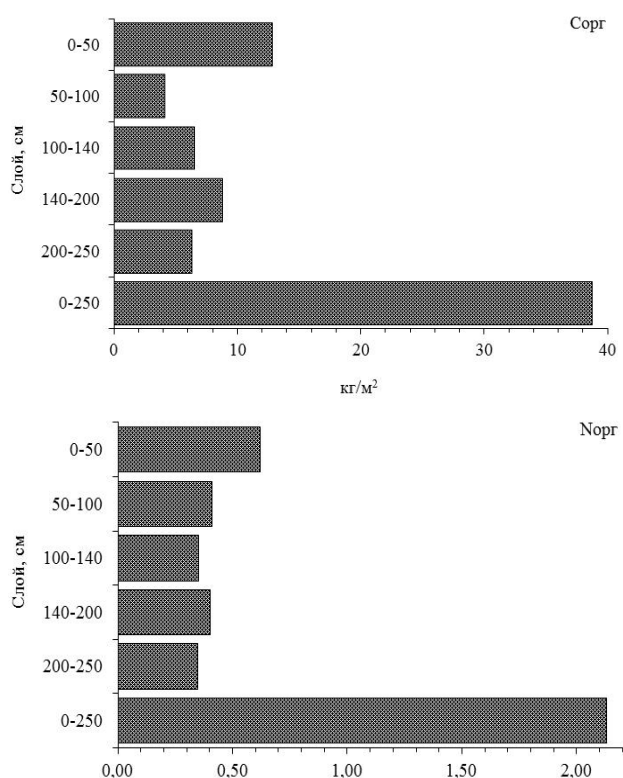


Рис. 1. Изменение запасов $C_{орг}$ и $N_{орг}$ по слоям почвы, $кг/м^2$

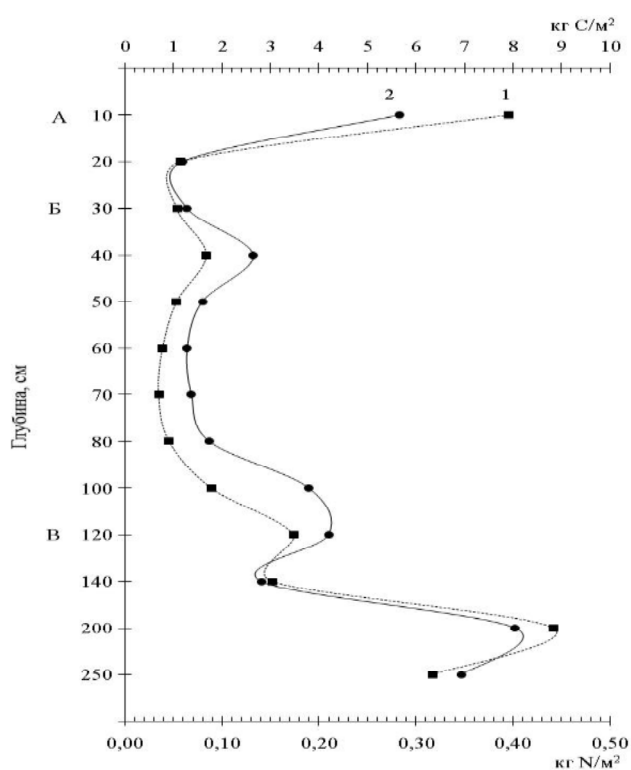


Рис. 2. Профильное распределение запасов $C_{орг}$ и $N_{орг}$ в толще мерзлотной палевой почвы на ледовом комплексе: 1 – $C_{орг}$; 2 – $N_{орг}$. Горизонт: А – органический (0–10 см); Б – органоминеральный (10–30 см); В – минеральный (30–120 см)

ются между собой. Так, максимальными запасами обладает деятельный слой, в котором сосредоточено 53% $C_{орг}$ и 58% $N_{орг}$ от общих запасов в почве. В защитном (переходном) слое – 31% и 25% соответственно. Минимальные запасы $C_{орг}$ и $N_{орг}$ приурочены к многолетнемерзлой толще (по 16% для каждого показателя). Полученные нами величины находятся в пределах варьирования литературных оценок.

Таблица 2
Распределение запасов и среднее содержание углерода и азота органического вещества почвы в ледовом комплексе

Слой, см	Запасы, $кг/м^2$		Содержание, %		C/N
	$C_{орг}$	$N_{орг}$	$C_{орг}$	$N_{орг}$	
Деятельный (0–120)	20,5	1,24	3,0	0,14	21
Защитный (120–200)	11,9	0,54	1,2	0,06	20
Многолетнемерзлый (200–250)	6,3	0,35	1,0	0,05	20

Помимо приведенных общих запасов $C_{орг}$ и $N_{орг}$ в почве, мы посчитали, что целесообразно показать средние запасы для минеральных горизонтов без учета органического и органоминерального. Следовательно, за начальный отсчет был взят первый минеральный горизонт, залегающий непосредственно под органоминеральным (рис. 2). При совокупности минеральных горизонтов относящихся к деятельному слою (от 30 до 120 см) средние запасы $C_{орг}$ и $N_{орг}$ составили – 1,4 и 0,12 $кг/м^2$ соответственно. По мере «углубления» к многолетнемерзлым породам (защитному слою, от 120 до 200 см) средние запасы $C_{орг}$ увеличивались в 4 раза (5,9 $кг/м^2$), а для $N_{орг}$ в 2,5 раза (0,27 $кг/м^2$). В верхней части многолетнемерзлой толщи (от 200 до 250 см), такого значительного и резкого перехода не наблюдалось, как это было между деятельным и защитным слоями. Средние запасы $C_{орг}$ составляли 6,3 $кг/м^2$, $N_{орг}$ – 0,35 $кг/м^2$.

Отношение C/N, служащее показателем обогащенности гумуса азотом, составляет в деятельном слое 21, но с глубиной оно немного снижается. Это свидетельствует о том, что почва в целом обеднена азотом и косвенно указывает на низкую минерализацию органического вещества в мерзлотных почвах. Высокое содержание углерода и низкое азота в почве, способствует слабому разложению микроорганизмами поступающего и законсервированного органического материала. Обусловлено это снижением процесса аммонификации на бедных азотом средах [31]. В условиях же умеренно-холодного климата, минерализационные процессы органи-

ческого вещества почвы протекают в замедленном ритме. За короткий летний период, лишь малая часть органического вещества разлагается до углекислого газа, воды и минеральных солей. В результате этого на поверхности почвы накапливается слой слаборазложившихся растительных и животных остатков в виде органо-генного горизонта, что и наблюдалось в наших исследованиях.

Определение коэффициентов корреляции между запасами $C_{орг}$ и $N_{орг}$ с плотностью почв свидетельствуют о наличии тесной зависимости изучаемых показателей (табл. 3).

Т а б л и ц а 3

Коэффициенты корреляции запасов органического углерода и азота с плотностью почв

Показатель	Содержание $C_{орг}$ и $N_{орг}$, кг/м ²			Плотность, г/см ³	r	S \bar{x}	+05
	сред.	макс.	мин.				
Запасы $C_{орг}$ с плотностью	3,3	9,8	0,7	1,22 ± 0,04	1,0	0,5	4,3
Запасы $N_{орг}$ с плотностью	0,17	0,41	0,06				

Примечание. r – коэффициент корреляции; S \bar{x} и ± – стандартная ошибка среднего; +05 – доверительный интервал для уровня вероятности 95%

З а к л ю ч е н и е

Суммарные запасы органического углерода и азота, исследованные в мерзлотных почвах Центральной Якутии на глубине 250 см оцениваются в 38,7 и 2,13 кг/м² соответственно. Значительная часть запасов сосредоточена в деятельном слое почвы (53% углерода и 58% азота). В защитном слое депонировано 31% и 25%. Менее всего запасов $C_{орг}$ и $N_{орг}$ содержится в верхней многолетнемерзлой толще – 16% для каждого показателя. Высокое отношение C/N – 21 указывает на замедленную минерализацию органического вещества в условиях бореального пояса и на низкое содержание азота в мерзлотных почвах.

Ценность изучения органического вещества в мерзлотных почвах, его запасов в толще деятельного слоя и нижележащих многолетнемерзлых породах представляет особый научный интерес. При этом важно учитывать разнородность ландшафтов и их обширный ареал для оперативной оценки состояния и потоков органического вещества почв в условиях меняющегося климата. Безусловно, необходима постановка дальнейших исследований органического вещества в мерзлотных почвах на глубинах ниже одного метра.

Л и т е р а т у р а

1. Grosse G. Vulnerability of high-latitude soil organic carbon in North America to disturbance / G.Grosse, J.Harden, M.Turetsky // Journal of geophysical research. – 2011. – Vol. 116. – G00K06. – doi: 10. 1029/2010JG001507.
2. Hicks Pries C.E. Holocene carbon stocks and carbon accumulation rates altered in soils undergoing permafrost thaw / C.E Hicks Pries, E.A. Schuur, K.G. Crummer // Ecosystems. – 2012. – Vol. 15. – P. 162–173.
3. Bockheim J.G. Importance of cryoturbation in redistributing organic carbon in permafrost-affected soils // Soil Science Society of America. – 2007. – Vol. 71, № 1. – P. 1335–1342.
4. Kanevskiy M. Cryostratigraphy of late Pleistocene syngenetic permafrost (yedoma) in northern Alaska, Itkillik river exposure / Kanevskiy M., Shur Y., Fortier D. et al. // Quaternary research. – 2011. – Vol. 75. – P. 584–596.
5. Kuhry P. Upscaling soil organic carbon estimates for the Usa Basin (Northeast European Russia) using GIS-based landcover and soil classification schemes / Kuhry P., Mazhitova G.G., Forest P.A. et al. // Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of geography. – 2002. – Vol. 102, № 1. – P. 11–25.
6. Hugelius G. High-resolution mapping of ecosystem carbon storage and potential effects of permafrost thaw in periglacial terrain, European Russian Arctic / Hugelius G. Virtanen T., Kaverin D. et al // Journal of geophysical research. – 2011. – Vol. 116. – G03024. – doi: 10. 1029/2010JG001606.
7. Matsuura Y. Carbon and nitrogen storage of mountain forest tundra soils in central and eastern Siberia / Y.Matsuura, A.P Abaimov, O.A Zyryanova et al. // Proceedings of the fifth symposium on the joint Siberian permafrost studies between Japan and Russia in 1996 / National Institute for Environmental Studies. – Tsukuba, 1997. – P. 95–99.
8. Мергелов Н.С. Процессы накопления органического вещества в минеральной толще мерзлотных почв приморских низменностей Восточной Сибири / Н.С. Мергелов, В.О. Таргульян // Почвоведение. – 2011. – № 3. – С. 275–287.
9. Strauss J. Grain-size properties and organic-carbon stock of yedoma ice complex permafrost from the Kolyma lowland, northeastern Siberia / J.Strauss, L.Schirrmeister, S.Wetterich et al. // Global biogeochemical cycles. – 2012. – Vol. 26 – GB3003. – doi: 10. 1029/2011GB004104.
10. Честных О.В. Запасы органического углерода в почвах тундровых и лесотундровых экосистем / О.В. Честных, Д.Г. Замолотчиков, Д.В. Карелин // Экология. – 1999. – № 6. – С. 426–432.

11. *Tarnocai C.* Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region / C.Tarnocai, J.G. Canadell, E.A. Schuur et al. // *Global biogeochemical cycles*. – 2009. – Vol. 23. – GB2023. – doi: 10.1029/2008GB003327.
12. *Карелин Д.В.* Запасы и продукция углерода в фитомассе тундровых и лесотундровых экосистем России / Д.В. Карелин, Д.Г. Замолотчиков, Т.Г. Гильманов // *Лесоведение*. – 1995. – № 5. – С. 29–36.
13. *Ping C.L.* Carbon stores and biogeochemical properties of soils under black spruce forest Alaska / C.L. Ping, G.J. Michaleson, E.S Kane et al. // *Soil Science Society of America*. – 2010. – Vol. 74. – P. 969–978.
14. *Запасы органического углерода в почвах России* / Д.Г. Щепашенко, Л.В. Мухортова, А.З. Швиденко и др. // *Почвоведение*. – 2013. – № 2. – С. 123–132.
15. *Десяткин Р.В.* Почвообразование в термокарстовых котловинах-аласах криолитозоны. – Новосибирск: Наука, 2008. – 324 с.
16. *Фракционно-групповой состав гумуса почв тундровой зоны Евразии* / Л.А. Фоминых, Б.Н. Золотарева, А.Л. Холодов, Л.Т. Ширшова // *Криосфера Земли*. – 2009. – Т. XIII, № 2. – С. 44–54.
17. *Содержание углерода в мерзлых отложениях Северо-Востока Якутии* / Д.Г. Шмелев, Г.Н. Краев, А.А. Веремеева, Е.М. Ривкина // *Криосфера Земли*. – 2013. – Т. XVII, № 3. – С. 50–59.
18. *Anisimov O.A.* Potential feedback of thawing permafrost to the global climate system through methane emission // *Environ. Res. Lett.* – 2007. – Vol. 2. – P. 7–15.
19. *Соловьев П.А.* Криолитозона северной части Лено-Амгинского междуречья. – М.: Изд-во АН СССР, 1959. – 143 с.
20. *Мерзлотно-ландшафтная карта Якутской АССР.* Масштаб 1:2 500 000 / под общ. ред. П. И. Мельникова. – М.: ГУГК, 1991. – 2 л.
21. *Фёдоров А.Н.* Реакция мерзлотных ландшафтов Центральной Якутии на современные изменения климата и антропогенные воздействия / А.Н. Фёдоров, П.Я. Константинов // *География и природные ресурсы*. – 2009. – № 2. – С. 56–62.
22. *Строение и абсолютная геохронология аласных отложений Центральной Якутии* / Е.М. Катасонов, М.С. Иванов, Г.Г. Пудов и др. – Новосибирск: Наука, 1979. – 95 с.
23. *Почвенно-географическое районирование СССР: в связи с сельскохозяйственным использованием земель*. – М.: 1962. – 422 с.
24. *Вадюнина А.Ф.* Методы исследования физических свойств почв / А.Ф. Вадюнина, З.А. Корчагина. – М.: Агропромиздат, 1986. – 416 с.
25. *Орлов Д.С.* Химия почв. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1985. – 376 с.
26. *Harden J. W.* Field information links permafrost carbon to physical vulnerabilities of thawing / J.W. Harden, C.D. Koven, C.L. Ping et al. // *Geophysical research letters*. – 2012. – Vol. 39. – L15704. – doi: 10.1029/2012GL051958.
27. *Честных О.В.* Общие запасы биологического углерода и азота в почвах лесного фонда России / О.В.Честных, Д.Г. Замолотчиков, А.И. Уткин // *Лесоведение*. – 2004. – № 4. – С. 30–42.
28. *Kuhry P.* Characterisation of the permafrost carbon pool / P.Kuhry, G.Grosse, J.W. Harden et al. // *Permafrost and periglacial processes*. – 2013. – Vol. 24. – P. 146–155.
29. *Schuur E.A.G.* Climate change and the permafrost carbon feedback / E.A.G. Schuur, A.D. McGuire, C.Schadel et al. // *Nature*. – 2015. – Vol. 520. – P. 171–179.
30. *Hugelius G.* Estimated stocks of circumpolar permafrost carbon with quantified uncertainty ranges and identified data gaps / G.Hugelius, J.Strauss, S.Zubrzycki et al. // *Biogeosciences*. – 2014. – Vol. 11. – P. 6573–6593.
31. *Козловская Л.С.* Динамика органического вещества в процессе торфообразования / Л.С. Козловская, В.М. Медведева, Н.И. Пьявченко. – Л.: Изд-во Наука, 1978. – 176 с.

Поступила в редакцию 20.02.2016