Криосфера Земли, 2013, т. XVII, № 3, с. 50–59 **http://www.izdatgeo.ru**

УДК 551.340(511)

СОДЕРЖАНИЕ УГЛЕРОДА В МЕРЗЛЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ СЕВЕРО-ВОСТОКА ЯКУТИИ

Д.Г. Шмелев[1,2], Г.Н. Краев[3,4], А.А. Веремеева[1], Е.М. Ривкина[1]

[1]*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, 142290, Московская обл., Пущино, ул. Институтская, 2, Россия; averemeeva@gmail.com*
[2]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический ф-т, 119992, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; shmelevdenis_msu@mail.ru*
[3]*Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32, Россия; kraevg@gmail.ru*
[4]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, биологический ф-т, 119234, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 12, Россия*

С использованием карты четвертичных отложений и базы данных лаборатории криологии почв ИФХиБПП РАН по содержанию углерода, влажности и плотности в многолетнемерзлых отложениях разного возраста и генезиса проведена оценка объемов общего углерода в основных геологических телах – горизонтах осадочных отложений Колымо-Индигирской низменности. Содержание углерода оценено в толще мощностью 25 м. Установлено, что содержание углерода в отложениях ледового комплекса верхнего неоплейстоцена (едомного надгоризонта) меньше, чем ранее предполагалось. Впервые публикуемые данные меняют существовавшие прежде представления о запасах углерода в многолетнемерзлых отложениях Арктики.

Запасы общего углерода, Колымо-Индигирская низменность, многолетнемерзлые отложения, едомный надгоризонт

CARBON POOL OF PERMAFROST IN NORTH-EASTERN YAKUTIA

D.G. Shmelev[1,2], G.N. Kraev[3,4], A.A. Veremeeva[1], E.M. Rivkina[1]

[1]*Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science, RAS, 142290, Moscow reg., Puschino, Institutskaya st., 2, Russia; averemeeva@gmail.com*
[2]*Lomonosov Moscow State University, Department of Geography, 119992, Moscow, Leninskie Gory, 1/12, Russia; shmelevdenis_msu@mail.ru*
[3]*Center of Ecology and Productivity of Forests, RAS, 117997, Moscow, Profsouznaya st., 84/32, Russia; kraevg@gmail.ru*
[4]*Lomonosov Moscow State University, Department of Biology, 119234, Moscow, Leninskie Gory, 1/12, Russia*

The volumes and carbon storages of the main regional Quaternary formations at Kolyma-Indigirka lowland have been estimated by using the State Geological map of Quaternary Deposits and database of Laboratory of Soil Cryology on carbon concentration, density and moisture in permafrost deposits of different age and genesis. Total carbon storages for the upper 25 m have been presented. The total carbon pool of the upper Neopleistocene Ice Complex (yedoma subhorizont) has been found to be lower than it had been thought previously. The pioneer data change the concept of carbon storage in Arctic permafrost.

Carbon storage, Kolyma-Indigirka lowland, permafrost, yedoma subhorizont

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдаемое в последнее время увеличение среднегодовой температуры в Арктике составляет около 0,1 °С за десятилетие, что почти в 2 раза опережает потепление в остальных регионах Земли [*IPCC, 2001; ACIA, 2005*]. Этот процесс находит отражение в изменении арктических экосистем, в том числе в состоянии многолетнемерзлых пород [*Serreze et al., 2000; Callaghan et al., 2011*]. Наблюдается увеличение толщины деятельного слоя [*CALM Site, 2012*], повышение температуры и сокращение распространения и слитности мерзлых толщ [*Romanovsky et al., 2010*], активизация термокарста в некоторых регионах [*Grosse et al., 2011*] и разрушение льдистых берегов [*Стрелецкая и др., 2006; Разумов, Григорьев, 2011*].

Почвы и подстилающие их мерзлые отложения являются резервуаром законсервированного углерода. Его накопление происходило на протяжении геологически длительного времени. В четвертичное время в Арктике на участках, свободных от ледникового покрова и морских бассейнов, господствовали тундры, степи и бореальные леса. Почвы этих экосистем и в настоящее время характеризуются значительными объемами накопленного углерода [*Фоминых и др., 2009; Chestnykh et al., 1999*]. Углерод, захороненный в мерзлых отло-

© Д.Г. Шмелев, Г.Н. Краев, А.А. Веремеева, Е.М. Ривкина, 2013

жениях, представлен частицами торфа, гумусовыми соединениями, а также в виде растворенного органического вещества. Необходимо иметь в виду, что некоторая часть общего углерода представлена карбонатами. При деградации многолетнемерзлых толщ ископаемый углерод поступает в экосистемы и может участвовать в процессах образования парниковые газов [*Anisimov et al., 2007; IPCC, 2007; Walter et al., 2007; Tarnocai et al., 2009*]. На значимость для бюджета парниковых газов углерода, поступающего из деградирующей мерзлоты, указывают многие исследователи [*Zimov et al., 2006a,b; Tarnocai et al., 2007, 2009; Walter et al., 2007; Schuur et al., 2008; Shakhova et al., 2010; Grosse et al., 2011*]. Эти работы касаются распределения углерода в вечной мерзлоте отдельных регионов. История формирования мерзлых толщ на различных территориях отражается на качественном составе отложений и количестве законсервированного в них углерода, что необходимо учитывать для детализации существующих баз данных при прогнозировании последствий влияния деградации мерзлоты на климат. Одной из таких инициатив явилось создание координационной сети по исследованию углерода в Арктике [*Schuur et al., 2008*]. Этот проект нацелен на расширение циркумполярной базы данных по содержанию углерода в почвах [*Tarnocai et al., 2009; NCSCD Site, 2012*] с привлечением сведений об углероде, залегающем в мерзлых породах на глубинах более 1 м.

Значительным объемом такой информации по обширному району Российского сектора Арктики – Колымо-Индигирской низменности – располагает Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения (ИФХ и БПП) РАН. В настоящей работе приведено описание имеющейся базы данных по углероду в мерзлых отложениях Приморских низменностей, используется авторский подход к оценке содержания углерода, законсервированного в горизонтах мерзлых пород, выведенных из активного биохимического круговорота. Особое внимание уделено отложениям ледового комплекса (ЛК) едомного надгоризонта, основные стратотипические разрезы которого расположены на рассматриваемой территории.

РАЙОН И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Район исследований. Рассматриваемая территория является прибрежной аккумулятивной равниной, расположенной между бассейнами низовьев рек Колыма и Алазея. На протяжении позднего кайнозоя территория испытывала общее опускание, что обусловило накопление мощной толщи рыхлых четвертичных отложений. При этом на протяжении неоплейстоцена территория не подвергалась оледенениям и лишь в устьевых частях современных рек происходили трансгрессии морского бассейна. Формирование мерзлых толщ началось в конце неогена, что подтверждается соответствующими признаками наличия криотурбаций, подземных льдов, грунтовых жил и псевдоморфоз в различных горизонтах. Современный рельеф сформирован озерно-аллювиальными отложениями ЛК верхнего неоплейстоцена. Едомный надгоризонт накапливался в условиях уникальных криоаридных тундростепных ландшафтов, которые отличались высокой биопродуктивностью и разнообразием [*Каплина, 1981; Sher, 1991; Sher et al., 2003*]. Осадконакопление в холодные периоды позднего неоплейстоцена в таких условиях привело к формированию специфических криолитогенных толщ с мощным подземным оледенением [*Васильчук, 1992; Konishchev, Rogov, 1993*]. Аналоги этих толщ можно обнаружить и в других районах Арктики [*Kanevskiy et al., 2011*]. В современном устье Колымы накапливались дельтовые пылеватые пески, ныне слагающие аккумулятивную дельтовую равнину. В начале голоценового времени наблюдалась высокая активность термокарстовых процессов [*Каплина, Ложкин, 1979; Каплина, 2011; Walter et al., 2007*], которые перерабатывали отложения ЛК. Оттаивание повторно-жильных льдов привело к образованию термокарстовых озерных котловин, которые на определенных участках сливались в эрозионно-термокарстовые аласные равнины. Изменение базиса эрозии в голоцене и дифференцированные неотектонические движения привели к врезанию гидрологической сети и формированию обширных речных долин. Многолетнемерзлые породы распространены повсеместно, имеют слитный профиль и достигают толщины 500–600 м. Температура мерзлоты –7...–11 °С [*Архангелов и др., 1989*]. Наблюдается тренд к увеличению температуры многолетнемерзлых пород на едомных водоразделах 0,05 °С/год за 1979–2009 гг. [*Romanovsky et al., 2010; Kholodov et al., 2012*]. Глубина сезонного оттаивания на водоразделах составляет 40–70 см в зависимости главным образом от ландшафтных условий. Основную площадь территории занимают кустарниковые тундры, при этом в северной части доминируют травянистые арктические тундры, а в южной части присутствуют лиственничные редины.

Исследования вещественного состава отложений. Подробные исследования стратиграфии и свойств рыхлых отложений этого района начались в 1970-х гг. северной экспедицией МГУ и палеоэкологической экспедицией “Берингия” ИФХиБПП РАН. Целью экспедиций было исследование рыхлых отложений, слагающих территорию, как в видимой части разреза – вблизи хорошо описанных обнажений [*Шер, 1971; Архангелов, 1977; Tomirdiaro, 1982; Kaplina, Lozhkin, 1984*], так и залегающих ниже уреза гидросети.

С 1977 г. ведутся работы по продолжению опорных разрезов, предполагающие бурение скважин под урез рек. К настоящему времени на Приморских низменностях, от устья р. Лена до низовьев р. Колыма, пробурено более 100 скважин глубиной до 50 м. Это позволило охарактеризовать состав и свойства пород этого региона. Было обработано более 1000 образцов, по которым получены данные о криогенном строении, гранулометрическом составе, составе водорастворимых солей, содержании углерода и парниковых газов.

Методика отбора образцов и определения содержания углерода в отложениях. Оценка содержания углерода в отложениях Колымской низменности проведена на основе исследований образцов из керна погонной длиной более 2000 м, отобранного при бурении 80 скважин на 11 ключевых участках (рис. 1).

Отбор образцов производили колонковым бурением установкой УКБ 12/25 диаметрами 150, 120 и 100 мм. Образцы отбирали в мерзлом состоянии, что защитило их от загрязнения более молодым углеродом. Общее содержание углерода измеряли в воздушно-сухих образцах, пропущенных через сито 1 мм. Подготовленную навеску грунта (массой около 1 г) помещали в анализатор АН-7529У (Гомельское ПО “Измеритель”, Белоруссия), определяющий содержание углерода по принципу автоматического титрования по pH продуктов сухого сжигания при температуре 1100 °С. Для каждого образца выполняли три определения, после чего брали среднее значение содержания углерода.

Образцы для определения влажности (90 образцов) и объемного веса (285 образцов) отобраны из других участков керна. Определение влажности производили по разнице массы образца сразу после отбора из керна и после высушивания в сушильном шкафу при 105 °С в течение 6 ч. Объемный вес определяли путем измерения приращения объема и массы концентрированного соляного раствора в градуированном цилиндрическом сосуде емкостью 150 мл [*Ломтадзе, 1984*].

Расчет общих запасов органического вещества во вмещающих отложениях проводили по формулам, аналогичным применяемым Ч. Тарнокаем с соавт. [*Tarnocai et al., 2009*]:

$$C_{общ} = C_{уд} V_{отл}; \quad (1)$$

$$C_{уд} = C_{ср}(1 - W_{пор})\rho_{отл}; \quad (2)$$

$$V_{отл} = h_{отл} S_{отл}, \quad (3)$$

где $C_{общ}$ – общие запасы углерода в отложениях; $C_{уд}$ – удельное содержание углерода в единице массы породы; $C_{ср}$ – среднее содержание углерода в отложениях горизонта; $W_{пор}$ – влажность породы;

Рис. 1. Район исследований [*GIS..., 2012*].

Места отбора образцов: 1 – Зеленый Мыс, 2 – устье р. Мал. Анюй, 3 – Дуванный Яр, 4 – протока Стадухинская, 5 – Халлерчинская тундра, 6 – мыс Мал. Чукочий, 7 – оз. Якутское, 8 – р. Мал. Коньковая, 9 – р. Бол. Чукочья, 10 – р. Алазея, 11 – р. Бол. Хомус-Юрях.

$\rho_{отл}$ – плотность отложений данного стратиграфического подразделения; $V_{отл}$ – объем отложений; $h_{отл}$ – средняя мощность отложений горизонта; $S_{отл}$ – площадь распространения отложений горизонта.

Для каждой группы отложений была рассчитана стандартная ошибка среднего, которая позволила оценить точность полученных значений абсолютных запасов углерода в мерзлых отложениях. Расчет стандартной ошибки выполняли с доверительным интервалом 0,95. Полученные значения были подставлены в формулы (1)–(3), после чего найден доверительный интервал общих запасов углерода.

Оценка распространения вмещающих отложений. Оценка содержания общего углерода в многолетнемерзлых породах Колымской низменности проведена по карте четвертичных отложе-

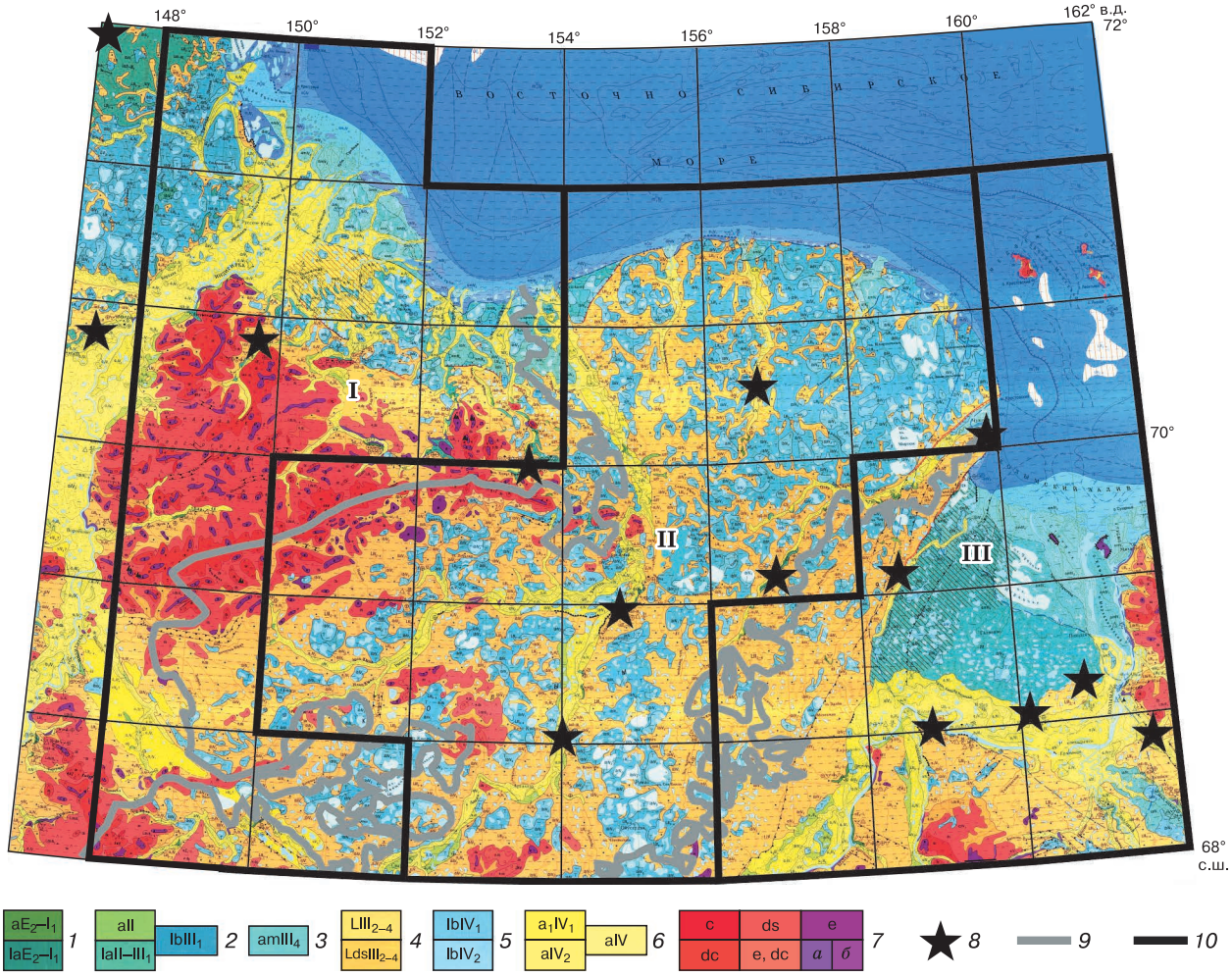

Рис. 2. Участки исследований и схема деления на регионы [*Решения…, 1987*] на листе карты четвертичных отложений [*Государственная… карта…, 2000а*].

1 – олерский надгоризонт ($aE_2–I_1$ – аллювиальные отложения неогена–эоплейстоцена, $laE_2–I_1$ – озерно-аллювиальные отложения неогена–эоплейстоцена); *2* – керемеситский надгоризонт (all – аллювиальные отложения, $lbIII_1$ – озерно-болотные отложения среднего–верхнего неоплейстоцена, $laII–III_1$ – озерно-аллювиальные отложения среднего–верхнего неоплейстоцена); *3* – халлерчинские пески; *4* – едомный надгоризонт ($LIII_{2–4}$ – озерно-аллювиальные отложения среднего–верхнего неоплейстоцена, $LdsIII_{2–4}$ – делювиально-солифлюкционные отложения среднего–верхнего неоплейстоцена); *5* – аласный комплекс ($lbIV_1$ – озерно-болотные отложения раннего голоцена, $lbIV_2$ – озерно-болотные отложения позднего голоцена); *6* – аллювиальные отложения (a_1IV_1 – аллювий раннего голоцена, aIV_2 – аллювий среднего голоцена, aIV – аллювий позднего голоцена); 7 – кристаллические породы и связанные с ними делювиальные и коллювиальные шлейфы (c – коллювиальные накопления; ds – делювиально-солифлюкционные отложения; dc – делювиально-коллювиальные накопления; e, dc – нерасчлененные элювиальные и делювиально-коллювиальные отложения; e – элювиальные отложения; *а*, *б* – дочетвертичные породы, местами с коллювием: *а* – докайнозойским, *б* – палеогена и неогена); *8* – участки проведения работ; *9* – естественные границы регионов (по бассейнам рек Алазея и Бол. Чукочья); *10* – границы регионов, принятые в расчетах (**I** – восток Яно-Индигирской низменности, **II** – бассейны рек Бол. Чукочья и Алазея, **III** – восточная окраина Колымской низменности).

ний масштаба 1:1 000 000 и пояснительной записке к ней [*Государственная... карта..., 2000а,б*] (рис. 2). Карта отражает 39 различных типов отложений на суше. Из них на основе пояснительной записки к карте и решений Межведомственного стратиграфического комитета (МСК) 1982 г. [*Решения..., 1987*] было выделено 10 стратиграфических подразделений. В аласный комплекс (АК) были объединены разновозрастные отложения, отнесенные по карте к озерно-болотным отложениям раннего и позднего голоцена. Лессовидные озерно-аллювиальные и лессовидные делювиально-солифлюкционные отложения, отвечающие различным фациям полигенетического ЛК, были объединены. Надпойменная терраса при расчетах рассматривалась в составе речного аллювия долин рек из-за сходства генезиса. Объединены также контуры трех фаций аллювия, соответствующих раннему, среднему и верхнему голоцену. Выходы скальных и дочетвертичных грубообломочных пород, а также коллювиальные, делювиальные и пролювиальные шлейфы, связанные с этими выходами, объединены в один контур. Аллювиально-морские отложения верхнего неоплейстоцена объединены с голоценовыми на основании генетического сходства. Содержание углерода в скальных породах и связанных с ними склоновых отложениях не учтено в расчетах, так как предполагается, что оно невысокое. Из-за отсутствия обоснованных данных в расчетах не учитывали морские террасы голоцена, эоловые отложения верхнего неоплейстоцена в долине р. Шангина и акватория моря. Общая площадь неучтенных территорий не превышала 2 %.

Согласно карте (см. рис. 2), четвертичные отложения древнее позднего неоплейстоцена в береговых обрывах рек, озер и моря, занимают 1 % территории при общей протяженности обрывов порядка 1400 км. Данная площадь не учтена в оценке запасов, поскольку эти отложения практически повсеместно перекрыты чехлом более молодых отложений. Площадь распространения более древних горизонтов экстраполирована на территорию, характеризующуюся одинаковым строением разреза и морфологического уровня. Согласно решениям МСК [*Решения..., 1987*], территория низменности по характеру строения разреза была разделена на три региона: I – восток Яно-Индигирской низменности; II – бассейны рек Большая Чукочья и Алазея; III – восточная окраина Колымской низменности. Для каждого района характерен определенный набор стратиграфических подразделений на разных геоморфологических уровнях. При проведении оценки учитывали максимальную мощность отложений, указанную в [*Решения..., 1987*]. В регионе III в основании разреза А.В. Шером [*1971*] были зафиксированы отложения бегуновской свиты миоценового возраста, которые не отражены на карте четвертичных отложений. Поскольку в разрезе они наблюдались, мы приняли, что эти отложения распространены повсеместно.

Для того чтобы оценка была репрезентативной для данной территории и сравнима с результатами других исследователей, мы рассматриваем запасы углерода в отложениях на глубине до 25 м.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Содержание углерода, плотность и влажность отложений. Наибольшее содержание углерода характерно для отложений покровного слоя, где за счет почвенных горизонтов оно может достигать 10–15 % (табл. 1). Высокие значения приурочены к отложениям АК и ЛК – 1,7 и 1,5 % соответственно. В аласных отложениях повышенное содержание углерода приурочено к озерно-болотным отложениям, слагающим верхнюю часть толщи [*Холодов и др., 2003*], а в разрезе ЛК – к погребенным и почвенным горизонтам.

При сравнении разных генетических групп отложений можно отметить, что содержание углерода в синкриогенных отложениях значительно больше (1,4 %), чем в эпикриогенных (1,0 %). Минимальное содержание характерно для морских и аллювиально-морских отложений (халлерчинская свита) – 0,9 %, максимальное – для таберированных и таберальных отложений покровного слоя и АК – 1,9 %. Содержание углерода в аллювиальных, озерно-аллювиальных и полигенетических отложениях – 1,1, 1,3 и 1,5 % соответственно.

Распространение мерзлых отложений. Наиболее распространены отложения ЛК верхнего неоплейстоцена (36 % территории), меньшую площадь (24 %) занимают озерно-болотные (аласные) отложения голоцена. Долинные комплексы рек, состоящие из нескольких уровней пойм, а также надпойменные террасы верхнего неоплейстоцена занимают 15 % территории. Около 7 % площади занимает аллювиально-морская равнина верхнего неоплейстоцена в низовьях Колымы и аллювиально-морские отложения голоцена в приустьевых частях крупных рек.

Таким образом, на поверхности наиболее широко (75 %) распространены отложения верхнего неоплейстоцена и голоцена. Они слагают четыре основных морфологических уровня в рельефе Приморских низменностей.

Общие запасы углерода на территории Приморских низменностей Якутии. В верхних 25 метрах разреза сосредоточено примерно $(16{,}0 \pm 0{,}3)\cdot 10^{15}$ г углерода. Среднее содержание по площади составляет 108 кг/м^2. На территории Колымской низменности в верхних 25 метрах разреза рыхлых отложений основным коллектором углерода является олерский надгоризонт $(3{,}5 \pm 0{,}1)\cdot 10^{15}$ г (табл. 2). Значительные запасы

Таблица 1. **Содержание углерода, плотность и влажность мерзлых отложений Колымо-Индигирской низменности**

Свита	Общее содержание углерода, %			Плотность, г/см^3	Влажность, %	Характеристика	Кол-во образцов
	сред.	макс.	мин.				
Голоценовый аллювий	1,2 ± 0,1	4,9	0,2	1,7 ± 0,1	0,6 ± 0,1	Аллювиальные отложения голоцена	80
Покровный слой	2,2 ± 0,7	16,8	0,3	1,5 ± 0,1	0,8 ± 0,1	Отложения ЛК, таберированные в голоцене	25
Аласный комплекс	1,7 ± 0,3	12,5	0,1	1,7 ± 0,1	0,8 ± 0,1	Полигенетические оторфованные алевриты АК голоцена	50
Ледовый компплекс	1,5 ± 0,1	20,1	0,2	1,6 ± 0,1	0,9 ± 0,1	Синкриогенные лессовидные отложения ЛК верхнего неоплейстоцена	260
Халлерчинская свита	1,0 ± 0,2	5,4	0,0	1,7 ± 0,1	0,3 ± 0,1	Синкриогенные дельтовые пески верхнего неоплейстоцена	30
Маастахская свита	1,1 ± 0,2	4,5	0,2	1,7 ± 0,1	0,9 ± 0,1	Синкриогенные аллювиальные пески среднего неоплестоцена	30
Керемеситский надгоризонт	1,3 ± 0,1	3,3	0,2	1,7 ± 0,1	0,9 ± 0,1	Син- и эпикриогенные аллювиальные и озерно-аллювиальные алевриты среднего неоплейстоцена	50
Олерский надгоризонт	1,4 ± 0,1	23,0	0,0	1,9 ± 0,1	0,6 ± 0,1	Эпикриогенные озерно-аллювиальные и аллювиальные алевриты и пески верхнего эоплейстоцена–нижнего неоплейстоцена	280
Бегуновская свита	1,3 ± 0,1	2,6	0,0	1,7 ± 0,1	0,3 ± 0,1	Эпикриогенные аллювиальные галечники первой–второй ступени плиоцена	5

Примечание. Указано значение ± стандартная ошибка.

Таблица 2. **Содержание углерода (*C*) в верхних 25 метрах мерзлых отложений Колымо-Индигирской низменности**

Разрез	*C*, %	Толщина горизонта, м				Масса углерода ± станд. ошибка, 10^{12} г
		Озерно-аллювиальная равнина верхнего неоплейстоцена	Аласы	Долины рек	Аллювиально-морские равнины	
Восток Яно-Индигирской низменности						
Площадь, 10^6 м^2		7124,4	5848,8	10 162	2592	
Голоценовый аллювий	0,57	–	–	6	–	236,0 ± 10,3
Покровный слой	1,01	2	–	–	–	48,9 ± 10,1
Аласный комплекс	0,89	–	5	–	–	88,5 ± 9,7
Ледовый комплекс	1,40	23	1	–	–	404,0 ± 28,9
Керемеситский надгоризонт	1,40	–	19	6	–	409,6 ± 41,3
Олерский надгоризонт	1,30	–	–	13	–	1167,8 ± 22,4
Бассейн рек Бол. Чукочья и Алазея						
Площадь, 10^6 м^2		44 229	29 176	7404	687,9	
Голоценовый аллювий	1,91	–	–	6	–	577,0 ± 7,6
Покровный слой	2,16	2	–	–	–	649,6 ± 62,8
Аласный комплекс	1,45	–	9	–	–	1294,5 ± 86,6
Ледовый комплекс	1,52	15	3	–	–	1940,5 ± 127,7
Керемеситский надгоризонт	1,00	8	13	–	–	1246,3 ± 176,0
Олерский надгоризонт	1,40	–	–	19	–	1339,4 ± 23,9
Восточная окраина Колымской низменности						
Площадь, 10^6 м^2		13 906	7246,6	9731	10 140	
Голоценовый аллювий	1,19	–	–	24	–	1889,8 ± 39,7
Покровный слой	0,89	4	–	–	–	167,9 ± 39,5
Аласный комплекс	1,67	–	15	–	–	617,2 ± 35,9
Ледовый комплекс	1,61	21	–	–	–	799,3 ± 49,7
Халлерчинская свита	0,99	–	–	–	16	1911,3 ± 38,9
Керемеситский надгоризонт	1,06	–	10	–	–	130,6 ± 17,4
Олерский надгоризонт	1,55	–	–	–	9	961,9 ± 15,5
Бегуновская свита	1,29	–	–	1	–	150,5 ± 1,7

Примечание. Общее содержание углерода составляет (16 030,8 ± 269,3)·10^{12} г.

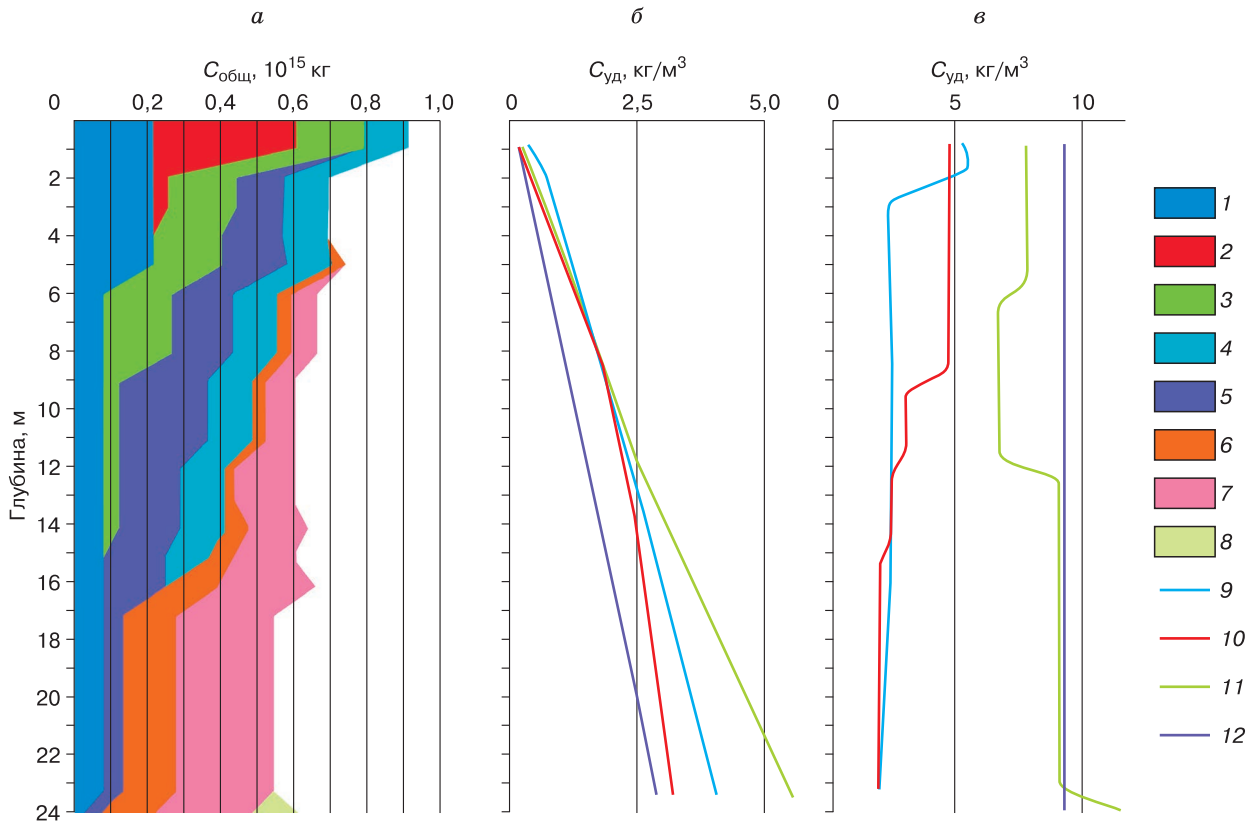

Рис. 3. Запасы и распределение общего углерода ($C_{общ}$) в верхних 25 метрах мерзлых отложений Колымской низменности на площади порядка 150 тыс. км^2.

а – влияние распределения стратиграфических объектов на распределение запасов по глубине; *б* – кумулятивные массы в толще многолетнемерзлых пород для основных геоморфологических объектов; *в* – изменение удельного содержания углерода ($C_{уд}$) для основных геоморфологических уровней по глубине; *1* – современный аллювий; *2* – покровный слой; *3* – аласные отложения; *4* – халлерчинская свита; *5* – ледовый комплекс; *6* – керемеситский надгоризонт; *7* – олерский надгоризонт; *8* – бегуновская свита; *9* – озерно-аллювиальные равнины; *10* – аласы; *11* – долины рек; *12* – аллювиально-морские равнины.

углерода сосредоточены также в отложениях едомного надгоризонта ($(3{,}2 \pm 0{,}2)\cdot10^{15}$ г) и современного аллювия ($(2{,}7 \pm 0{,}1)\cdot10^{15}$ г).

Анализ распределения углерода по глубине показал, что в 5 м разреза более 60 % запасов углерода сосредоточено в покровном слое и современном аллювии. Ниже 5 м значительные запасы углерода приурочены к отложениям ЛК и олерского надгоризонта. На глубине 10–12 м примерно 40 % запасов сосредоточено в отложениях ЛК, а глубже 15 м около 50 % углерода законсервировано в олерском горизонте. Роль остальных стратиграфических подразделений в распределении углерода в разрезе не превышает 30 % (рис. 3, *а*).

Ход кривой кумулятивных запасов углерода показывает, что основные запасы сосредоточены в долинах рек. Хотя древние озерно-аллювиальные поверхности верхнего неоплейстоцена наиболее распространены (44 % от всей площади), удельное содержание углерода здесь минимальное (см. рис. 3, *б*). В то же время долины рек (около 22 % территории) характеризуются максимальными значениями удельного содержания углерода, как и аллювиально-морские равнины, занимающие 7 % площади.

Из трех типов разрезов рыхлых отложений Колымо-Индигирской низменности максимальные запасы углерода сосредоточены в разрезе бассейна рек Алазея и Большая Чукочья – $(7{,}1 \pm 0{,}2)\cdot10^{15}$ г, максимальное удельное содержание углерода характерно для Колымской низменности – 161 кг/м^2. Минимальные запасы сосредоточены на востоке Яно-Индигирской низменности – $(2{,}3 \pm 0{,}1)\cdot10^{15}$ г при содержании 91 кг/м^2.

В верхнем метре разреза рыхлых отложений сосредоточено $(0{,}90 \pm 0{,}05)\cdot10^{15}$ г углерода, в верхних 2 метрах – $(1{,}70 \pm 0{,}06)\cdot10^{15}$ г, в верхних 3 метрах – $(2{,}40 \pm 0{,}07)\cdot10^{15}$ г, что составляет соответственно 6, 11 и 15 % от всех запасов, законсервированных в верхних 25 метрах.

Таблица 3. **Сравнительная оценка запасов углерода в многолетнемерзлых отложениях в различных регионах**

Регион	Площадь, 10^3 км^2	Оцениваемые отложения	Сред. содержание углерода, кг/м^2	Запасы углерода в отложениях, 10^{15} г				Источник сведений
				0–100 см	0–300 см	подстилающие	Общие запасы	
Российская Арктика	2790	Почвы	10,2 ± 3,2	28	–	–	28	[*Chestnykh et al., 1999*]
Якутия	1000	Едомный надгоризонт	450	–	–	450*	450	[*Zimov et al., 2006a*]
Криолитозона Северной Америки	88 000	Почвы	21,8	1650	3870	–	3870	[*Tarnocai et al., 2007; Ping et al., 2008*]
Северная циркумполярная область	18 782	Почвы и подстилающие отложения	32,2–69,6	4958	1024	407/241**	1672	[*Tarnocai et al., 2009*]
Якутия	148,247	Четвертичные рыхлые отложения	108	0,00090 ± 0,00005	2,40 ± 0,07	16,0 ± 0,3***	16,0 ± 0,3	*Настоящая работа*

* Для толщи 0–25 м.
** Числитель – для едомы Якутии, знаменатель – для дельтовых отложений.
*** Для верхних (0–25 м) рыхлых отложений.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В последнее время выполнено большое количество работ по изучению бюджета углерода в Арктике. Опубликовано много оценок запасов углерода в почвах и подстилающих отложениях [*Chesthykh et al., 1999; Zimov et al., 2006a,b; Tarnocai et al., 2007; Ping et al., 2008; Tarnocai et al., 2009*].

Существует большое количество оценок запасов углерода в Арктике. Общие запасы оцениваются примерно в $1400 \cdot 10^{15}$–$1850 \cdot 10^{15}$ г, или 50 % от всего углерода, законсервированного в почвах и подстилающих отложениях [*Tarnocai et al., 2009; Grosse et al., 2011*]. Основные запасы приурочены к почвам, по различным данным, в них может содержаться до 80 % всего углерода, в подстилающих породах содержание оценивается в $648 \cdot 10^{15}$ г [*Tarnocai et al., 2009*]. Существует большое количество региональных оценок запасов. Так, запасы углерода в почвах (0–300 см) криолитозоны Северной Америки оцениваются в $3870 \cdot 10^{15}$ г [*Tarnocai et al., 2007; Ping et al., 2008*], а в Российской Арктике в почвенном профиле тундр и лесотундр (0–100 см) содержится только $28 \cdot 10^{15}$ г углерода [*Chestnykh et al., 1999*]. Результаты этих исследований приведены в табл. 3.

Едомные отложения ЛК, широко распространенные на северо-востоке Евразии и на Аляске, принято считать одним из основных резервуаров углерода. Среднее содержание углерода в этих отложениях 1–5 %, или 10–26 кг на 1 м^3 породы [*Schirrmeister et al., 2002; Zimov et al., 2006a*]. Запасы углерода в едомных отложений на северо-востоке России оцениваются в $450 \cdot 10^{15}$ г [*Zimov et al., 2006b*]. Эти расчеты выполнены для территории площадью 1 млн км^2 при мощности отложений 25 м и среднем содержании углерода в породе 2,6 %. Полученные авторами результаты позволяют утверждать, что запасы завышены примерно в 4 раза (450 кг/м^2 против 108 кг/м^2). Это связано с тем, что С.А. Зимов с соавторами используют для расчетов завышенные значения содержания углерода в отложениях (2,4 % по сравнению с 1,5 %) и заниженные данные по влажности пород (0,5 %). Расчет был выполнен для однородной толщи без учета строения разреза рыхлых отложений региона.

Рядом авторов были выполнены оценки содержания углерода в дельтовых отложениях. Для семи крупнейших дельт Арктики (Юкон, Колвилл, Маккензи, Лена, Печора, Обь, Колыма) общие запасы оцениваются в $241 \cdot 10^{15}$ г, в том числе для дельты Колымы площадью 3000 км^2 – в 10^{15} г [*Tarnocai et al., 2009*]. Для востока Колымской низменности для долин рек общей площадью 9700 км^2 были получены запасы углерода в $2{,}05 \cdot 10^{15}$ г. Мы полагаем, что дельтовые речные отложения, учитываемые некоторыми исследователями [*Tarnocai et al., 2009*], генетически и геоморфологически могут быть включены в состав современных речных долин. Поэтому мы можем сравнивать данные, полученные этими авторами, с нашими оценками, из сравнения следует, что содержание углерода также переоценено ими в 1,5 раза (335 кг/м^2 против 214 кг/м^2).

Исходя из наших оценок, наибольшими запасами углерода на территории Приморских низменностей характеризуется не ледовый комплекс едомного надгоризонта [*Zimov*

et al., 2006b], а олерские отложения. Несмотря на то что относительное содержание углерода в едомных отложениях больше (1,5 % против 1,4 %), они занимают меньшую площадь и имеют большую влажность, чем отложения олера, в результате чего удельное содержание углерода в олерских отложениях (11 кг/м^3) почти в 3 раза больше, чем в отложениях ЛК (3 кг/м^3).

Полученные нами значения запасов углерода не включают данные о его содержании в современных почвах, которое учитывается многими авторами [*Chestnykh et al., 1999; Tarnocai et al., 2009; McGuire et al., 2010*] и важно для представления об общем запасе углерода. Вместе с тем почвы находятся в зоне современной биохимической активности и не зависят существенно от процессов деградации многолетнемерзлых пород.

ВЫВОДЫ

Содержание углерода в мерзлых отложениях Приморских низменностей Якутии колеблется от 0,6 до 2,1 %, удельное содержание может достигать 15 кг/м^3. Общие запасы углерода в верхних 25 метрах на этой территории оценивается в $(16{,}0 \pm 0{,}3)\cdot10^{15}$ г.

На территории Приморских низменностей Якутии основным коллектором углерода в верхних 25 метрах является олерский надгоризонт ($(3{,}4 \pm 0{,}2)\cdot10^{15}$ г). Значительные запасы углерода сосредоточены в отложениях едомного надгоризонта ($(3{,}2 \pm 0{,}2)\cdot10^{15}$ г) и современного аллювия ($(2{,}2 \pm 0{,}1)\cdot10^{15}$ г).

Авторами установлено, что запасы углерода в ЛК в 2–4 раза меньше, чем было принято считать. Завышенная оценка была связана с малой фактической базой данных о содержании углерода, плотности и льдистости отложений.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 12-05-31125, 12-05-01085).

Литература

Архангелов А.А. Подземное оледенение севера Колымской низменности // Проблемы криолитологии: Сб. статей. М., Изд-во Моск. ун-та, 1977, вып. VI, с. 26–58.

Архангелов А.А., Конищев В.Н., Розенбаум Г.Э. Приморско-Новосибирский район // Региональная геокриология: учеб. пособие. М., Изд-во Моск. ун-та, 1989, с. 128–151.

Васильчук Ю.К. Изотопно-кислородный состав подземных льдов (опыт палеогеокриологических реконструкций): В 2 т. / Ю.К. Васильчук. М., ОТП РАН; МГУ; ПНИИИС, 1992, т. 1, 420 с.; т. 2, 264 с.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. Карта четвертичных образований. М-б 1:1 000 000. Лист R-(55)-57 (Нижнеколымск). СПб., ВСЕГЕИ, 2000а.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. Карта четвертичных образований. М-б 1:1 000 000. Лист R-(55)-57 (Нижнеколымск). Объяснит. зап. СПб., ВСЕГЕИ, 2000б.

Каплина Т.Н. История мерзлых толщ Северной Якутии в позднем кайнозое // История развития многолетнемерзлых пород Евразии на примере отдельных регионов. М., Наука, 1981, с. 153–181.

Каплина Т.Н. Древние аласные комплексы Северной Якутии (Сообщение 1) // Криосфера Земли, 2011, т. XV, № 2, с. 3–13.

Каплина Т.Н., Ложкин А.В. Возраст аласных отложений Приморской низменности Якутии // Изв. АН СССР. Сер. геол., 1979, № 2, с. 69–76.

Ломтадзе В.Д. Инженерная геология / В.Д. Ломтадзе. Л., Недра, 1984, 511 с.

Разумов С.О., Григорьев М.Н. Береговые криогенные процессы как фактор дестабилизации углекисло-карбонатного равновесия в морях Восточной Сибири // Криосфера Земли, 2012, т. XV, № 4, с. 75–79.

Решения Межведомственного стратиграфического совещания по четвертичной системе Востока СССР. Объяснит. зап. к региональным стратиграфическим схемам четвертичных отложений Востока СССР. Магадан, СВКНИИ ДВО АН СССР, 1987, 241 с.

Стрелецкая И.Д., Васильев А.А., Каневский М.З. и др. Органический углерод в четвертичных отложениях побережья Карского моря // Криосфера Земли, 2006, т. X, № 4, с. 35–43.

Фоминых Л.А., Золотарева Б.Н., Холодов А.Л., Ширшова Л.Т. Фракционно-групповой состав гумуса почв тундровой зоны Евразии // Криосфера Земли, 2009, т. XIII, № 2, с. 44–54.

Холодов А.Л., Ривкина Е.М., Гиличинский Д.А. и др. Оценка количества органического вещества, поступающего в арктический бассейн при термоабразии побережья морей Лаптевых и Восточно-Сибирского // Криосфера Земли, 2003, т. VII, № 3, с. 3–12.

Шер А.В. Млекопитающие и стратиграфия плейстоцена Крайнего Северо-Востока СССР и Северной Америки / А.В. Шер. М., Наука, 1971, 310 с.

ACIA. Arctic Climate Impact Assessment. Cambridge, UK, Cambridge Univ. Press, 2005, 1042 p.

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.

Callaghan T.V., Tweedie C.E., Akerman J. et al. Multi-decadal changes in tundra environments and ecosystems: synthesis of the International Polar Year – Back to the Future Project (IPY–BTF) // AMBIO, 2011, vol. 40, p. 705–716.

CALM Site 2012. URL: http://www.gwu.edu/~calm/ (дата обращения: 10.01.2012).

Chestnykh O.V., Zamolodchikov D.G., Karelin D.V. Resources of organic carbon in the soils of tundra and forest-tundra Ecosystems in Russia // Rus. J. Ecology, 1999, vol. 30, No. 6, p. 392–398.

GIS Innovatsia. Data SIO, NOAA, US, Navy, NGA, GEBCO Image / Terra Metrics Google. 2012. URL: http://maps.google.com/ (дата обращения: 01.11.2012).

Grosse G., Harden J., Turetsky M. et al. Vulnerability of high latitude soil organic carbon in North America to disturbance // J. Geophys. Res., 2011, vol. 116, G00K06, doi:10.1029/2010JG001507.

IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis // Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs et al. (eds). N.Y., USA; Cambridge, UK, Cambridge Univ. Press, 2001, 881 p.

IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis // Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / S. Solomon, D. Qin, M. Manning et al. (eds). N.Y., USA; Cambridge, UK, Cambridge Univ. Press, 2007, 996 p.

Kanevskiy M., Shur Y., Fortier D. et al. Cryostratigraphy of Late Pleistocene syngenetic permafrost (yedoma) in northern Alaska, Itkillik River exposure // Quatern. Res., 2011, vol. 75, p. 584–596.

Kaplina T.N., Lozhkin A.V. Age and history of accumulation of the "Ice Complex" of the maritime lowlands of Yakutiya // Late Quaternary Environments of the Soviet Union. Minneapolis, USA, Univ. Minnesota Press, 1984, p. 147–151.

Kholodov A.L., Gilichinsky D., Ostroumov V. et al. Regional and local variability of modern natural changes in permafrost temperature in the Yakutia Coastal Lowlands, Northeastern Siberia // Proc. of the Tenth Intern. Conf. on Permafrost (Salekhard, June 25–29, 2012). Salekhard, Russia, The Northern Publisher, 2012, p. 203–209.

Konishchev V.N., Rogov V.V. Investigations of cryogenic weathering in Europe and Northern Asia // Permafrost and Periglacial Processes, 1993, vol. 4, p. 49–64.

McGuire D.A., Macdonald R.W., Schuur E.A.G. et al. The carbon budget of the northern cryosphere region // Current Opinion in Environ. Sustainability, 2010, vol. 2, p. 231–236.

NCSCD Site 2012. URL: http://bolin.su.se/data/ncscd/ (дата обращения: 10.01.12).

Ping C.L., Michaelson G.J., Jorgenson M.T. et al. High stocks of soil organic carbon in the North American Arctic region // Nat. Geosci., 2008, vol. 1(9), p. 615–619, doi:10.1038/ngeo284.

Romanovsky V.E., Drozdov D.S., Oberman N.G. et al. Thermal state of permafrost in Russia // Permafrost and Periglacial Processes, 2010, vol. 21, p. 136–155.

Schirrmeister L., Christine S., Kuznetsova T. et al. Paleoenvironmental and paleoclimatic records from permafrost deposits in the Arctic region of Northern Siberia // Quatern. Intern., 2002, vol. 89, p. 97–118.

Schuur E.A.G., Bockheim J., Canadell J.G. et al. Vulnerability of permafrost carbon to climate change: Implications for the global carbon cycle // Bioscience, 2008, vol. 58, No. 8, p. 701–714.

Serreze M.C., Walsh J.E., Chapin III F.S. et al. Observational evidence of recent change in the northern high-latitude environment // Climatic Change, 2000, vol. 46, p. 159–207.

Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A. et al. Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic shelf // Science, 2010, vol. 327, p. 1246–1250.

Sher A.V. A brief overview of the Late-Cenozoic history of the Western Beringian Lowlands // Terrestrial paleoenvironmental studies in Beringia: Proc. of a Joint Russian-American Workshop, Fairbanks, Alaska, 1991, p. 3–6.

Sher A., Kuzmina S., Kiselyov S., Lister A. Tundra-steppe environment in Arctic Siberia and the evolution of the woolly mammoth // The Third Intern. Mammoth Conf.: Abstr. (Yukon, Canada, May 24–29, 2003). Yukon, 2003, p. 136–142.

Tarnocai C., Canadell J.G., Schuur E.A.G. et al. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region // Global Biogeochem. Cycles, 2009, vol. 23, GB2023, doi:10.1029/2008GB003327.

Tarnocai C., Ping C.L., Kimble J. Carbon cycles in the permafrost region of North America, in The First State of the Carbon Cycle Report (SOCCR): The North American Carbon Budget and Implications for the Global Carbon Cycle. 2007, p. 101–112. (Rept / U.S. Climate Change Science Program).

Tomirdiaro S.V. Evolution of lowland landscapes in northern Asia during Late Quaternary time // Paleoecology of Beringia. N.Y., Acad. Press, 1982, p. 29–37.

Walter K.M., Edwards M.E., Grosse G. et al. Thermokarst lakes as a source of atmospheric CH4 during the last deglaciation // Science, 2007, vol. 318, p. 633–636.

Zimov S.A., Davydov S.P., Zimova G.M. et al. Permafrost carbon: Stock and decomposability of a globally significant carbon pool // Geophys. Res. Lett., 2006a, vol. 33, L20502, doi:10.1029/2006GL027484.

Zimov S.A., Schuur E.A.G., Chapin III F.S. Permafrost and the global carbon budget // Science, 2006b, vol. 312, p. 1612–1613, doi:10.1126/science.1128908.

Поступила в редакцию
30 ноября 2012 г.