

УДК 630*182 : 574.45 : 581.526.533(470)

© 1995 г. Д. В. КАРЕЛИН, Д. Г. ЗАМОЛОДЧИКОВ, Т. Г. ГИЛЬМАНОВ

ЗАПАСЫ И ПРОДУКЦИЯ УГЛЕРОДА В ФИТОМАССЕ ТУНДРОВЫХ И ЛЕСОТУНДРОВЫХ ЭКОСИСТЕМ РОССИИ¹

Оценены запасы углерода в первичной продукции и фитомассе тундровых и лесотундровых экосистем России по материалам 73 источников, представляющих 138 зональных и 31 интразональную экосистему. Площади отдельных ландшафтов, ландшафтных провинций и тундрового биома в целом (включая лесотундру) рассчитаны по компьютерной карте масштаба 1 : 4 000 000. Запасы углерода в фитомассе тундровых и лесотундровых экосистем России составляют 2735,34 млн. т на площади 283,5 млн. га (в среднем $9,65 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$) или 34,2% от мировых запасов углерода в фитомассе тундрового биома (без альпийских экосистем и парамо). Собственно зональные ассоциации занимают 254,2 млн. га, из которых 43,85 млн. га приходится на горные тундры и горные полярные пустыни. Годичное продуцирование углерода тундровым биомом России определено в 377,98 млн. т, или 35,3% от осредненной оценки для этого биома Земли, что согласуется как с площадным представительством (32%), так и с запасом углерода в фитомассе. Средняя по России плотность запасов углерода в фитомассе равна $0,965 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2}$ и соответствует независимо вычисленному по мировым данным показателю (0,97). Средняя величина годичной первичной продукции составляет $0,133 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ и почти совпадает с общемировой оценкой (0,131) для данного биома.

Тундровые и лесотундровые экосистемы России, запасы углерода, фитомасса, первичная продукция, парниковый эффект.

В настоящее время особое внимание уделяется проблемам глобального изменения климата и роли углекислого газа и метана в этих процессах. По результатам разностороннего анализа [6], с 1800 г. по 1993 г. концентрация CO_2 в атмосфере возросла с 260 до 350‰, что объясняется главным образом сжиганием различных видов ископаемого топлива и, возможно, дополнительной эмиссией CO_2 в ходе обезлесения в тропических широтах. Одновременно увеличилась и среднегодовая температура атмосферы, что большинством исследователей связывается с ростом концентрации углекислого газа и метана (Greenhouse Effect). По авторитетным прогнозам [6], в высоких широтах, где в наземных экосистемах сосредоточены основные площади суши и наиболее существенные запасы углерода в составе почвенного органического вещества, фитомассы и других пулов углерода, увеличение среднегодовой температуры в дальнейшем может достичь $+9^\circ$, при среднегодовой величине для атмосферы в целом $+4,5^\circ$.

Наземные экосистемы Земли — источник углерода для атмосферы (Carbon Source), поступающего за счет валового дыхания организмов и сжигания углеродсодержащих веществ. Сток углерода (Carbon Sink) в форме CO_2 из атмосферы происходит за счет фотосинтеза. Баланс дыхания и фотосинтеза в процессе функционирования экосистем сложным образом зависит от глобальных изменений климата и выражается в чистой первичной продукции сообществ [4], т. е. в приросте органической массы растений на единице площади за единицу времени (обычно за год).

¹ Работа выполнена в рамках проекта 4.3.3 ГНТП 18 «Глобальные изменения природной среды и климата».

Отсюда на первый план, в частности и для северных широт, ставятся задачи, связанные с получением новых и уточнением существующих оценок компонентов глобального цикла углерода, к которым относятся: а) органическое вещество почвы, б) фитомасса, т. е. масса живых растений, в) масса отмерших частей растений, называемая часто «мортмассой». На долю позвоночных и беспозвоночных животных в осоковой тундре приходится менее 0,01% общих запасов углерода, на долю грибов и бактерий — 0,04%, в мортмассе содержится 0,34%, в фитомассе — 2,3%, тогда как в органическом веществе почвы — 97,31% (F. S. Chapin et al., 1980, цит. по [6]).

В лесотундровых экосистемах содержание углерода в органическом веществе почвы (80—90% от общих запасов углерода в экосистеме) занимает промежуточное положение между тундрой и бореальными лесами, но ближе к первой. Лесотундру часто относят к особой категории бореально-субарктических ландшафтов. Ряд особенностей последних роднит их с тундровыми местообитаниями (сходный температурный и водный режим, повсеместное наличие вечной мерзлоты, режим и глубина снежного покрова и сезонного оттаивания), но многие другие характеристики приближают лесотундру к типичным лесным ландшафтам (лучшая теплообеспеченность, большая годовая норма осадков, более глубокое оттаивание и часто меньшая скорость ветра). По запасам фитомассы и чистой годичной продукции лесотундру можно считать переходной полосой между тундрой и бореальными лесами, тогда как по валовому накоплению почвенного органического вещества она гораздо ближе стоит к тундре. По имеющимся у нас данным, запасы и доля собственно древесной фитомассы в общих запасах фитомассы тундры и лесотундры относительно невелики в сравнении с бореальными лесами и составляют в среднем 11,35 тС·га⁻¹ и 50%, соответственно. Еще в большей степени это касается годичной продукции (0,54 тС га⁻¹·год⁻¹, или 32%).

Таким образом, в сравнении с лесными экосистемами роль древесной растительности в общем углеродном балансе лесотундры ограничена. Поэтому в контексте оценок биологической продуктивности тундры и лесотундры правильнее говорить о тундровом биоме в широком смысле.

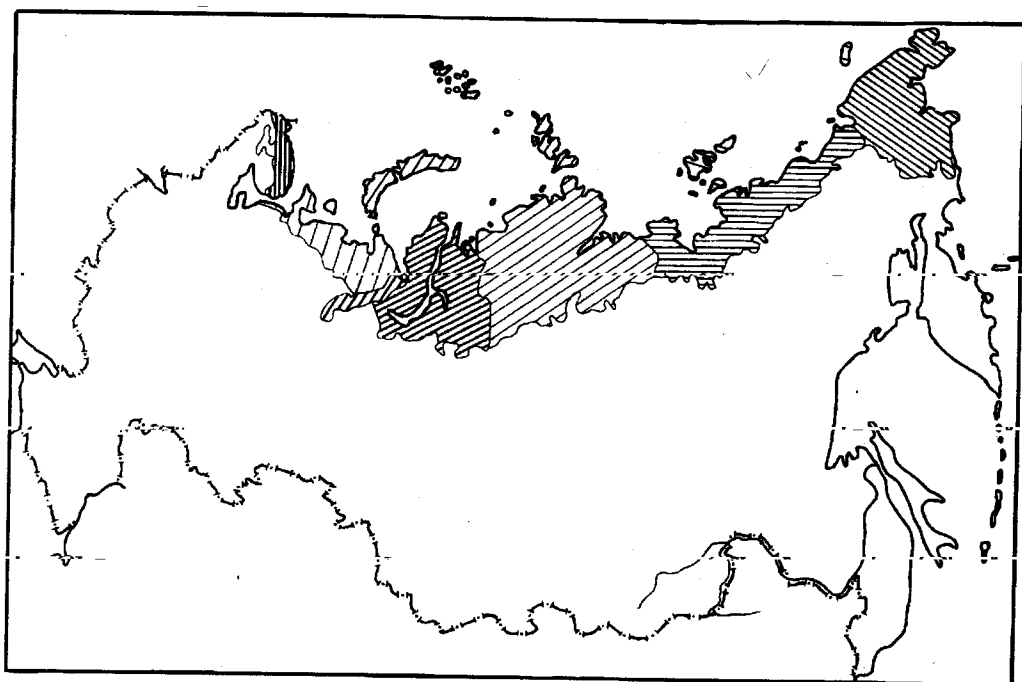
Около 2/3 органического углерода наземных экосистем Земного шара аккумулируется в почве (1395,3 Гт). Из этого количества 191,8 Гт (13,75%) приходится на экосистемы тундры и лесотундры (на бореальные леса — 13,04%), где он депонирован в основном в толще вечной мерзлоты [5]. Тундра вместе с лесотундрой занимает (по разным оценкам) от 8 до 13 млн·км², или около 8% от площади суши, т. е. сходную или несколько меньшую площадь по сравнению с исключительно продуктивными тропическими дождевыми лесами (13,1 млн·км²) и более продуктивными северными лесами (11,07 млн·км²).

Однако по сумме двух основных пулов углерода (запасы в почве и фитомассе) тундра вместе с лесными биомами входит в ряд наиболее существенных наземных биомов Земли [6—8]; тропические дождевые леса — 315,7 Гт; бореальные леса — 291,3 Гт; тундра, лесотундра, альпийские экосистемы и парамо — 204,4 Гт, или находится по этому показателю на пятом месте после тропических лесов, бореальных лесов, саванн и степей². Это достигается за счет того, что из-за крайне замедленных темпов разложения растительных остатков здесь на единицу площади накапливается наибольшее количество углерода в почве — 10,9—21,8 кг·м⁻² [6—8] (хотя показатель первичной продукции наиболее низок среди всех наземных экосистем).

Материалы и методы

Тундра и лесотундра России были разделены на девять регионов (рисунок), соответствующих крупным ландшафтными провинциям. Для расчета площадей использовали компьютерную карту ландшафтов России, построенную с использо-

² Для северных (бореальных) лесов данные приводятся без учета запасов углерода в торфяны отложениях болот.



1 2 3 4 5 6 7 8 9

Регионы тундровых и лесотундровых экосистем России: 1 — Кольский п-ов; 2 — Восточно-Европейская провинция; 3 — Полярный Урал; 4 — западные острова Ледовитого океана; 5 — Западно-Сибирская низменность; 6 — Центральная Сибирь; 7 — Якутская провинция; 8 — восточные острова Ледовитого океана; 9 — Чукотско-Анадырская провинция

Таблица 1

Площади зональных и интразональных экосистем тундр и лесотундр Российского Севера

Тип ландшафта	Зональные экосистемы, млн. га	Интразональные экосистемы, млн. га	
		болота	речные поймы
Ледники	6,07	—	—
Полярные пустыни	7,74	—	—
Горные полярные пустыни	6,58	—	—
Горные тундры	37,27	0,25	1,19
Арктические тундры	47,94	0,74	6,30
Субарктические южные тундры	38,05	1,85	4,48
Субарктические типичные тундры	45,70	1,17	7,18
Европейские и сибирские лесотундры	33,79	0,99	1,99
Дальневосточные типичные тундры	20,42	—	2,20
Дальневосточная лесотундра	6,00	—	0,94
Дальневосточные стланики	4,64	—	0,02
Итого	254,20	5,00	24,3

Фитомасса и годовичная продукция тундровых и лесотундровых экосистем Российского Севера

Экосистема	Площадь		Фитомасса		Продукция, год ⁻¹		Площадь		Фитомасса		Продукция, год ⁻¹	
	млн. га	тс. га ⁻¹	млн. тс	тс. га ⁻¹	тс. га ⁻¹	млн. тс	млн. га	млн. га	тс. га ⁻¹	млн. тс	тс. га ⁻¹	млн. тс
Кольский п-ов												
Горные пустыни	0,05	0,22	0,01	0,01	0,01	0,00	—	—	—	—	—	—
Тундры всех типов	2,35	4,89	11,48	0,71	0,71	1,68	18,14	8,99	163,12	1,19	21,58	—
Лесотундра » »	3,12	11,95	37,23	1,22	1,22	3,79	6,38	30,76	196,18	1,69	10,80	—
Речные поймы » »	0,10	6,91	0,69	2,25	2,25	0,23	0,89	8,18	7,28	3,37	3,00	—
Болота » »	0,58	5,93	3,44	0,90	0,90	0,52	1,97	9,13	17,98	1,45	2,85	—
Всего	6,19	8,54	52,86	1,00	1,00	6,21	27,39	14,04	384,56	1,40	38,24	—
Восточно-Европейская провинция												
Полярный Урал												
Ледники	—	—	—	—	—	—	6,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Полярные пустыни	—	—	—	—	—	—	4,18	0,71	2,97	0,11	0,45	—
Горные пустыни	0,68	0,22	0,15	0,01	0,01	0,01	—	—	—	—	—	—
Тундры всех типов	2,86	6,25	17,87	0,81	0,81	2,33	2,30	3,66	8,40	0,92	2,11	—
Лесотундра » »	0,09	21,99	1,95	1,62	1,62	0,14	—	—	—	—	—	—
Речные поймы » »	0,11	6,64	0,73	2,91	2,91	0,32	—	—	—	—	—	—
Всего	3,75	5,52	20,70	0,75	0,75	2,80	12,53	0,91	11,37	0,20	2,56	—
Западные острова Ледовитого океана												

	Западно-Сибирская низменность				Центральная Сибирь				
Полярные пустыни	—	—	—	—	2,75	0,71	1,95	0,11	0,30
Горные пустыни	—	—	—	—	2,77	0,22	0,61	1,01	0,04
Тундры всех типов	28,55	8,11	231,63	1,38	64,42	7,82	503,72	1,35	86,64
Лесотундра » »	3,52	17,71	62,39	1,72	13,12	24,02	315,14	2,09	27,36
Речные поймы » »	4,84	6,08	29,43	2,53	7,78	6,61	51,46	2,62	20,39
Болота » »	2,1	7,15	15,02	1,51	0,31	10,48	3,25	2,00	0,62
Всего	39,01	8,68	338,45	1,56	91,13	9,61	876,16	1,49	135,34
	Якутская провинция				Восточные острова Ледовитого океана				
Ледники	—	—	—	—	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Полярные пустыни	—	—	—	—	0,81	0,71	0,57	0,11	0,09
Тундры всех типов	32,91	6,18	203,23	1,1	3,68	3,36	12,35	0,61	2,26
Лесотундра » »	7,56	21,99	166,18	1,62	—	—	—	—	—
Речные поймы » »	7,04	6,61	46,53	2,40	—	—	—	—	—
Болота » »	0,06	8,42	0,48	2,56	—	—	—	—	—
Всего	47,57	8,75	416,43	1,38	4,50	2,87	12,92	0,52	2,35
	Чукотско-Анадырская провинция				Всего по России				
Ледники	—	—	—	—	6,07	—	0,00	—	0,00
Полярные пустыни	—	—	—	—	7,74	0,71	5,49	0,11	0,84
Горные пустыни	3,08	0,22	0,68	0,01	6,58	0,22	1,45	0,01	0,09
Тундры всех типов	34,17	10,76	367,54	1,22	189,38	8,02	1519,34	1,24	233,94
Лесотундра » »	10,64	21,63	230,13	1,33	44,43	22,71	1009,20	1,68	74,56
Речные поймы » »	3,57	6,60	23,55	2,28	24,33	6,56	159,67	2,52	61,23
Болота » »	—	—	—	—	5,02	8,00	40,17	1,46	7,32
Всего	51,44	12,09	621,89	1,25	283,54	9,65	2735,34	1,33	377,98

ванием как приобретенного пакета картографических программ (IDRISI: A Grid-Based Geographic Analysis System 4.0), так и оригинального математического обеспечения ввода и вывода графической информации, позволяющего координатно вводить географические контуры с дигитайзера для дальнейшей обработки векторных файлов, а также выводить полученные изображения на печать. Матричной основой послужила «Ландшафтная карта СССР» масштаба 1 : 4 000 000 [3]. Компьютерная карта позволила определить для России площади отдельных ландшафтов, регионов и рассматриваемого биома в целом. В табл. 1 суммированы показатели распределения площадей основных групп экосистем, контуры которых нанесены на ландшафтной карте России.

В качестве интразональных элементов нами включены болота, а также поймы и дельты рек. В первом случае это урочища с постоянным застойным увлажнением (в основном верховые сфагновые грядово-мочажинные), во втором — с периодическим проточным переувлажнением, приведенные на ландшафтной карте Исаченко [3]. Заметим, что в табл. 1, 2 интразональные элементы приведены отдельно от прочих ландшафтов, так что общая площадь региона или ландшафтной зоны рассчитывалась как сумма их площадей и площадей прочих ландшафтов в пределах проведенных границ данного региона или зоны. Там, где интразональный элемент полностью вписывался в эти границы, он целиком относился к данному региону или ландшафтной зоне/подзоне. В случаях пересечения границами последних его площадь делилась между ними. Горные тундры, горные полярные пустыни и ледники рассматриваются в пределах зонального биома отдельно.

В качестве исходной информации по фитомассе и годичной продукции тундровых и лесотундровых экосистем были использованы экспериментальные сведения по 169 учетным площадям из 73 литературных источников. Авторам была любезно предоставлена часть литературных ссылок и данных, вошедших позднее в компьютерную базу данных Н. И. Базилевич по биологической продуктивности экосистем [1] и в ее монографию [2]. Эти сведения были дополнены собранной нами литературной информацией. В ряде случаев ввиду неполноты экспериментальных оценок допускались экстраполяции.

Каждая учетная площадь была сопоставлена с соответствующим ландшафтом компьютерной карты, после чего путем усреднения получены оценки запасов фитомассы и первичной продукции для каждого из ландшафтов. Далее путем суммирования данных по типам экосистем были получены оценки полной фитомассы и первичной продукции для отдельных регионов и зоны в целом. Исходя из запасов фитомассы и продукции, были рассчитаны запасы и годичное продуцирование углерода. При этом (согласно [5]) допускалось, что 1 кг сухого органического вещества соответствует 0,45 кг углерода. Расчеты были выполнены по всем группам экосистем в пределах отдельных подзон во всех девяти ландшафтных провинциях. Однако из-за недостатка места в настоящем сообщении приводится только сгруппированная информация (табл. 2).

Результаты и обсуждение

Согласно полученным нами усредненным оценкам, на территорию России приходится около 1/3 (22—35%) площади мирового тундрового биома; различие в оценках зависит от включения (или не включения) в рассмотрение интразональных гидроморфных сообществ (болота, пойменные луга) и горных экосистем (горные тундры, альпийские экосистемы, парамо). Без включения альпийских экосистем и парамо этот показатель оценен как 32% (283,5 млн. га). Обобщенные и развернутые данные по площадям всех рассмотренных ландшафтных группировок приведены в табл. 1. Лесотундры различных типов, включая стланики, занимают 44,43 млн. га, или 15,67% от общей площади биома в России.

За исключением гидроморфных урочищ (болота занимают 5,0 млн. га, или 1,8% от общей площади биома, речные поймы и дельты — 24,3 млн. га, или 8,6%)

зональные ассоциации тундрового биома занимают площадь 254,2 млн. га, из которых на долю горных тундр и горных полярных пустынь приходится 43,85 млн. га. В случае исключения последних получаем 210,35 млн. га как оценку для площади плоскорных (зональных) тундровых и лесотундровых группировок растительности России.

Приводимая в настоящей работе оценка запасов углерода в фитомассе тундровых и лесотундровых экосистем России составляет 2735,34 млн. т (2,735 Гт) для площади 283,5 млн. га (табл. 2), т. е. в среднем для России запас углерода равен $9,65 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$, существенно различаясь по группам экосистем (табл. 2). Запасы углерода российской тундры и лесотундры составляют по нашим оценкам 34,2% от мировых запасов углерода в фитомассе этого биома, если не включать в последний экосистемы альпийского пояса и парамо [8].

Рассчитанная нами величина годичного продуцирования углерода ($377,98 \text{ млн} \cdot \text{т} \cdot \text{год}^{-1}$) соответствует 35,3% от усредненной годичной оценки для этих биомов в целом — $1070 \text{ млн} \cdot \text{т} \cdot \text{год}^{-1}$ [6], т. е. эквивалентна нашим же оценкам долевого представительства России в тундровом биоме как по занимаемой площади, так и по запасам углерода в фитомассе.

Сравнительные данные по тундровым биомам Земного шара и России выглядят следующим образом:

	Площадь, млн · км ²	%	Фитомасса млн · т · С	%	Продукция млн · т · С	%
Земной шар	8,86	100	7998	100	1070	100
Россия	2,84	32	2735	34	378	35

Средний показатель плотности запасов углерода в фитомассе по исследованным регионам ($0,965 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2}$) практически совпадает с независимо вычисленным нами для того же биома в целом по мировым данным — $0,970$ (рассчитано по [9]). То же касается и оценок средних величин годичной первичной продукции России и мира, равных соответственно $0,133 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2}$ и $0,131 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2}$ (последняя оценка по данным [7]).

Региональные и широтно-меридиональные закономерности распределения запасов фитомассы, почвенного органического вещества и первичной продукции северных экосистем в зависимости от климатических условий рассмотрены нами в другой работе [10].

Заключение. Приводимые нами оценки запасов углерода в фитомассе и первичной продукции тундровых и лесотундровых экосистем России хорошо согласуются с имеющимися в мировой литературе. Однако использованный в настоящей работе метод распространения усредненных эмпирических величин на значительные категории площадей далек от совершенства. С одной стороны, встают проблемы ограниченности исходных полевых материалов и корректности распространения таких данных на зональные или ландшафтные площади, с другой, — получаемые оценки отражают не столько современное состояние углеродного баланса, сколько усредненные данные для значительных временных отрезков за период проведения эмпирических исследований. Поэтому полученные оценки запасов углерода и некоторые показатели его круговорота в тундровых и лесотундровых экосистемах России следует считать как начальный этап инвентаризации углеродного цикла, нуждающийся в уточнении всех величин как на региональном, так и на глобальном уровнях.

Следующим шагом предусматривается построение феноменологических и динамических моделей продукционного процесса и газообмена в тундровых и лесотундровых экосистемах. В дальнейшем предполагается создание на базе имеющейся компьютерной карты геоинформационной системы для районов Арктики и Субарктики России. Исходной информацией для такой карты должны служить описания растительности, климатические параметры, почвенные характеристики и выявленные модели. На этой основе представляется возможным

получение новых, географически распределенных оценок запасов и потоков углерода, выявление возможных трендов их изменения с целью прогнозирования влияния климатических изменений на состояние биосферы.

* *
*

Авторы выражают глубокую признательность Н. И. Базилевич за помощь в отборе первичной информации и В. Н. Носову за участие в разработке программного обеспечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Базилевич Н. И. Компьютерная база данных по биологической продуктивности экосистем Мира. М.: Науч.-тех. центр А. Н. Р. Экология, 1992.
2. Базилевич Н. И. Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. М.: Наука, 1993. 295 с.
3. Исаченко А. Г., Шляпкина А. А., Робозерова О. Д., Филипецкая А. З. Ландшафтная карта СССР. М.: 1 : 4 000 000. М.: ГУГК, 1988.
4. Кобак К. И. Биотические компоненты углеродного цикла. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 248 с.
5. Ajtay J. L., Ketner P., Duvigneaud P. Terrestrial primary production and phytomass//The Global Carbon Cycle. Scope 13/Eds B. Bolin, E. T. Degens, S. Kenpe, P. Ketner. N. Y.: John Wiley and Sons, 1979. P. 129—181.
6. Billings W. D. Carbon balance of Alaskan tundra and taiga ecosystems: past, present and future//Quaternary Sci. Rev. 1987. V. 6. P. 165—177.
7. Bolin B. How much CO₂ will remain in the atmosphere?//The Greenhouse Effect, Climate Change, and Ecosystems. Scope 29/Eds B. Bolin, B. Doos, J. Jager, R. Warrick. London: John Wiley and Sons, 1986. P. 93—155.
8. Melillo J. M., McGuire A. D., Kicklighter D. W. et al. Global climate change and terrestrial net primary production//Nature. 1993. V. 363. № 6426. P. 234—240.
9. Olson J. S., Watts T. A., Allison L. J. Carbon in live vegetation of major world ecosystems//Oak Ringe Nat. Lab. ORNL-5862. 1983. 164 p.
10. Zamolodchikov D. G., Karelin D. V., Chestnykh O. V. Longitudinal and longitudinal patterns of phytomass reserves and primary productivity profiles of the Russian North from Cola Peninsula to Chukotka//Global Change and Arctic Ecosystems. Proc. Int. Conf. 21—26 Aug. 1993. Oppdal. Norway (in press).

Центр по проблемам экологии
и продуктивности лесов РАН, Москва

Поступила в редакцию
25.10.1994

D. V. Karelin, D. G. Zamolodchikov, T. G. Gil'manov

CARBON RESERVES AND PRODUCTION IN PHYTOMASS OF TUNDRA AND FOREST-TUNDRA ECOSYSTEMS IN RUSSIA

Carbon reserves in living phytomass and its primary production in terrestrial tundra and forest-tundra ecosystems of Russia were estimated. The information has been obtained from 169 test plots in zonal and intrazonal ecosystems. A computer map (1 : 4 000 000) was used for calculating areas of 9 provinces, some landscapes and the whole biome of Russia. The carbon storage in living phytomass of the called ecosystems is equal to 2735,34 million ha for the area of 283,5 million ha or 9,65 t · ha⁻¹. This amounts to 34,2% of the total carbon storage in the world biome without alpine ecosystems and paramo. Zonal communities occupy 254,2 million ha (including mountain tundra and mountain polar deserts — 43,85 millions). The total carbon storage in primary production accounts for 377,98 million t · yr⁻¹, what is about 35,3% of the average value for the world biome. The obtained data correspond the authors' estimates by the total area occupied (32%) and the carbon storage in phytomass. The mean value of carbon storage density in living phytomass is 0,97 kg · m⁻². It doesn't differ from the independent estimate for the entire tundra biome.