

Технология оценки компонентов углеродного баланса лесов Украины с использованием данных зондирования Земли из космоса

Л.М. Агрошенко¹, В.В. Богомолов², И.Ф. Букша³, Н.Н. Горобец¹,
С.И. Костяшкин², Д.С. Костяшкин³, В.П. Пастернак³

¹Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина
61077 Украина, г. Харьков, пл. Свободы, 4
E-mail: Nikolay.N. Gorobets@univer.kharkov.ua

²Харьковская государственная лесоустроительная экспедиция,
62458 Украина, Харьковская обл., пос. Покотиловка, ул. Железнодорожная, 11
E-mail: XDLE@vilcom.net

³Украинский НИИ лесного хозяйства и агролесомелиорации им. Г.Н. Высоцкого
61024 Украина, г. Харьков, ул. Пушкинская, 86
E-mail: buksha@uriffm.org.ua

Предложена технология оценки запасов углерода на лесопокрытых землях с использованием результатов их дистанционного зондирования сенсорами оптического и радиодиапазона космического базирования. Разработка проиллюстрирована расчетом запасов углерода в лесах Сумской области (Украина).

Ключевые слова: дистанционное зондирование, лес, запасы углерода, база данных.

Введение

Киотский протокол к Рамочной конференции ООН по изменению климата [1] признает исключительно важную роль лесов как естественных поглотителей парниковых газов. Особое значение в этом смысле уделяется роли лесов как поглотителей углекислого газа. В связи с этим важнейшей задачей является учет общего количества углерода и изучение ежегодного углеродного баланса вследствие естественного роста лесов и хозяйственной деятельности человека на лесопокрытых землях.

Фундаментальной основой инвентаризации углерода лесов является следующее положение: предполагается, что поток CO₂ в или из атмосферы является эквивалентным изменениям запаса углерода в их биомассе и грунте. Базовым вопросом представляется изучение и картографирование запасов углерода на текущий момент.

Усилия ученых мирового сообщества по использованию ДЗЗ для изучения как углеродного баланса в целом, так и его составляющих, в частности, для лесопокрытых земель, привело к созданию нескольких методик, наиболее известными из которых являются следующие.

При отсутствии полной базы данных по лесам исследуемой территории прирост массы углерода в наземных частях древостоя может быть оценен по космическим снимкам с использованием характеристик фотосинтеза [2]. В основу этой методики положены известные соотношения между уровнем фотосинтетически-активной радиации и количеством молекул углекислого газа, поглощаемым растительностью в процессе фотосинтеза. Как недостатки данного подхода следует отметить невозможность верификации результатов для конкретного снимка, а также использование коэффициентов, определяющихся сложно и/или неоднозначно.

Существует также методика оценки части общего количества запасенного в лесу углерода. Она позволяет рассчитать общее количество углерода в древостое на основе учета

биомассы, используя снимки и пробные площадки [3]. Предполагается, что значение биомассы на пробных площадках может быть учтено в натуре. Снимок должен быть того же периода, что и данные по пробным площадкам. В случае если данные асинхронны, можно использовать модели роста древостоя для актуализации данных на момент съемки. Эта методика является более перспективной, поскольку позволяет выполнить верификацию расчетов для конкретного снимка. Однако она требует большого объема наземного сопровождения в каждом конкретном случае.

Предлагаемая технология является, по-существу, расширением и углублением предыдущей методики. Она использует данные лесоустроительной информационной системы (ГИС), построенной на данных космической съемки лесов и их наземного обследования (таксации). В нашем случае использованы данные ГИС, созданной на основе данных дистанционного зондирования из космоса космическими аппаратами IRS, Quickbird и «Алмаз-1». Учет биомассы и расчет содержащегося в ней углерода осуществляется двояко: в случае отсутствия радиолокационных снимков на территорию - по данным из лесоустроительной геобазы данных, в случае наличия таковых - по моделям перехода [4] от характеристик радиолокационного снимка к количественной оценке элементов фитомассы (количества стволов, ветвей, листьев, хвои), их массы и затем - к расчету содержания углерода. Наиболее полным и продуктивным является комплексный подход, позволяющий оценить общее количество углерода на лесопокрытой территории, включая такие элементы леса как подстилка, грунт, сухостой, захламленность. Для территорий, на которые геобаза данных отсутствует, приходится ограничиваться подходом, включающим лишь данные космических наблюдений, при обязательном наличии как данных оптического диапазона, так и результатов активной радиолокации высокого разрешения (РСА) [5]. Это дает некоторую ошибку в оценке общего содержания углерода на лесопокрытых землях, поскольку содержание его в подпологовых компонентах лесной среды приходится оценивать из общелесоведческих знаний и данных исследований по изучаемому региону.

К интересующему моменту (фьючерсно или ретроспективно) данные по биомассе привязываются с использованием разработанных нами моделей роста дерева по радиусу путем расчета геометрических «норм» [6, 7], что дает возможность рассчитать составляющую углеродного баланса, обеспечиваемую естественным развитием древостоев. Оценка других факторов, определяющих углеродный баланс территорий (хозяйственная деятельность, пожары и т.п.) подробно изложена в работе [8].

Для изучения увеличения поглощения углерода в период облиствления лиственных древостоев нами разработана методика оценки скорости роста площади листовых пластин, каковая обнаруживает прямую корреляцию (на уровне достоверности $p > 0,95$) со средними значениями ЭПР радиолокационного снимка лиственных лесов.

Главный принцип методологии, используемой на международном уровне - обеспечение удобных (для пользователей с разным уровнем доступа к данным) форм проведения расчетов и сравнимости данных. Этим принципом мы и руководствовались при разработке представляемой технологии.

Технология оценки количества запасов углерода на лесопокрытых землях

В настоящем разделе приводится технология расчета количества углерода, депонированного в лесах. Технология разработана таким образом, что может быть использована как при наличии полной базы данных и/или ГИС таксационных характеристик лесов, полученных с использованием или без использования данных их дистанционного зондирования носителями космического базирования, так и при наличии только комплексированных материалов дистанционного зондирования лесов космическими

средствами оптического и радиодиапазона и стандартных таксационных справочников. Расчетные соотношения получены для следующих компонент: древостой, включая одиночные деревья, подлесок, подрост, сухостой, захламливание, лесная подстилка, грунт. В расчетах используются конверсионные коэффициенты, полученные с использованием литературных источников [9-12] и данных научных исследований Украинский НИИ лесного хозяйства и агролесомелиорации им. Г.Н. Высоцкого

Исходные данные для расчетов приведены в таблице 1. При отсутствии данных ДЗЗ они берутся из данных лесотаксации. При наличии необходимого массива дистанционных исследований все они могут быть получены из данных ДЗЗ. Такие характеристики как площадь выдела, класс бонитета (характеристика условий произрастания), полнота и высота (по данным РСА на восходящем и нисходящем витке) могут быть определены непосредственно по данным ДЗЗ. Другие показатели рассчитываются на основании данных ДЗЗ с использованием ласотаксационных таблиц и справочников [13]. Так, например, создание синтезированных изображений, когда на стандартные каналы подаются спектрональные изображения, полученные с разными спектральными фильтрами, позволяет классифицировать участки по породному составу [14], что дает возможность рассчитать коэффициент состава.

Расчет количества углерода в древостое

Расчет содержания углерода M_{c1} в живой биомассе древостоя проводится в зависимости от группы породы и фракции. Группа породы определяется из справочника древесных пород. Разделение пород по группам приведено в таблице 2. Расчетные соотношения для разных групп пород приведены в таблице 3.

Значение коэффициентов k_i для различных групп пород и фракций приведены в таблице 4; r_i - здесь и далее - коэффициенты размерности.

Таким же образом рассчитывается содержание углерода в одиночных деревьях, за исключением того, что подставляется фиксированное значение полноты - 0,1.

Расчет содержания углерода в других компонентах леса

Для расчета массы углерода M_{c2} , содержащейся в **подлеске**, используется соотношение

$$M_{c2} = 0,45 \cdot (2,561 \cdot KAP - 1,311 \cdot KAP^2 - 0,0263) \cdot k \cdot r_9 S;$$

Коэффициент m приводится в таблице 5. Коэффициенты зависят от условий произрастания. Группа определяется по коду основной породы из таблицы 1.

Для расчета массы углерода в **подросте** используется формула

$$M_{c3} = k_1 \cdot k_2 \cdot KAND \cdot e^{kKAN} \cdot r_{10} S;$$

Коэффициенты приведены в таблице 6.

Масса углерода, содержащегося в **сухостое** (ярус 13), рассчитывается по формуле

$$M_{c4} = 0,05 \cdot k \cdot KAMG \cdot KASS \cdot r_{11} S;$$

Значения коэффициента k приведены в таблице 7.

В **захламленности** масса углерода рассчитывается как

$$M_{c5} = 0,5 \cdot k \cdot S;$$

Значения коэффициента k - в таблице 8.

Таблица 1. Исходные данные для расчета количества углерода, депонированного в лесах

Данные	Наименование	Единица измерения
КАН*	Высота	м
КАР*	Полнота	б/р
КАМГ**	Запас на 1 га	м ³ /га
КАСС**	Коэффициент состава	б/р
S*	Площадь выдела	га
КАА**	Возраст	год (б/р)
КАВ*	Класс бонитета	б/р
КАД**	Диаметр	см

Значком * в таблице помечены данные, которые могут быть получены непосредственно из результатов ДЗЗ, значком ** - данные, которые получают из результатов дистанционных наблюдений путем пересчета по таксационным таблицам.

Таблица 2. Разделение пород по группам

Номер группы пород	Коды в справочнике	Краткое описание
1	100100<KASP<100200	Сосна
2	202000<KASP<202400, 511300<KASP<511400	Дуб, бук, ясень, орех
3	100400<KASP<100500	Лиственница
4	302600<KASP<302700	Береза
5	100200<KASP<100300	Ель
6	304100<KASP<304200	Ольха
7	304200<KASP<304300, 202400<KASP<209000, 513400<KASP<513500, 511800<KASP<511900, 512800<KASP<512900, 509000<KASP<509300	Клен, липа, вяз, явор, берест, белая акация, гледичия, яблоня, груша, рябина, черемуха
8	другие	Тополь, осина, верба и др.

Таблица 3. Расчетные соотношения для расчета содержания углерода в древостоях различных групп

№ формулы	Формула
1	$(0,05 \cdot k_1 \cdot \text{КАН}^{k_2} \cdot \text{КАР}^{k_3} \cdot \text{КАМГ} \cdot \text{КАСС}) \cdot r_1 S$
2	$(0,5 \cdot k_1 \cdot \text{КАН}^{k_2} \cdot (1 - 0,5 \cdot \text{КАР}) \cdot \text{КАР}^{k_3}) \cdot r_2 S$
3	$(0,5 \cdot k_1 \cdot \text{КАН}^{k_2} \cdot \text{КАР}^{k_3}) \cdot r_3 S$
4	$(0,05 \cdot k_1 \cdot \text{КАА}^{k_2} \cdot \text{КАР}^{k_3} \cdot \text{КАМГ} \cdot \text{КАСС}) \cdot r_4 S$
5	$(0,05 \cdot k_1 \cdot \text{КАА}^{k_2} \cdot (\text{КАВ} + 1)^{k_3} \cdot \text{КАР}^{k_4} \cdot e^{(k_5 \cdot \text{КАА} + k_6 \cdot \text{КАР})} \cdot \text{КАМГ} \cdot \text{КАСС}) \cdot r_5 S$
6	$(0,5 \cdot k_1 \cdot \text{КАД}^{k_2} \cdot \text{КАН}^{k_3} \cdot \text{КАР}^{k_4}) \cdot r_6 S$
7	$(0,05 \cdot k_1 \cdot \text{КАА}^{k_2} \cdot \text{КАМГ} \cdot \text{КАСС}) \cdot r_7 S$
8	$(0,05 \cdot k_1 \cdot (\text{КАВ} + 1)^{k_2} \cdot \text{КАА}^{(k_3 + k_4 \cdot \text{КАР} + k_5 \cdot \text{КАР}^2)} \cdot \text{КАМГ} \cdot \text{КАСС}) \cdot r_8 S$

Таблица 4. Соответствие групп пород формулам и коэффициентам

№ группы пород	Фракция	№ формулы	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6
1	крона	1	0,346	-0,793	-0,705			
1	ствол	2	5,701	1,464	1,525			
1	корни	3	2,085	0,857	0,936			
2	крона	4	0,265	-0,254	-0,128			
2	ствол	4	0,385	0,06	0,11			
2	корни	4	0,465	-0,412	-0,11			
3	крона	5	0,5197	-0,9132	0,7981	-0,2485	0,0051	-0,3437
3	ствол	5	0,3387	0,0766	0,0364	-0,0825	-0,0006	0,0508
3	корни	5	0,045	-0,2149	0,8342	-0,6664	0,0009	0,4961
4	крона	6	3,023	1,217	-0,573	1,011		
4	ствол	6	1,948	-0,18	1,599	0,963		
4	корни	7	0,131	-0,148				
5	крона	8	0,1124	0,4524	-0,0407	-0,8371	0,4922	
5	ствол	8	0,186	0,0814	0,1158	0,0811	-0,0703	
5	корни	8	0,2845	0,3641	-0,3322	0,2611	-0,413	
6	крона	7	0,054	-0,061				
6	ствол	7	0,449	0,029				
6	корни	7	0,075	0,098				
7	крона	7	0,1094	-0,159				
7	ствол	7	0,3501	0,063				
7	корни	7	5,9132	-0,842				
8	крона	4	0,095	-0,154	-0,14			
8	ствол	4	0,352	0,033	0,12			
8	корни	7	0,38	-0,394				

Таблица 5. Коэффициент для расчета массы углерода в подлеске

Возраст насаждения	Группа возраста	Группа пород				
		1, 3	5	4	6, 7, 8	2
молодняки	2, 3	0,5	0,1	0,3	0,2	0,45
средневозрастные	4, 5	0,6	0,15	0,4	0,3	0,6
приспевающие	6	0,65	0,2	0,5	0,35	0,65
спелые	7, 8	0,7	0,25	0,55	0,4	0,7

Таблица 6. Коэффициент для расчета массы углерода в подросте

Группа пород	k_1	k_2	k_3
1, 3	0,45	0,00077	0,534
5	0,5	0,000316	0,501
4	0,5	0,000458	0,48
7, 8	0,4	0,000514	0,465
2	0,6	0,000497	0,515
6	0,5	0,000458	0,451

Таблица 7. Коэффициенты для расчета массы углерода в сухостое

Группа пород	Крона	Ствол	Корни
1	0,02	0,32	0,03
5	0,02	0,3	0,02
2	0,04	0,42	0,04
3, 4, 6, 7, 8	0,01	0,3	0,02

Таблица 8. Коэффициенты для расчета массы углерода в захламенности

Группа пород	$k(m/га)$
2	0,35
Другие	0,25

Таблица 9. Коэффициенты для расчета массы углерода в подстилке

Группа пород	k_1	k_2	k_3	k_4
1, 3, 5	0,48	-0,003	0,51	0,63
2	0,42	-0,0012	0,24	0,25
4, 6, 7, 8	0,37	-0,0016	0,24	0,1

Таблица 10. Коэффициент для расчета массы углерода в грунте для различных условий произрастания (А1 - С5)

Код типа условий	12	13	14	22	23	24	25	26	32	33	34	35	36
Тип условий	A1	A2	A3	B1	B2	B3	B4	B5	C1	C2	C3	C4	C5
$k(m/га)$	7,0	10,4	16,2	17,4	20,3	26,1	34,8	37,7	20,3	23,2	29,0	37,7	40,6

Таблица 11. Результаты расчета запасов углерода в лесхозах Сумской области.

Гослесхозы	Запас, углерода, т	Площадь, га	Плотность, т / га
Ахтырский	2999000	25600	117.1
Глуховский	2465000	21390	115.2
Краснопольский	2516000	23040	109.2
Кролевецкое лесохозяйственное хозяйство	2700000	20680	130.6
Конотопский	2831000	25670	110.3
Лебединский	3785000	30130	125.6
Роменский	1988000	17740	112.1
Свейский	3007000	23930	125.7
Средне-Будский	2168000	16760	129.4
Производственное отделение ГЛХ «Сумлес»	3365000	26480	127.1
Тростянецкий	2799000	21980	127.3
Шосткинский	3634000	26610	136.6
Шосткинский агролесхоз	1299000	12640	102.8
Всего по области	71113051	585292	121.5

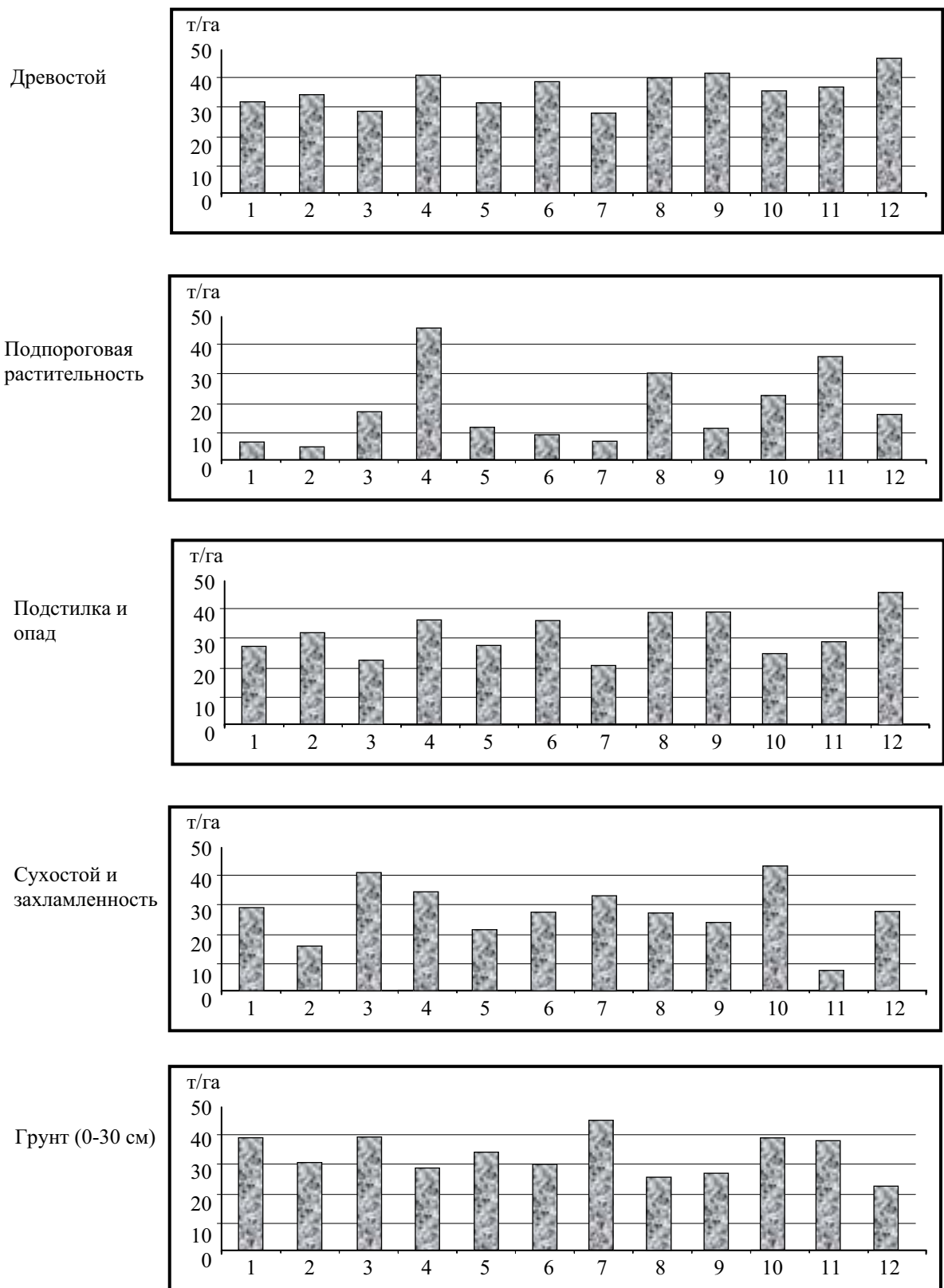


Рис. 1. Запасы углерода по фракциям (т/га) в лесах Сумской области (Украина).

- | | |
|---|--|
| 1.-Ахтырский гослесхоз. | 7.-Роменский гослесхоз. |
| 2.-Глуховский гослесхоз. | 8.-Свейский гослесхоз. |
| 3.-Краснопольский гослесхоз. | 9.-Средне-Будский гослесхоз. |
| 4.-Кролевецкое лесохозяйственное хозяйство. | 10.-Производственное отделение ГЛХ «Сумлес». |
| 5.-Конотопский гослесхоз. | 11.-Тростянецкий гослесхоз. |
| 6.-Лебединский гослесхоз. | 12.-Шосткинский агролесхоз. |

Для расчетов массы углерода в **подстилке** используется формула:

$$M_{c6} = k_1 (k_2 \cdot KAA^2 + k_3 \cdot KAA + k_4) \cdot KAP^{1,2} \cdot r_{12} S;$$

Коэффициенты представлены в таблице 9.

Для расчета массы углерода в **грунте** (слой 0 - 30 см) используется формула

$$M_{c7} = k \cdot S.$$

Значения k берутся из таблицы 10. Если выдел относится к категории земель, отвечающей болоту, используется коэффициент 129,5.

Понятно, что общая масса углерода, депонированного в изучаемом лесном массиве, получается как сумма всех рассчитанных слагаемых $\sum M_i$.

Пример расчета количества запасов углерода в лесах административной области

Расчеты запасов углерода на территории лесов Сумской области (Украина) согласно приведенной выше методике были выполнены в системе GESmallworld GIS 2.21. Было реализовано моделирование базы данных средствами встроенного в систему Case-Tool и разработки программных компонентов (классов и методов) на объектно-ориентированном языке программирования системы Magik. Модель базы данных была основана на модели данных таксационной лесоустроительной базы данных с дополнением некоторыми добавочными атрибутами, касающимися расчета запасов углерода.

Результаты расчетов запасов углерода в лесах лесхозов Сумской области приведены в таблице 11, запас углерода на единице площади лесопокрытых территорий области по фракциям представлен на рисунке.

Исходными данными служили файлы оригинального формата таксационной базы данных VFF в количестве 80 штук, что соответствует 80 лесничествам в 13 лесохозяйственных предприятиях области. Данные были сведены в базу данных Access, а затем переведены в базу данных Smallworld GIS. Всего было импортировано, а затем включено в расчет около 600 тыс. записей.

Заключение

Таким образом, в работе представлена технология оценки запасов углерода на лесопокрытых землях, доступная для применения пользователям разного уровня и располагающим различным уровнем и различной организацией информации. Технология может быть использована как при наличии полной базы данных и/или ГИС таксационных характеристик лесов, полученных с использованием или без использования данных их дистанционного зондирования носителями космического базирования, так и при наличии только лесотаксационных данных или только комплексированных материалов дистанционного зондирования лесов космическими средствами оптического и радиодиапазона и общедоступной литературы. Приведен полный набор соотношений и конверсионных коэффициентов, необходимых для расчетов. Методы расчета отличаются простотой по всем компонентам леса. Расчеты могут выполняться в рамках ГИС-приложения на основе единой на всю Украину лесоустроительной геобазы данных, созданной с использованием данных дистанционного зондирования лесов из космоса.

Литература

1. Киотский протокол к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата, русская версия. [Электронный ресурс]-Режим доступа:http://www.wwf.ru/about/what_we_do/climate/kyoto/

2. *Mousses B.H.* Прямые расчеты продукции органического углерода в лесах России по спутниковым данным ФАР // *Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве. Доклады III Всероссийской конференции, памяти Г.Г. Самойловича. М., 2002. С.184-187*
3. *Fazakas Z., M. Nilsson, H. Olsson* Regional forest biomass and wood volume estimation using satellite data and ancillary data // *Agricultural and Forest Meteorology* 98-99 (1999). Pp. 417-425.
4. *Атрошенко Л.М., Горобец В.Н., Горобец Н.Н., Костяшкин С.И., Сафронова Л.П.* Методики описания лесных территорий в целях обеспечения эффективного дешифрирования спутниковой информации РСА // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных объектов и явлений. Сб. научн. статей. М.: ООО «Азбука-2000», 2008. Вып. 5. Т. II. С. 257-264.*
5. *Атрошенко Л.М., Богомолов В.В., Горобец Н.Н., Костяшкин С.И., Полупан А.В.* Повышение эффективности использования ДЗЗ для ведения лесного хозяйства путем комплексирования данных средств различных диапазонов // *Аерокосмічне спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки GEO-UA 2008. Перша Всеукраїнська конференція з запрошенням закордонних учасників. Матеріали доповідей. м. Київ, 3-5 червня, 2008. С.134-135.*
6. *Снотик Л.М., Полюшки Ю.В.* Индикация топических условий параметрами математической модели роста дерева по радиусу // *Проблемы дендрохронологии и дендроклиматологии. Свердловск, 1990. С.111-139.*
7. *Атрошенко Л.М., Горобец Н.Н.* Перспективы изучения методами радиолокации таксационных характеристик и степени техногенной загрязненности лесов // *Вісник Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна. Радіофізика та електроніка. 2004. №622. С.132-136.*
8. *Букша І.Ф., Пастернак В.П.* Інвентаризація та моніторинг парникових газів у лісовому господарстві. Харків. 2005. 124 с.
9. *Лакида П.І.* Фітомаса лісів України. Тернопіль. 2002
10. *Петренко М.М., Лакида П.І.* Дослідження динаміки фітомаси соснових культур українського Полісся // *Наук. Вісн. НАУ. 2000. Вип. 25. – С. 339-345.*
11. *Лауценко А.Г.* Продуктивність, фітомаса та депонований вуглець штучних дубових лісових станів Поділля: Автореф. дис. на здобуття вченого ступеню канд. с.-г. наук. / НАУ. - К.:2004. – 20 с.
12. *Колосок О.М.* Продуктивність і структура фітомаси штучних лісових станів ялини звичайної в Українських Карпатах. – Автореф. дис. на здобуття вченого ступеню канд. с.-г. наук. / НАУ. - К.:2002. – 20 с.
13. *Нормативно-справочные материалы для таксации лесов Украины и Молдавии. Киев. Урожай. 1987. 560 с.*
14. *Беляев Б.И., Катковский Л.В.* Оптическое дистанционное зондирование // *Минск, БГУ, 2006. 456 с.*

Technology of an estimation of components of carbon balance of the Ukraine forests with use of the data of remote sensing of the Earth from space

**L.M. Atroshenko¹, V.V. Bogomolov², I.F. Buksha³, N.N. Gorobets¹,
S.I. Kostjashkin², D.S. Kostjashkin³, V.P. Pasternak³**

¹*V.N. Karazin Kharkov National University*

²*Kharkov State Forest management and inventory expedition*

³*Ukrainian Research Institute of Forestry and Forest Melioration named after G.M. Vysotsky*

The technology of an estimation of stocks of carbon on the forestry grounds with use of results of their remote sensing by sensor controls optical and a radiorange of space basing is offered. Development is illustrated with calculation of stocks of carbon in woods Sumy areas (Ukraine).

Keywords: remote sensing, forest, stocks of carbon, database.