

БАЗЫ ДАННЫХ “ОРГАНИЧЕСКИЙ УГЛЕРОД” И “ЗАПАСЫ РАСТИТЕЛЬНОГО ВЕЩЕСТВА В ЭКОСИСТЕМАХ СИБИРИ” КАК СРЕДСТВО ОЦЕНКИ УГЛЕРОДНОГО БАЛАНСА, ЕГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НА ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ ОСНОВЕ*

А. А. Титлянова, С. Я. Кудряшова,
Н. П. Косых, С. В. Шибарева

Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, Новосибирск, Россия

e-mail: sya@issa.nsc.ru

Different forms of databases for reserves of the vegetable material are created. Using the mass content data, the consolidated reserves of organic carbon accumulated in the Siberian soils is calculated. The calculated amount is $1.99 \cdot 10^9$ tons or 13 % from the world's reserves. An estimation of the carbon budget around the Western Siberia is discussed.

В настоящее время в связи с принятием государственной программы создания географической информационной системы, которая должна решать такие две взаимосвязанные проблемы, как обеспечение единой государственной системы экологического мониторинга и ведение комплексного территориального кадастра природных ресурсов, работы по созданию экологических баз данных получили новую актуальность. Однако, как показывает опыт, основной целью большей части функционирующих на данном этапе информационных проектов экологической направленности, содержащих и не содержащих элементы ГИС, является решение практических задач природоохранной деятельности и оценка эффективности проведенных природоохранных мероприятий. Соответственно, базы тематических данных таких информационных систем главным образом связаны со спецификой экологических проблем конкретных территорий, решение которых не предусматривает постановку фундаментальных экологических задач. Наряду с таким подходом существует и другой — предполагающий, что ГИС должна быть скорее исследовательской средой, чем основой для проектирования или справочным инструментом [1]. Такой подход оказался очень результативным при выполнении работ по проведению глобальных оценок природных ресурсов, осуществлении оценок

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 96-07-89486 и № 00-04-49262).

© Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук, 2007.

биологического разнообразия, в том числе и целевого исследования по управлению биоразнообразием почв [2–4]. В связи с созданием Проекта по изучению глобального углерода, основная цель которого состоит в том, чтобы перейти к комплексному описанию круговорота углерода, использование геоинформационных технологий может получить широкую перспективу для создания и прогнозирования новых концептуальных схем углеродного цикла на разных уровнях функционирования природной среды [5]. Предполагается, что для реализации данной цели в числе других задач необходимо дать количественное описание современного географического и временного распределения запасов и потоков углерода в виде региональных балансов, а также балансов по секторам народного хозяйства.

Согласно количественным оценкам, в том числе и в масштабах планеты, основным резервуаром органического углерода является почва, которая содержит около 80 % от его общих запасов в наземных экосистемах. На территории нашей страны пул углерода, ассоциированный с почвенным органическим веществом, составляет более 20 % почвенного углерода в мире. Значение почвенного покрова Сибири в создании запасов углерода очень велико, так как его площадь составляет более 70 % земельных ресурсов России и более 7 % площади земельного покрова биосферы.

Другой, очень важный аспект данной проблемы связан с практикой землепользования. Несмотря на то что в общем объеме глобальных антропогенных выбросов CO₂ доля сельскохозяйственного сектора самая низкая (4.0 %), она может существенно увеличиваться (до 20 %) с повышением распаханности территории. В Западной Сибири под сельскохозяйственным производством в разных формах занято 60–70 % территории, что значительно больше, чем во многих крупных европейских странах. Распаханность земель в степной и лесостепной зонах региона может достигать 90 %. С учетом научно-практической значимости данной проблемы, для решения которой необходимо использование большого количества проанализированной и структурированной первичной информации по запасам углерода почвенного органического вещества, фракциям растительного вещества, показателям продуктивности природных, не подверженных деятельности человека и антропогенно трансформированных экосистем, нами была собрана большая часть доступного литературного материала, которая в дальнейшем стала основой для нескольких специализированных баз данных. Разработка баз данных начата в 1993 г., когда доступность программных и аналитических средств была ограничена, поэтому для их оформления использовались наиболее распространенные для того периода базовые технологии. Тем не менее, несмотря на это обстоятельство, созданные базы данных имеют существенную значимость для описания углеродного цикла, так как содержат большое количество фактических данных, необходимых для расчета составляющих углеродного баланса. Базы данных предназначены для хранения исходной информации о запасах углерода в естественных и антропогенно трансформированных экосистемах Сибири, создания тематических слоев электронных карт субрегионального и регионального уровней, программного обеспечения для моделей более детального прогнозирования и создания новых концептуальных схем углеродного цикла в сельскохозяйственных процессах и в других областях, связанных с необходимостью принимать пространственно-ориентированные решения.

База данных “Органический углерод” реализована на платформе IBM совместимого компьютера. Для хранения информации выбран формат файлов СУБД Paradox 5.0 for Windows. Программа работы с базой данных реализована на Borland Delphi 1.0 с использованием Borland Database Engine.

Функционально база данных состоит из следующих программ и файлов:

- 1) основная программа работы с данными;
- 2) программа представления географической информации;
- 3) файлы данных и запросов.

В основной программе реализован интерфейс пользователя базы данных с возможностью контроля и редактирования вводимой информации. Блок ввода и коррекции информации обеспечивает просмотр и редактирование данных. Блок обработки запросов реализует выполнение запросов пользователя на отбор информации по выбранным критериям. Блок интерпретатора пользовательских программ позволяет автоматизировать производимые манипуляции и вычисления. Математическая библиотека содержит методы и алгоритмы, используемые при обработке информации базы данных. Реализованы необходимые методы статистического анализа, позволяющие уже в программе получить общую статистическую информацию о выбранных данных. В программе предусмотрен экспорт данных в формат ASCII-файла, что позволяет в дальнейшем обрабатывать полученные данные в специализированных статистических пакетах. Блок представления информации и отчетов по запросам позволяет выводить результаты запросов как на экран дисплея, так и на печатающее устройство. В блоке также предусмотрена возможность просмотра графиков единичного и среднего разрезов и вывод их на печатающее устройство. База данных содержит три раздела.

1. Раздел “Органический углерод, азот и доступный фосфор в почвах Сибири” (тип почвы, географическая локализация, координатная привязка, рельеф, среднегодовые значения температуры и влажности, сумма температур выше 10 °С, растительность, тип использования, гранулометрический состав, рН, содержание гумуса, азота и доступного фосфора). Всего 5850 информационных объектов.

2. Раздел “Объемная масса почв Сибири” (тип почвы, координатная привязка, значения объемной массы почвенных горизонтов). Всего 2300 информационных объектов.

3. Раздел “Метео” (координатная привязка метеостанций и климатические данные: среднегодовые значения температур воздуха — годовых, за теплый и холодный периоды; суммы осадков — средние многолетние, за теплый и холодный периоды; суммы температур воздуха выше 5 и 10 °С; температура почвы на глубинах 10, 20 и 40 см; запасы продуктивной влаги в слое 0...100 см, испаряемость за теплый период года). Всего 1566 информационных объектов.

Вся информация приведена в соответствие с координатной сеткой. При систематизации данных проводилась кодировка почв, в основу которой положена зонально-генетическая их классификация. Информационно-аналитическая система базы данных позволяет группировать объекты по зонам, типам почв, регионам, типам использования земель и времени отбора проб. Расчеты запасов углерода построены на основе средне-статистических профилей содержания гумуса в определенном типе почвы или в каждой из 17 укрупненных групп почвенных типов. В качестве аппроксимирующей зависимости содержания гумуса в профиле используется полиномиальная модель. Среднее содержание гумуса вычисляется путем численного интегрирования соответствующих зависимостей. Выбор полиномиальной модели определялся характером поставленной задачи — получение плавных изменений почвенных показателей в вертикальном профиле, а также возможностью экстраполяции к нулевому уровню. Для вычисления среднестатистической объемной массы использовалась аналогичная схема.

В базе данных по запасам лабильного органического вещества количественные данные о запасах фракций надземной и подземной фитомассы, общей микроббиомас-

сы, массы почвенных микромицетов в природных и трансформированных экосистемах сгруппированы в следующие разделы:

— травяные экосистемы (сенокосы и пастбища), куда входят луга (заливные, солонцово-солончаковые, остепненные), степи (луговые, настоящие, сухие), травяные болота, — агроценозы, которые включают зерновые (пшеницу, рожь, ячмень, овес), кормовые (кукурузу, люцерну, бобовые, однолетние и многолетние кормовые травы), овощные и технические (картофель, капусту, корнеплоды, томаты, огурцы), пары.

Объем базы данных составляет 5000 записей, которые включают величины живой фитомассы (зеленая масса и подземные органы) и мортмассы (ветошь, подстилка, надземные растительные остатки). В агроценозах для оценки запасов фракций растительного вещества с недостающими данными были построены регрессионные ряды на основе величин биологического урожая зерна по полным данным структуры фитомассы и мортмассы.

Структурирование материала для расчетов запасов углерода в территориальных выделах проводилось по трем основным блокам: запасам фитомассы и мортмассы в экосистемах, запасам органического углерода в почвах, биологическому круговороту углерода.

Более подробно система структурирования данных представлена на примере организации объединенной базы данных “Углерод в экосистемах Южной Сибири”, которая сформирована на региональном уровне, поэтому ее обобщенными блоками являются географические регионы: Западная, Центральная и Восточная Сибирь, кодируемые буквами З, Ц, В (табл. 1). В пределах географического региона в качестве выделов первого порядка используются ландшафтные регионы, кодируемые цифрами: 1 — средняя тайга; 2 — южная тайга; 3 — лесостепь; 4 — степь; 5 — горные ландшафты; 6 — долины рек. Выделы второго порядка представлены типами использования земель, которые также кодированы цифрами:

- 1 — агроценозы, которые включают посевы и пары;
- 2 — сенокосы и пастбища;
- 3 — интенсивно эксплуатируемые леса;
- 4 — нарушенные земли: карьеры, отвалы, эродированные земли, гари, вырубки, города, дороги, поселки и другие антропогенные агломераты;
- 5 — целинные, лесные, болотные, луговые, степные экосистемы.

Выделами третьего порядка являются типы экосистем, не кодируемые цифрами. В соответствии с принятыми кодовыми обозначениями, как представлено в табл. 1 на примере Центральной Сибири (Ц), в выделе первого порядка (Ц.2) и выделе второго порядка (Ц.2.22) показано движение к исходному выделу третьего порядка. Цифро-

Т а б л и ц а 1. Объединенная база данных “Углерод в экосистемах Южной Сибири”

№ п/п	Ландшафтный регион	Западная Сибирь	Центральная Сибирь	Восточная Сибирь
1	Тайга средняя	48 831/47.0	27 835/41.3	26 398/18.9
2	Тайга южная	—	—	—
3	Лесостепь	29 917/28.7	8674/12.8	21 691/15.6
4	Степь	12 102/11.6	5106/7.5	6023/4.3
5	Горные ландшафты	7484/7.2	24 230/36.0	82 786/59.5
6	Долины рек	5727/5.5	1619/2.4	2376/1.7

вой материал собран в большинстве случаев для выделов третьего порядка. Например, “надземная фитомасса Ц.2.2 березовых и осиновых лесов” означает, что надземная фитомасса определена и приводится для сенокосов и пастбищ, расположенных на месте бывших березовых и осиновых лесов в южной тайге Центральной Сибири.

При сжатию материала выделы могут укрупняться до биомов. Нами принято, что биом — это таксономическая единица высокого ранга, объединяющая экосистемы одного типа. Всего выделено четыре биома: леса, включая целинные, эксплуатируемые и нарушенные, болота и заболоченные леса, травяные экосистемы, агроценозы. Величины запасов и потоков органического вещества выражены в углероде. Поскольку исходные данные отдельных биомов различаются по количеству и качеству фракций растительного вещества, они сгруппированы в промежуточные таблицы:

— запасы фитомассы и мортмассы в лесных и болотных экосистемах Южной Сибири;

— запасы фитомассы и мортмассы в травяных экосистемах Южной Сибири;

— запасы фитомассы и мортмассы в агроценозах Южной Сибири.

Заключительные таблицы по запасам углерода во фракциях растительного вещества имеют одинаковую структуру, которая включает следующие поля: шифр, площадь выдела, запасы надземной фитомассы, запасы подземной фитомассы, запасы растительного вещества. В таблицу по запасам почвенного органического углерода внесены следующие данные: тип почвы, площадь выдела, запас углерода в почве в слое 0...50 и 0...100 см, запас углерода в почве с учетом площади выдела в слое 0...50 и 0...100 см. Потоки углерода, которые характеризуются интенсивностью, т.е. количеством углерода, входящим в блок или выходящим из блока, за единицу времени на единице площади, в базе данных рассчитаны в тысячах тонн углерода на площадь выдела за год. Список учтенных потоков представлен в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Описание потоков углерода

NPP	Чистая первичная продукция, сухой вес в млн т/год
NPP(C)	Чистая первичная продукция, выраженная в углероде в тыс. т/год.
J-1	Вынос С продукции с урожаем
J-2	Поступление С с органическими удобрениями
J-3	Поступление С с растительными остатками в почву, $J-3 = NPP(C) - J-1$
J-4	Общее поступление С органического вещества в почву $J-4 = J-2 + J-3$
J-5	Гумификация, часть С потока J-4, переходящая в гумус почвы
J-6	Минерализация, часть С потока J-4, распадающаяся до CO ₂ $J-6 = J-4 - J-5$
J-7	Не компенсируемая гумификацией минерализация почвенного органического вещества
J-8	Общая минерализация почвенного органического вещества $J-8 = J-5 + J-7$
J-9	Эрозионные потери почвенного органического вещества
J-10	Общие потери (минерализационные и эрозионные) почвенного органического вещества или приращение запасов мортмассы и почвенного органического вещества. Потери С обозначаются знаком (-), приращение С знаком (+).

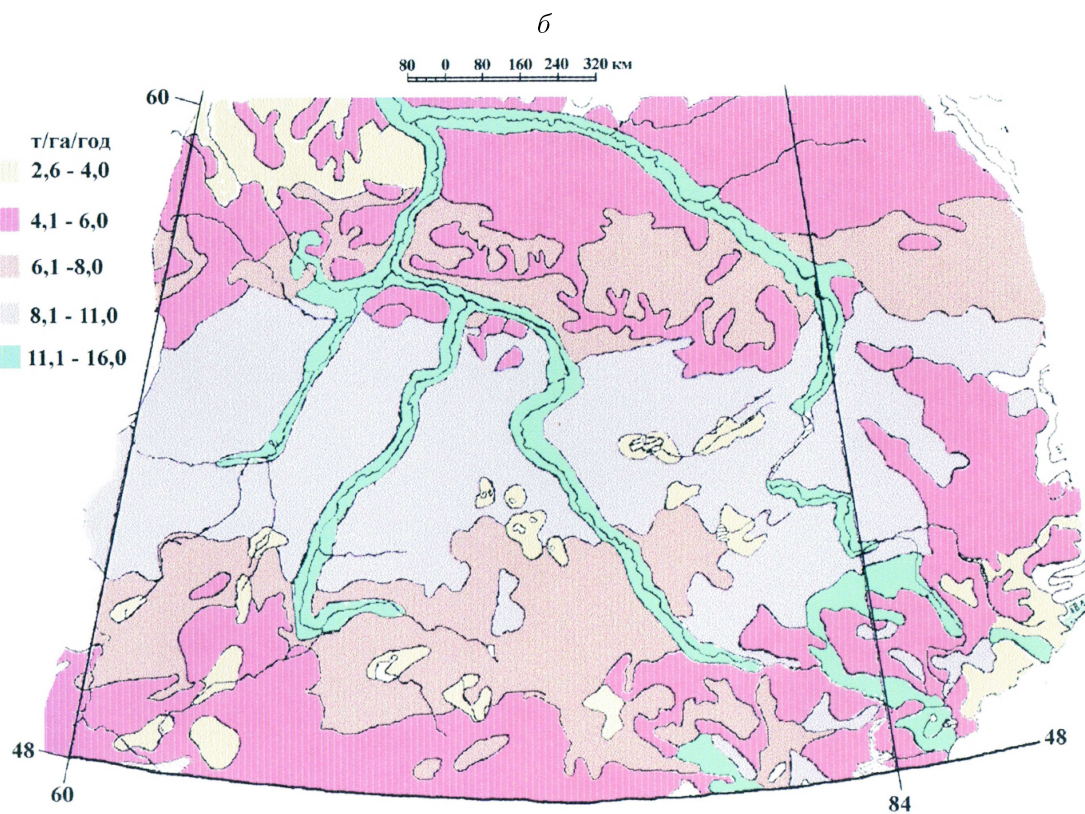
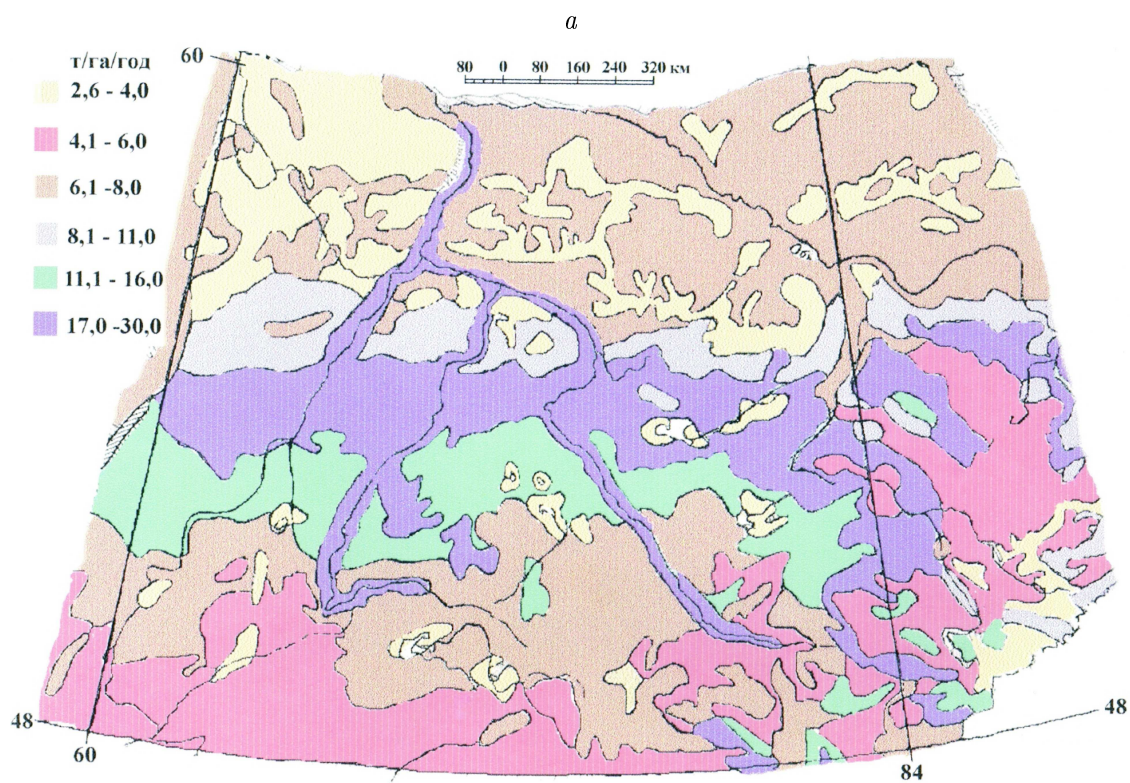
Используя фактические данные и соответствующий шифр, можно описать биологический круговорот углерода для выдела любого порядка и рассчитать параметры углеродного цикла. Нами на основе массового материала был рассчитан запас органического углерода в почвах Сибири, который составляет $1.99 \cdot 10^9$ т, или 13.1 % от мирового запаса [6]. Запасы лабильного углерода (растительное вещество и микроббиомасса), которые также были вычислены с использованием материалов баз данных, в нелесных экосистемах Западной Сибири максимальные в целинных и сенокосных травяных экосистемах в поймах рек и лесостепной зоне, наименьшие — в зерновых агроценозах. При изменении запасов почвенного углерода в слое почвы 0...20 см от 12 кг/м^2 (черноземы выщелоченные) до 6 кг/м^2 (черноземы южные) величины лабильного углерода изменяются от 1.5 до 0.37 кг/м^2 [7].

К числу мониторинговых исследований на значительных территориях можно отнести изучение изменения продуктивности ландшафтов Западной Сибири в связи с различным использованием земель. На основе ретроспективного анализа геоботанических карт, исследований продукции естественных и антропогенно измененных экосистем, массовых данных о содержании органического углерода в целинных и пахотных почвах были установлены изменения в углеродном цикле за 150 лет [8]. Как представлено на рисунке, изменение устройства территории приводит к полному исчезновению природных систем, их глубокой или частичной трансформации и изменению продуктивности при сохранении типа растительности. Одновременно с этим значительно изменяется бюджет углерода почвенного органического вещества. По данным вычислений в период с 1930 по 1990 г. во всех типах пахотных почв отмечается снижение запасов почвенного органического вещества (табл. 3), которое в основном связано с эрозией и минерализацией гумуса. Общие потери составили $11.2 \cdot 10^8$ т $C_{\text{орг}}$, или 29 % к исходному запасу. Полученное среднее значение потерь (96 г/м^2 в год) близко к нижней оценке, приводимой для ареала пахотных земель мира. Оценка мировых потерь углерода колеблется в пределах $53 \dots 493 \text{ г/м}^2$ в год.

В целом для черноземов Западной Сибири, составляющих половину почв пахотного фонда, ежегодные потери углерода в первые 10 лет культивации достигают 420 г/м^2 в год и в последующие 50 лет — 50 г/м^2 в год.

Т а б л и ц а 3. Оценка потерь запасов органического углерода в почвах Западной Сибири

Тип почв	Площадь, $n \cdot 10^6$ га	Запасы $C_{\text{орг}}$ в слое 0...50 см, кг/м^2	Потери $C_{\text{орг}}$ за 100 лет культивации		Общие потери $C_{\text{орг}}$, млн т
			$\text{кг} \cdot \text{С/м}^2$	% от исход- ных запасов	
Подзолистые и дерново- подзолистые	0.25	9.3	± 2.2	23	0
Серые лесные	3.03	14.4	2.8	19	84.8
Лугово-черноземные и луговые	2.51	25.4	10.2	40	256
Солонцы и солончаки	1.12	15.3	1.6	10	17.9
Черноземы обыкновен- ные, выщелоченные и оподзоленные	9.81	23.3	6.8	29	667.1
Черноземы южные	2.49	13.6	3.7	27	92.1
Каштановые	0.23	10	1	10	2.3
Всего	19.44	111.3	5.8	29	1120.2



Продукция растительного покрова юга Западной Сибири: *a* — восстановленного (фрагмент карты Н.И. Базилевич (1993)); *б* — современного

В разных географических регионах юга Сибири углеродный цикл в используемых экосистемах в значительной степени определяется параметрами бюджета почвенного органического вещества. При вовлечении земель в сельскохозяйственный оборот, особенно при распашке территории, изменение общих запасов углерода в основном связано с его потерями из почвенного органического вещества (табл. 4).

С использованием материалов, содержащихся в базах данных, установлены особенности воспроизводства фитобиоты и почвенного органического вещества для географических регионов юга Сибири и проведена оценка запасов фитомассы и ее продукции (ежегодное воспроизводство) в основных биомах, слагающих растительный покров административных регионов Западной Сибири [10]. Показано, что растительный покров административных областей существенно различается по величинам запасов фитомассы и продукции и скорости воспроизводства ресурсов фитомассы. Распределение продукции по отдельным биомам в каждом регионе зависит как от площади, так и от удельной продукции биома в тоннах на гектар в год. Для Алтайского края и Кемеровской области характерен максимальный по сравнению с другими регионами вклад агроценозов в продукцию (табл. 5). Новосибирская и Омская области отличаются высоким продуцированием травяных экосистем и пониженным участием лесов. Тюменская и Томская области характеризуются значительным вкладом болотного биома в общую продукцию. На территории Республики Алтай 90 % продукции создают в равных количествах лесной и травяной биомы.

Т а б л и ц а 4. Потери углерода из почвенно-растительного покрова Западной Сибири за 150 лет использования земель, млн т

Пути потерь углерода	Средняя и южная тайга	Лесостепь и степь	Горные ландшафты и долины рек	Всего
Нарушение лесных экосистем	290.6	120.0	52.3	463.1
Трансформация лесных экосистем в сенокосы и пастбища	98.2	71.5	4.8	174.5
Трансформация лесных и травяных экосистем в агроценозы	168.8	207.7	0.7	440.2
Минерализация почвенного органического вещества	37.0	1072.0	11.0	1120
Всего	594.6	1534.2	69.0	2197.8

Т а б л и ц а 5. Площади, запасы фитомассы и продукция растительного покрова в административных регионах Западной Сибири

Административный регион	Площадь, тыс. га	Фитомасса, 10^6 т С	Продукция (NPP), 10^6 т С/год
Томская область	30 794	1156	96.4
Новосибирская область	16 960	342	78.5
Алтайский край	16 790	281	71.1
Тюменская область	14 283	553	68.7
Омская область	13 970	356	68.9
Кемеровская область	9561	220	24.9
Республика Алтай	9260	360	36.2

Значительное участие в составе лесов темнохвойных пород увеличивает время воспроизводства в Тюменской и Томской областях (см. табл. 5). Сосново-березовые леса южной тайги и лесостепи Новосибирской области и Алтайского края воспроизводятся значительно быстрее. Высокая продуктивность травяных экосистем способствует воспроизводству их фитомассы за один год и менее.

Результаты параметров углеродного цикла, полученные с использованием созданных баз данных, являются информационной основой разрабатываемых в настоящее время тематических слоев электронных карт по изменению запасов углерода и продуктивности почвенного и растительного покрова в используемых экосистемах Сибири.

Список литературы

- [1] TOMLINSON R. Thinking About GIS: Geographic Information System Planning for Managers. ESRI Press, 2003. 240 p.
- [2] MILLENNIUM Ecosystem Assessment-Ecosystems and Human Well being: Desertification Synthesis. World Resources Institute, Washington, DC, 2005. P. 98.
- [3] БИОРАЗНООБРАЗИЕ и динамика экосистем: информационные технологии и моделирование. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. 648 с.
- [4] БИОЛОГИЧЕСКОЕ разнообразие сельского хозяйства: дальнейшее развитие международной инициативы по сохранению и устойчивому использованию биологического разнообразия почвы. UNEP/CBD/SBSTTA/10/14, 2005. 6 с.
- [5] GLOBAL Carbon Project. Science Framework and Implementation. ESSP Report. № 1. Global Carbon Project № 1. Canberra, 2003. 69 p.
- [6] TITLYNOVA A.A., BULAVKO G.I., KUDRYASHOVA S.YA. ET AL. The reserves and losses of organic carbon in the soils of Siberia // Eurasian Soil Sci. 1998. Vol. 31, N 1. P. 45–53.
- [7] TITLYNOVA A.A., KUDRYASHOVA S.YA., YAKUTIN M.V. ET AL. The reserves of labile carbon in western Siberian ecosystems // Eurasian Soil Sci. 1999. Vol. 32, N 2. P. 51–59.
- [8] ТИТЛЯНОВА А.А., КОСЫХ Н.П. Изменение биологического круговорота углерода в ландшафтах Западной Сибири в связи с различным использованием земель // География и природные ресурсы. 1999. № 3. С. 66–76.
- [9] ТИТЛЯНОВА А.А., КУДРЯШОВА С.Я., КОСЫХ Н.П., ШИБАРЕВА С.В. Биологический круговорот углерода и его изменение под влиянием деятельности человека на территории Южной Сибири // Почвоведение. 2005. № 10. С. 1240–1250.
- [10] ТИТЛЯНОВА А.А., КУДРЯШОВА С.Я., КОСЫХ Н.П., ШИБАРЕВА С.В. Воспроизводство фитобиоты и почвенного органического вещества // Природные ресурсы антропосферы: воспроизводство, стоимость, рента. М.: Изд-во Янус-К, 2002. 396 с.

Поступила в редакцию 11 мая 2007 г.