

## Регрессионные модели для оценки углеродного обмена в бореальных лесах

А.Н. Рублев<sup>1</sup>, Г.Ю. Григорьев<sup>1</sup>, Т.А. Удалова<sup>1</sup>, Т.Б. Журавлева<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Институт молекулярной физики,  
Российский научный центр «Курчатовский институт»  
123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1

<sup>2</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 7.07.2009 г.

На основе измерений потоков углекислого газа на нескольких пунктах глобальной сети FLUXNET разработаны линейные регрессионные модели для оценки углеродного баланса бореальных лесов. Модельные оценки удовлетворительно согласуются с данными измерений, выполненных в бореальных лесах Канады (Manitoba, Thompson) и России (Красноярский край, Зотино). Коэффициент корреляции между результатами расчетов и измерений для хвойных лесов превышает 0,9, при этом среднегодовая ошибка модели в оценке баланса по сравнению с экспериментальными результатами не превышает 50 гС/м<sup>2</sup>/год.

По спутниковым и наземным метеорологическим данным проведен расчет среднемесячных значений углеродного баланса хвойных лесов Красноярского края в 2001 г. На основе использования спутниковой типизации растительного покрова построены среднемесячные и годовые карты углеродного баланса, отражающие пространственно-временное распределение интенсивности поглощения или эмиссии CO<sub>2</sub>. Показано, что основная масса хвойных лесов Красноярского края является стоком углерода, поглощая до 300 гС/м<sup>2</sup> за полный вегетационный сезон.

*Ключевые слова:* спутниковый мониторинг, углеродный баланс, бореальные леса, регрессионные модели; satellite monitoring, carbon balance, boreal forests, regression models.

### Введение

Важным этапом контроля изменения климата является проведение регулярных измерений углеродного баланса лесных экосистем. В настоящее время одним из важнейших источников данных по пространственному распределению потоков CO<sub>2</sub> является глобальная сеть FLUXNET [1]: она включает в себя более двухсот измерительных пунктов в различных регионах земного шара со специальными вышками. Несколько таких пунктов есть и в России. На вышках установлены приборы, измеряющие потоки углекислого газа в приземном слое атмосферы методом микровихревых пульсаций (eddy covariance) [2, 3]. Существенными недостатками измерительных пунктов сетей типа FLUXNET является сложность и дороговизна их организации и эксплуатации. Это особенно актуально для покрытых тайгой гигантских редконаселенных территорий Сибири, для которых спутниковые методы оценки баланса углерода экосистем NEE (Net Ecosystem Exchange – чистый газообмен экосистемы) часто являются единственно возможными. В связи с этим предлагаемый в статье подход направлен на

получение простых линейных регрессий, связывающих бореальных лесов с параметрами атмосферы и подстилающей поверхности, оценка которых, в свою очередь, может проводиться по спутниковым измерениям или накопленной статистике наземных метеорологических наблюдений.

### Выбор данных полевых измерений потоков CO<sub>2</sub> и построение регрессионных моделей для различных типов леса

С целью разработки регрессионных алгоритмов в бореальных лесах Северного полушария были выбраны места, где проводились наземные измерения потоков CO<sub>2</sub>. Естественными ограничениями при отборе станций являлись наличие и тип леса, климат, а также продолжительность и непрерывность измерений. В широтах севернее 45° были отобраны четыре станции с хвойными лесами, три со смешанными и две с лиственными.

Источниками данных для Северной Америки послужили результаты, полученные в ходе выполнения многолетнего исследовательского проекта AMERIFLUX [4]. Для Европы – результаты аналогичного проекта EUROFLUX [5–7]. В азиатской части России был выбран пункт в Центральной

\* Алексей Николаевич Рублев; Геннадий Юрьевич Григорьев; Татьяна Андреевна Удалова; Татьяна Борисовна Журавлева (ztb@iao.ru).

Сибири – Зотино, где в течение нескольких теплых сезонов проводились измерения в рамках западно-европейских проектов Terrestrial Carbon Observing System. Данные измерений в Зотино представлены в [8, 9] и на интернет-сайте TCOS Siberia [10].

Перечень отобранных станций с указанием типов лесного покрова, согласно классификации IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme) [11], приведен в табл. 1.

Обширные данные по углеродному обмену хвойных лесов получены на исследовательском сайте BOREAS NSA (Канада, Manitoba), где была проведена одна из самых длительных (с 1994 по 2003 г.) серий непрерывных измерений. Тридцатиметровая исследовательская вышка с измерительной аппаратурой стояла среди лесного массива черной 100-летней ели, на 10 м возвышаясь над кронами деревьев. База данных NEE создавалась по длительным измерениям потоков  $\text{CO}_2$  с полурасовой дискретностью [12–14]. Измерительная вышка Зотино находилась в Красноярском крае западнее Енисея [15], в лесу с сосновыми деревьями возраста 50–200 лет. Потоки  $\text{CO}_2$  регистрировались до высоты 25 м, что на 5 м выше среднего уровня крон [16]. Для модели хвойных лесов были использованы данные 9-летних измерений BOREAS NSA (1994–2003 гг.) и 3-летних измерений в Campbell

River (1999–2001), Нуyttiala (1997–1999) и Зотино (1999–2001).

### Построение регрессионных моделей для различных типов леса

В данных FLUXNET помимо значений потоков  $\text{CO}_2$  приводятся результаты измерений до 50 сопутствующих метео- и геофизических параметров, позволяющие оценивать их влияние на потоки углерода. Для построения регрессионных зависимостей в основном выбирались параметры, которые определялись непосредственно по спутниковым данным или из расчетов по ним. В качестве входных были выбраны среднемесячные значения: уровня фотосинтетически активной (400–700 нм) радиации PAR (Photosynthetically Active Radiation); количества осадков  $Q_m$ , температуры атмосферы  $T_a$  и почвы  $T_s$ .

Для холодного времени года имелись только данные для BOREAS NSA. Для теплого сезона (с апреля по октябрь) объединение выполненных на различных континентах измерений в единую базу основывалось на единообразии устойчивой климатической стадии развития хвойных лесов во всех отобранных станциях бореальной зоны. Более тонкие различия в особенностях экосистем учитывались с помощью климатического фактора.

Таблица 1

Перечень отобранных измерительных станций с лесами различных типов и ошибки восстановления NEE

Тип леса	Станция	Координаты	Период наблюдений, использованный для регрессий, гг.	Среднегодовые осадки $Q_m$ , мм/год (климатический фактор)	Ошибка модели $\sigma_r$ , $\text{гС}/\text{м}^2/\text{год}$
Хвойный лес (Evergreen needleleaf Forests) IGBP класс = 1	BOREAS NSA Manitoba (Канада)	55,9° с.ш. 98,5° з.д.	1994–2003	427	50
	Зотино, Красноярский край (Россия)	60,5° с.ш. 89,3° в.д.	1999–2001	621	
	Campbell River Br Columbia (Канада)	49,9° с.ш. 125,3° з.д.	1999–2001	1994	
	Нуyttiala (Финляндия)	61,8° с.ш. 24,3° в.д.	1997–1999	569	
Смешанный лес (Mixed Forests) IGBP класс = 5	Vielsalm (Бельгия)	50,3° с.ш. 6,0° в.д.	1997–1998	847	60
	Michigan Mich. (США)	45,6° с.ш. 84,7° з.д.	1999–2002	777	
	Hawland Forest Massach. (США)	45,2° с.ш. 68,7° з.д.	1996–2003	1280	
Листоветный лес (Deciduous Forests) IGBP класс = 4	Willow Creek Wisconsin (США)	48,5° с.ш. 90,1° з.д.	1999–2003	817	100
	Soroe (Дания)	55,4° с.ш. 11,4° в.д.	1997–1999	548	

Для восстановления среднемесячных значений NEE была построена стандартная линейная регрессионная модель в форме

$$y_k = \sum_n b_{k,n} x_{k-\Delta k, n}, \quad (1)$$

где  $k$  – номер месяца;  $\Delta k = 0 \div 2$ ,  $y_k = NEE_k / PAR_k$  для  $k = 4 \div 10$ ,  $y_k = NEE_k$  для прочих  $k$ ,  $гС/м^2/день$ ;  $b_{k,n}$  – постоянные коэффициенты регрессии;  $x_{k,n}$  – факторы регрессии соответственно: постоянный член  $x_{k,0} \equiv 1$ , среднемесячные осадки  $Q_m$ , температура атмосферы  $T_a$ , температура почвы  $T_s$ , климатический фактор CF.

Расчеты с различными CF показали, что искомым фактором, удовлетворительно связывающим экспериментальные данные станций с одинаковым типом леса в единую регрессионную модель, может служить характерное для каждой из них климатическое среднегодовое количество осадков  $Q_r$ . В табл. 1 приводятся значения среднегодовых осадков по станциям, взятые из Leemans and Cramer Climatic Database [17].

После того как для разных типов леса были получены коэффициенты регрессии (1), ошибки оценивались сравнением результатов расчета NEE с полевыми измерениями NEE по всем одинаковым месяцам. Для хвойных лесов, по которым имелся 18-летний набор данных, среднеквадратическая ошибка для  $k$ -го месяца,  $\sigma_{mk}$ , определялась как

$$\sigma_{mk} = \frac{1}{\sqrt{(18-5)}} \sqrt{\sum_{i=1}^{18} \left( \frac{NEE_{exp_i} - NEE_{calc_i}}{NEE_{exp_i}} \right)^2},$$

где 18 – число лет наблюдения; 5 – число факторов регрессии в (1) без PAR.

Для хвойных лесов BOREAS NSA ошибка июля составила 0,8  $гС/м^2/день$ , октября – 0,2  $гС/м^2/день$ . В Зотино наибольшее расхождение составило приблизительно 1  $гС/м^2/день$  в августе.

Годовая ошибка восстановления  $\sigma_r$  ( $гС/м^2/год$ ) определялась как

$$\sigma_r = 30 \sqrt{\sum_{k=1}^{12} (\sigma_{mk})^2}.$$

При таком подходе эффективная точность восстановления NEE по полученным регрессионным зависимостям составила примерно 50  $гС/м^2/год$  для хвойных, 60  $гС/м^2/год$  для смешанных и 100  $гС/м^2/год$  для лиственных лесов.

Рис. 1 и 2 иллюстрируют качество полученных регрессий. Как видно из рис. 1, расчетные значения  $NEE_{calc}$ , вычисляемые по регрессионным моделям для всего использованного набора хвойных лесов, коррелируют с соответствующими экспериментальными значениями:  $NEE_{calc} = 0,98 NEE_{exp}$  с коэффициентом корреляции 0,91. Сравнение сезонной изменений среднемесячных NEE в 2000 г. для BOREAS NSA (рис. 2, а) и Зотино (рис. 2, б) также показало удовлетворительное согласие расчетных и измеренных значений.

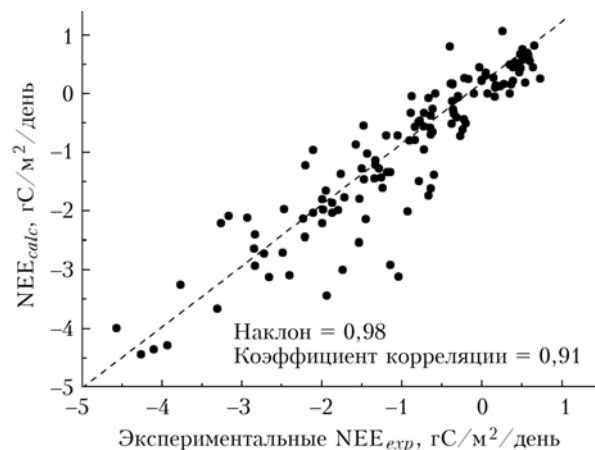


Рис. 1. Корреляция между рассчитанными и измеренными значениями NEE для вечнозеленых лесов

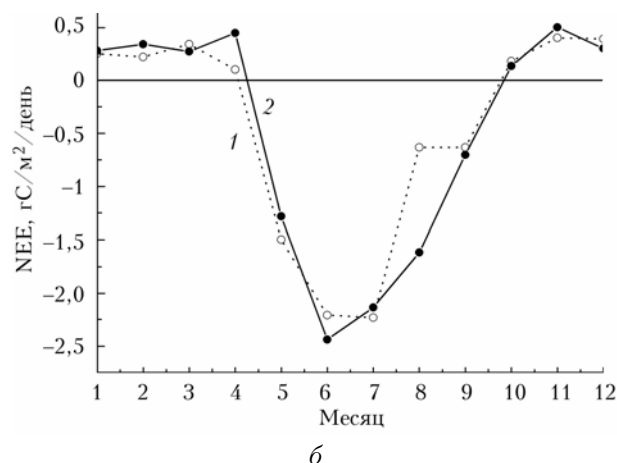
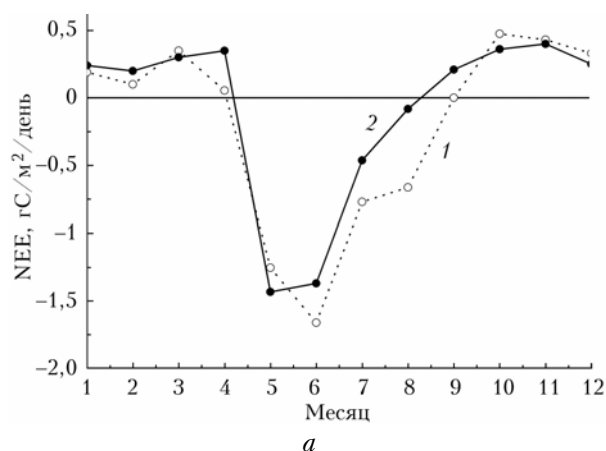


Рис. 2. Сравнение сезонной динамики рассчитанных (1) и измеренных (2) среднемесячных значений NEE в 2000 г.: а – BOREAS; б – Зотино

### Выбор и оценка данных входных параметров регрессии для тестирования модели

Для тестирования полученной регрессии проводилось вычисление NEE по независимым входным параметрам в местах нахождения вышек с измеряемыми потоками  $CO_2$ . В этом случае параметры

PAR,  $T_a$ ,  $T_s$ ,  $Q_m$  брались из космических источников информации, из климатических данных или результатов наземных наблюдений.

Расчетные оценки PAR для различных атмосферных условий [18, 19] проводились по замерам балла облачности с помощью спектрорадиометров MODIS [20], установленных на американских спутниках NOAA. Среднее дневное значение PAR для пятнадцатого дня выбранного месяца использовалось как модельная оценка среднемесячного значения PAR (при условии постоянства балла облачности в течение этого дня). На основе полученной расчетной матрицы была сформирована база данных, позволяющая с помощью линейной интерполяции вычислять среднемесячные значения PAR для произвольно задаваемых географических координат, месяца года и типа поверхности.

Температура атмосферы в приземном слое также может быть оценена по спутниковым измерениям с приемлемой точностью. Для ее получения на основе данных MODIS ASCII Subsets над измерительными пунктами FLUXNET была установлена связь между яркостными температурами MODIS  $T_{я}$  и приземными температурами атмосферы  $T_a$ . Сопоставление данных годового хода яркостных температур  $T_{я}$ , определяемых MODIS во время ночного пролета над BOREAS NSA (2001), с данными температур атмосферы  $T_a$  непосредственно в приземном слое на этой станции позволило установить между ними количественную зависимость:

$$T_{a_k} = T_{я_k} + d_k,$$

где  $d_k$  — постоянная сдвига.

Эта зависимость использовалась для пересчета данных ночной температуры MODIS над лесхозами Красноярского края в необходимую для регрессий приземную  $T_a$ .

Значения температуры почвы  $T_s$  брались по наземным измерениям или климатическим данным. Чтобы уменьшить влияние ошибки  $T_s$  на погрешность определения NEE, значения среднемесячных величин  $T_s$  вычислялись за все годы наблюдений. Для Сибири значения  $T_s$  были взяты из данных Siberia Soil Temperature Station [21, 22]. В Западно-Сибирском регионе были выбраны данные 5 станций, включая Зотино, на различных широтах от 52 до 64° с.ш.: Нижне-Усинское 52,3° с.ш., 93,0° в.д. (Красноярский край), Тоора-Хем 52,5° с.ш., 96,0° в.д. (Тыва), Лосиноборское 58,5° с.ш., 89,5° в.д. (Красноярский край), Зотино 60,5° с.ш., 90,3° в.д. (Красноярский край), Учамы 63,8° с.ш., 96,3° в.д. (Эвенкийский АО). Для каждого месяца широтные зависимости  $T_s$  удовлетворительно аппроксимировались параболлами, что использовалось для получения данных  $T_s$  на координатной сетке 1×1°. Количество осадков  $Q_m$  для каждого из месяцев взято из объединенной базы данных Global Precipitation Climatology Project [23].

Для реалистичного тестирования регрессионной модели, предназначенной для ассимиляции спутниковых данных, были проведены оценки на-

копленных в течение года значений NEE с использованием измерений MODIS и метеорологических данных. Расчеты были проведены для периодов, когда время пролета MODIS совпадало со временем проведения наземных измерений потоков углерода на соответствующем сайте, что позволило задавать входные параметры регрессии по данным MODIS.

Исходя из этого, для обоих пунктов были отобраны измерения с 2001 по 2003 г. для BOREAS NSA и с 2000 по 2002 г. — для Зотино. Величины среднемесячных осадков  $Q_m$  для BOREAS NSA были определены по данным самой близкой метеорологической станции в Томпсоне (Thompson). Согласно полученным результатам, значения вычисленных по регрессиям NEE находятся в удовлетворительном согласии с измеренными NEE для обоих пунктов.

### Определение NEE в Красноярском крае из наземных и спутниковых данных

Красноярский край с севера до юга охватывает несколько разнообразных биомов — от тундры и тайги до лиственных лесов и степей. В связи с этим перед использованием модели следовало убедиться в наличии леса данного типа, а также в том, что возможные изменения естественных факторов лежат в тех же диапазонах, для которых были получены регрессионные зависимости. Как было установлено, на всех широтах средние значения изменений параметров  $T_a$ , PAR и  $Q_m$  лежат в пределах модели для хвойного леса. Модель для смешанного леса оказалась неприменимой: значения  $T_a$  для условий Красноярского края ниже диапазона  $T_a$  европейских и американского сайтов, по которым строилась эта модель. Сравнение диапазонов  $T_s$  для измерений и модели хвойного леса заставило отказаться от применения регрессионной зависимости в самой южной части региона 52–53° с.ш., так как температуры почв там были выше, чем допускала модель. Таким образом, на данном этапе только модель хвойного леса могла быть адекватно применена к условиям региона 54–64° с.ш., 84–102° в.д.

Необходимые параметры PAR,  $T_a$ ,  $T_s$ ,  $Q_m$  регрессионной модели для расчета годового баланса NEE Красноярского края за 2001 г., были подготовлены в виде специального блока данных, каждое значение которых соответствует ячейке поверхности 1×1° в пределах региона. Сюда вошли данные  $Q_f$  по среднегодовым осадкам, а также полученные аппроксимацией значения  $T_s$ . Расчет по средним значениям факторов и коэффициентам регрессии для хвойного леса позволил получить значения NEE для отдельных месяцев и всего 2001 г.

Для локальной области Зотино 1×1° в 2001 г. значение NEE составило  $-160 \text{ гС/м}^2/\text{год}$ . Эта величина находится в хорошем согласии с оценками [7, 8], которые дают диапазон от  $-156$  до  $-180 \text{ гС/м}^2/\text{год}$ .

## Построение карт NEE для лесхозов Красноярского края

Для оценки продуктивности лесных массивов и перехода от формальных расчетов NEE с разрешением  $1 \times 1^\circ$  к реалистической картине углеродного обмена необходимо было знать распределение различных типов леса по региону. Мы воспользовались картой земной поверхности Северной Евразии, созданной в рамках проекта GLC-2000. Карта с 1-км пространственным разрешением была построена по измерениям сенсора VEGETATION, установленного на борту исследовательского спутника SPOT-4. Легенда карты включает 27 типов поверхностей, определенных в соответствии с лесным законодательством и потребностями изучения глобальных изменений климата [24]. Оценка надежности этой карты была проведена путем сопоставления ее данных с классификационными данными по лесхозам Красноярского края, приведенными на сервере Российской лесной отрасли [25]. Табл. 2 демонстрирует удовлетворительное согласие этих независимых источников по Нижне-Енисейскому лесхозу, где расположена станция Зотино.

Таблица 2

Сравнение относительных площадей леса по карте GLC и по данным лесхоза

Относительная площадь	Карта GLC	Нижне-Енисейский лесхоз
Покрытая лесом площадь/вся площадь, %	77,8	75,7
Хвойный лес/весь лес, %	85,4	86,4

Эта детальная карта типов поверхности Северной Евразии использовалась в качестве маски наличия/отсутствия хвойного леса при построении реальных карт NEE, полученных по регрессионным расчетам на координатной сетке  $1 \times 1^\circ$ .

Карты NEE (рис. 3) иллюстрируют пространственное и сезонное распределение источников и стоков  $\text{CO}_2$  в Красноярском крае для отдельных месяцев и всего года.

Рис. 3 позволяет наблюдать картину сезонного изменения по широтам региона, отслеживать динамику источников и стоков: одни и те же участки леса могут как поглощать, так и выделять  $\text{CO}_2$ . С наступлением теплого сезона (рис. 3, а) в южных районах ( $54^\circ$  с.ш.) начинает расти количество поглощенного за счет фотосинтеза углерода: до  $-1,7 \text{ гС/м}^2/\text{день}$  в мае. В этом же месяце на севере ( $64^\circ$  с.ш.) эта величина составляет в среднем не более  $-0,5 \text{ гС/м}^2/\text{день}$ . По мере потепления в более высоких широтах стоки увеличиваются, а в южных падают. К августу (рис. 3, б) стоки на юге региона приобретают большую изменчивость (от  $-2$  до  $0 \text{ гС/м}^2/\text{день}$ ) в зависимости от локальных условий, а на более северных широтах  $59-64^\circ$  с.ш. идет мощная аккумуляция  $\text{CO}_2$ , поглощение возрастает до  $-3,5 \text{ гС/м}^2/\text{день}$ . В октябре (рис. 3, в) заканчивается вегетационный сезон и, начиная

с северных широт, лесная экосистема становится слабым источником  $\text{CO}_2$  (до  $+0,6 \text{ гС/м}^2/\text{день}$  в октябре). Согласно расчетам за полный вегетационный сезон большая часть Красноярского края, покрытая хвойными лесами, является чистым поглотителем  $\text{CO}_2$  с высокой активностью аккумуляции до  $300 \text{ гС/м}^2/\text{год}$ . Наибольший сток углерода имеет место в высоких широтах.

На картах поглощение отмечено градициями зеленого цвета в соответствии с изменением NEE. Наиболее темный цвет соответствует максимуму поглощения (минимальному значению NEE). Белым цветом выделены области, где лесов нет. Розовым цветом без оттенков на карте октября (рис. 3, в) обозначено слабое выделение  $\text{CO}_2$ . Интересно отметить, что в южной части региона  $54-55,5^\circ$  с.ш.,  $94-99^\circ$  в.д. наблюдается характерное пятно повышенного стока, повторяющее форму отрогов Саянского хребта. Это может быть связано с особым температурным режимом высокогорья.

Построенные карты NEE позволяют делать реалистические оценки распределения локальных потоков  $\text{CO}_2$ . Наиболее высокие величины годового стока  $\text{CO}_2$  для хвойных лесов (рис. 3, г) наблюдаются в широтах  $59-62^\circ$  с.ш.

## Заключение

На основе данных FLUXNET по обмену  $\text{CO}_2$  в лесах бореальной зоны Америки, Европы и Азии созданы линейные регрессионные модели для оценки углеродного баланса, связывающие величину газообмена NEE с параметрами атмосферы и состоянием лесных экосистем. Оценены границы применимости моделей.

Результаты модельных расчетов углеродного обмена в бореальных лесах на сайтах NSA BOREAS (Manitoba, Канада) и Зотино (Красноярский край, Россия) продемонстрировали удовлетворительное согласие с измеренными величинами. Расчетные значения NEE, вычисляемые по регрессионным моделям для хвойных лесов, коррелируют с экспериментальными с коэффициентом корреляции 0,91. Для хвойных лесов среднегодовая ошибка модели составляет  $50 \text{ гС/м}^2/\text{год}$ , для смешанных лесов  $60 \text{ гС/м}^2/\text{год}$ .

На основе полученной регрессионной модели для хвойных лесов с использованием в качестве исходных данных результатов спутниковых и наземных метеорологических наблюдений проведен расчет среднемесячных значений NEE в 2001 г. в Красноярском крае. Получены оценки сезонной динамики поглощения (эмиссии)  $\text{CO}_2$  по широтам региона. С использованием детальных спутниковых данных по распределению и типам растительного покрова построены среднемесячные и годовые карты NEE, которые позволяют делать реалистические оценки распределения локальных потоков  $\text{CO}_2$  в Красноярском крае. Согласно расчетам за полный вегетационный сезон большая часть Красноярского края, покрытая хвойными лесами, является чистым поглотителем  $\text{CO}_2$  с высокой активностью аккумуляции

до 300 гС/м<sup>2</sup>/год. Наиболее высокие значения годового стока СО<sub>2</sub> наблюдаются в северных широтах (59–62°) Красноярского края.

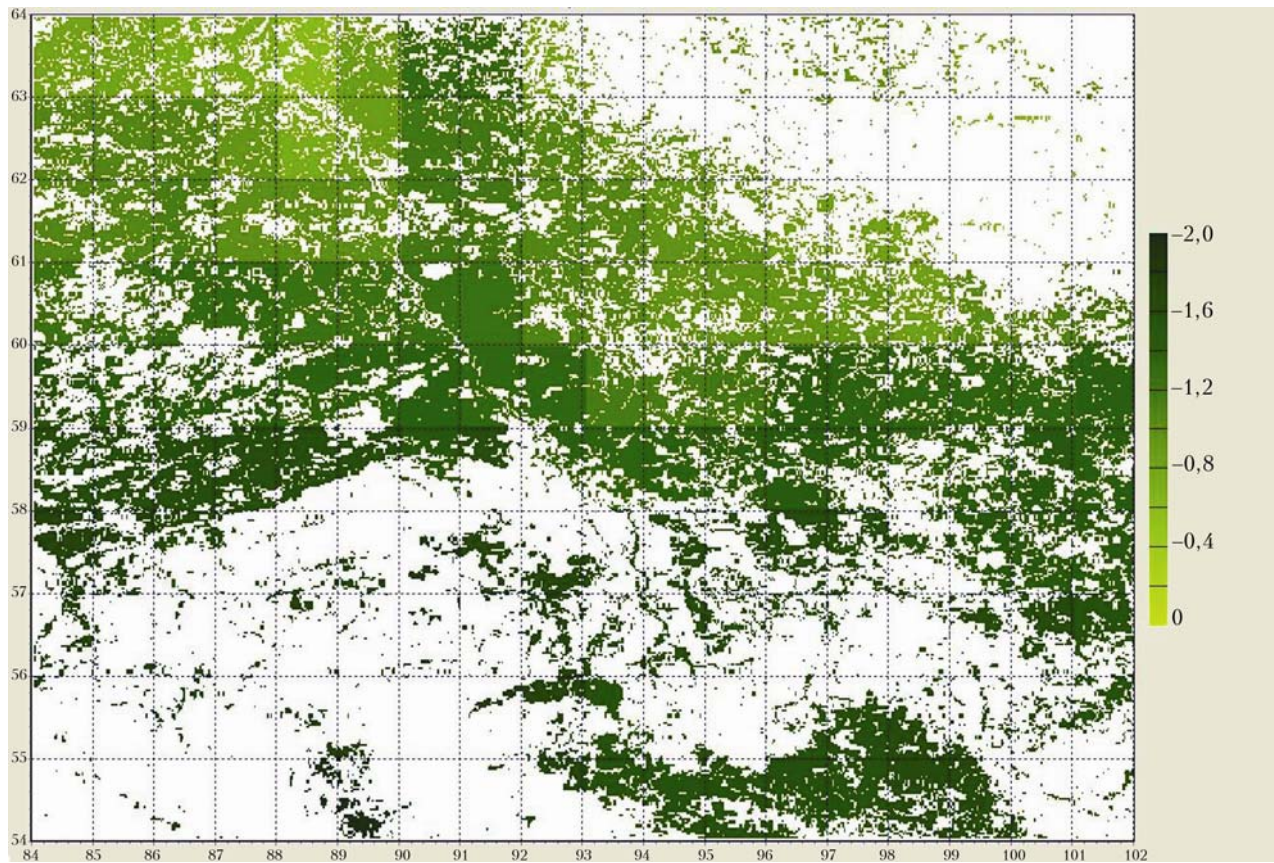
Работа выполнена при финансовой поддержке Международного научно-технического центра (проект № 3529).

1. <http://www.fluxnet.ornl.gov/fluxnet/index.cfm>
2. Ваганов Е.А., Ведрова Э.Ф., Верховец С.В., Ефремов С.П., Ефремова Т.Т., Круглов В.Б., Онучин А.А., Сухинин А.И., Шибистова О.Б. Леса и болота Сибири в глобальном цикле углерода // Сиб. экол. ж. 2005. Т. 12. № 4. С. 631–649.
3. Goulden M.L., Munger J.W., Fan S.M., Daube B.C., Wofsy S.C. Measurements of carbon storage by long-term eddy correlation: Methods and a critical evaluation of accuracy // Glob. Change Biol. 1996. V. 2. N 3. P. 169–182.
4. <http://public.ornl.gov/ameriflux/>
5. <http://www.carboeurope.org/>
6. [http://www.bgc-jena.mpg.de/public/carboeur/data/index\\_d.html](http://www.bgc-jena.mpg.de/public/carboeur/data/index_d.html)
7. <http://www.unitus.it/dipartimenti/disafri/progetti/eflux/euro.html>
8. Lloyd J., Shibistova O., Zolotukhin D., Kolle O., Arneeth A., Wirth Ch., Styles J., Tchebakova N. Schulze E.-D. Seasonal and annual variation in the photosynthetic productivity and carbon balance of a Central Siberian pine forest // Tellus. 2002. V. 54B. N 5. P. 590–610.
9. Lafont S., Kergoat L., Dedieu G., Chvrillard A., Kastens U., Kolle O. Spatial and temporal variability of land CO<sub>2</sub> fluxes estimated with remote sensing and analysis data over western Eurasia // Tellus. 2002. V. 54B. N 5. P. 820–833.
10. TCOS Siberia, 2003: Proposal EVK2-2002-00555. [http://www.bgc-jena.mpg.de/public/carboeur/web\\_TCOS/](http://www.bgc-jena.mpg.de/public/carboeur/web_TCOS/)
11. Belward A., Loveland T. The DIS 1km Land Cover Data Set, 1996, GLOBAL CHANGE // The IGBP Newslett. 1996. N 27. Sep. <http://www-surf.larc.nasa.gov/surf/pages/explan.html>
12. Goulden M.L., Daube B.C., Fan S.M., Sutton D.J., Bazzaz A., Munger J.W., Wofsy S.C. Physiological responses of a black spruce forest to weather // J. Geophys. Res. D. 1997. V. 102. N 24. P. 28987–28996.
13. Goulden M.L., Wofsy S.C., Harden J.W., Trumbore S.E., Crill P.M., Gower S.T., Fries T., Daube B.C., Fan S.M., Sutton D.J., Bazzaz A., Munger J.W. Sensitivity of Boreal Forest Carbon Balance to Soil Thaw // Science. 1998. V. 279. N 5348. P. 214–217.
14. Wofsy S.C., Dunn A. BOREAS Follow-On FLX-01 NSA-OBS Derived Data – NEE, GEE, and Respiration. 2001. Data set. Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A. <http://daac.ornl.gov>
15. <http://www.sfu-kras.ru/science/achievement/zotto>
16. <http://www.fluxnet.ornl.gov/fluxnet/sitepage.cfm?siteid=721>
17. Leemans and Cramer Climatic Database. Potsdam Institute of Climate Impact Research. 1996. Personal communication.
18. Zhuravleva T.B., Firsov K.M. Algorithms of calculations of spectral fluxes of solar radiation in the cloudy and clear-sky atmosphere // Atmos. Ocean. Opt. 2004. V. 17. N 11. P. 903–911.
19. Zhuravleva T.B., Rublev A.N., Udalova T.A., Chesnokova T.Yu. On calculation of photosynthetically active radiation in estimation of carbon balance parameters of surface ecosystems // Atmos. Ocean. Opt. 2006. V. 19. N 1. P. 64–68.
20. Modis/Terra Atmosphere Monthly Global Product, [http://g0dup05u.ecs.nasa.gov/Giovanni/modis.MOD08\\_M3.shtml](http://g0dup05u.ecs.nasa.gov/Giovanni/modis.MOD08_M3.shtml)
21. Russian Soil Temperature Stations // <ftp://sidads.colorado.edu/pub/datasets/arcss/data/arcss078/>
22. Stolbovoi V., Savin I. Maps of soil characteristics // Stolbovoi V. and I. McCallum. 2002. CD-ROM Land Resources of Russia. Laxenburg, Austria: International Institute for Applied Systems Analysis and the Russian Academy of Science. CD-ROM. Distributed by the National Snow and Ice Data Center/World Data Center for Glaciology, Boulder.
23. Global Precipitation Climatology Project (GPCP) // <http://cics.umd.edu/~yin/GPCP/main.html>
24. Global Land Cover 2000 (GLC2000) Maps // [http://www-gvm.jrc.it/glc2000/input\\_data.htm](http://www-gvm.jrc.it/glc2000/input_data.htm)
25. <http://www.rwt.ru>

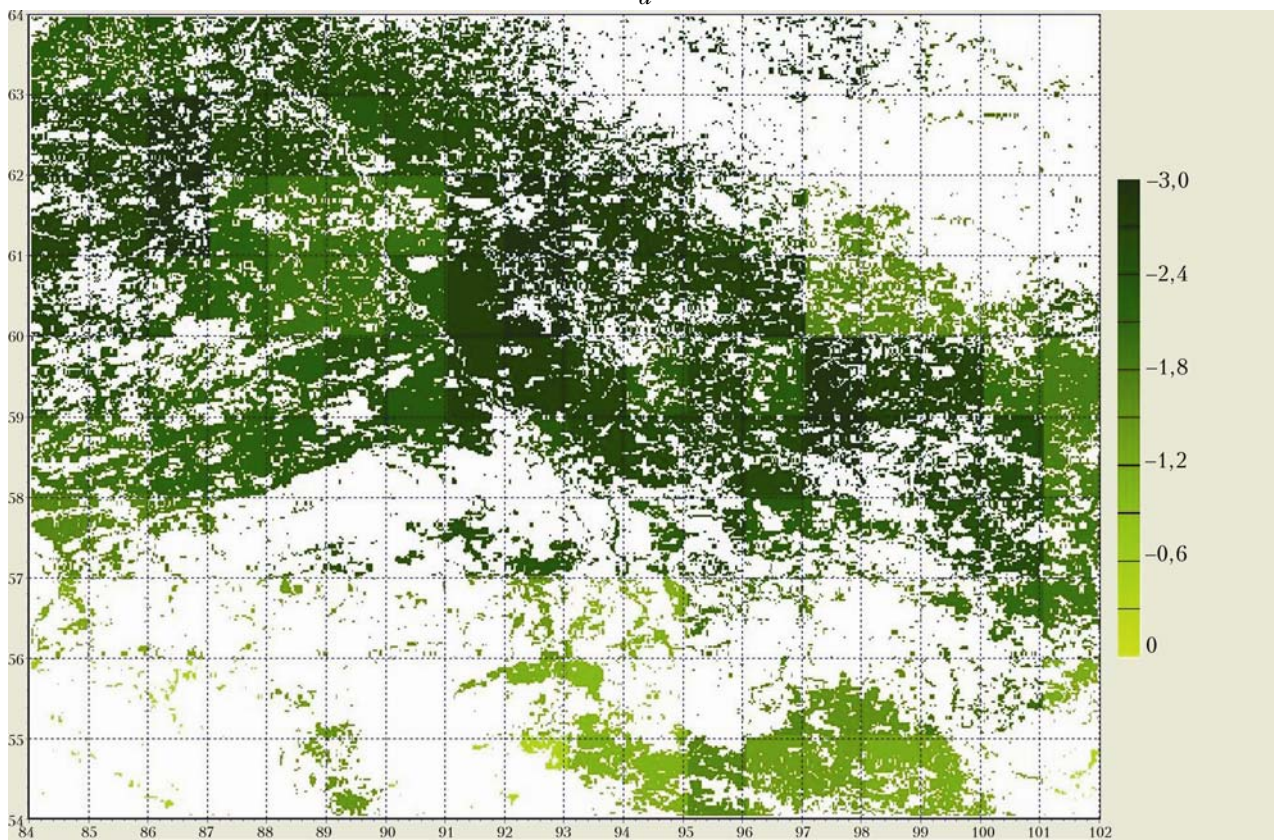
**A.N. Rublev, G.Yu. Grigoriev, T.A. Udalova, T.B. Zhuravleva. Regression models to estimate carbon exchange in boreal forests.**

Linear regression models to estimate carbon balance of boreal forests have been developed on the basis of CO<sub>2</sub> flux measurements at several sites of the FLUXNET global network. Model estimations are in a satisfactory agreement with the data of the measurement taken in boreal forests of Canada (Manitoba, Thompson) and Russia (Krasnoyarsk region, Zotino). The correlation coefficient between calculated and measured values for needle forests is better than 0,9, while the annual regression model error versus experimental balance results is within 50 гС/м<sup>2</sup>/year.

Monthly average values of the carbon balance for needle forests of the Krasnoyarsk region in 2001 were derived from ground-based and satellite meteorological data. Proceeding from satellite-derived data for vegetable cover types, maps of monthly average and annual carbon balance have been plotted, which illustrate a spatial-temporal distribution of CO<sub>2</sub> absorption or emission intensity. It was shown that the major part of needle forests in the Krasnoyarsk region is CO<sub>2</sub> sink with absorption of up to 300 гС/м<sup>2</sup>/year during the complete vegetative season.



*a*



*б*

Рис. 3. Углеродный баланс хвойных лесов Красноярского края в 2001 г. Карты значений NEE ( $\text{гC}/\text{м}^2/\text{день}$ ) среднемесячных: май (*a*); август (*б*); октябрь (*в*); годового (*г*). Отрицательные значения NEE (зеленый цвет) соответствуют поглощению углерода лесом, положительные (розовый) – выделению

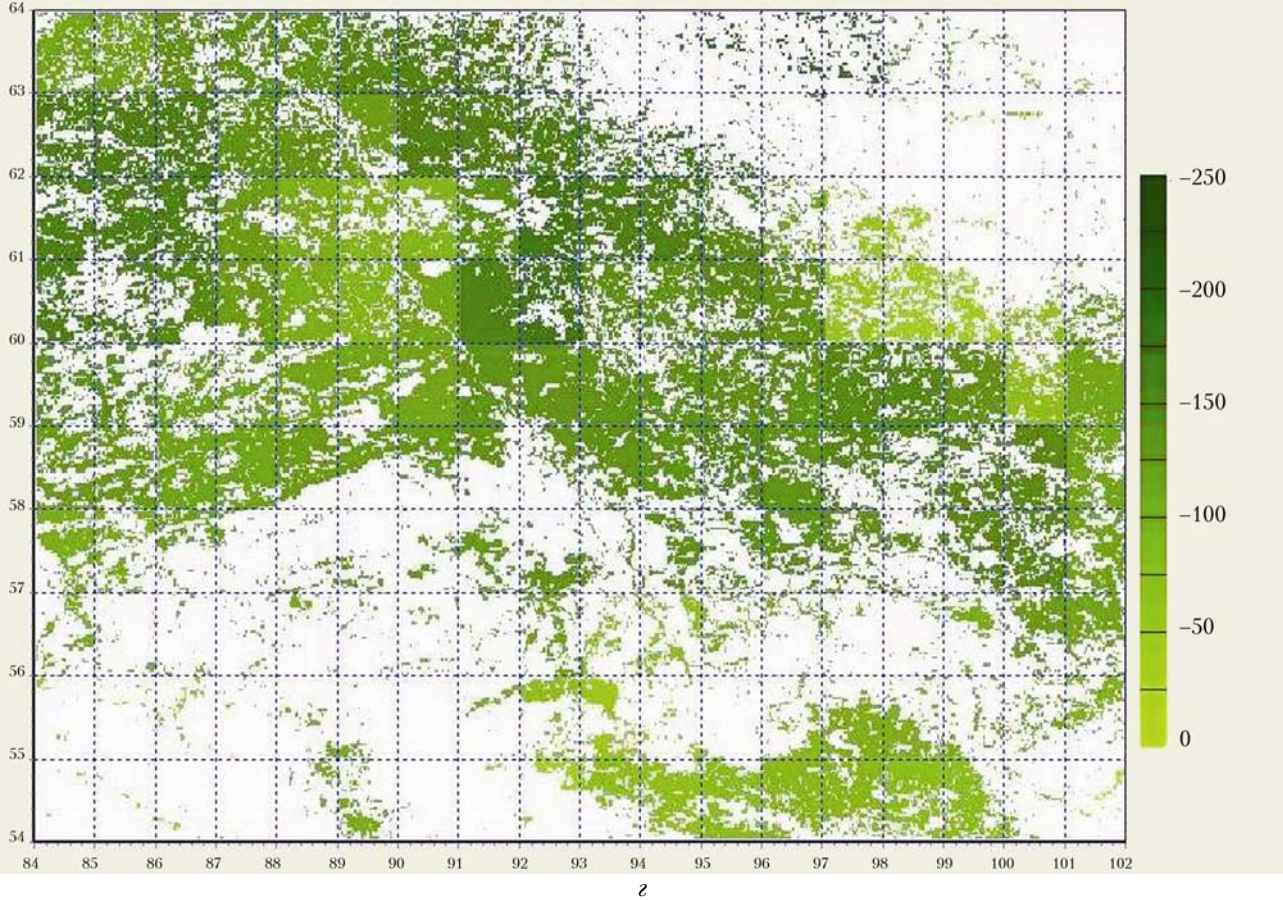
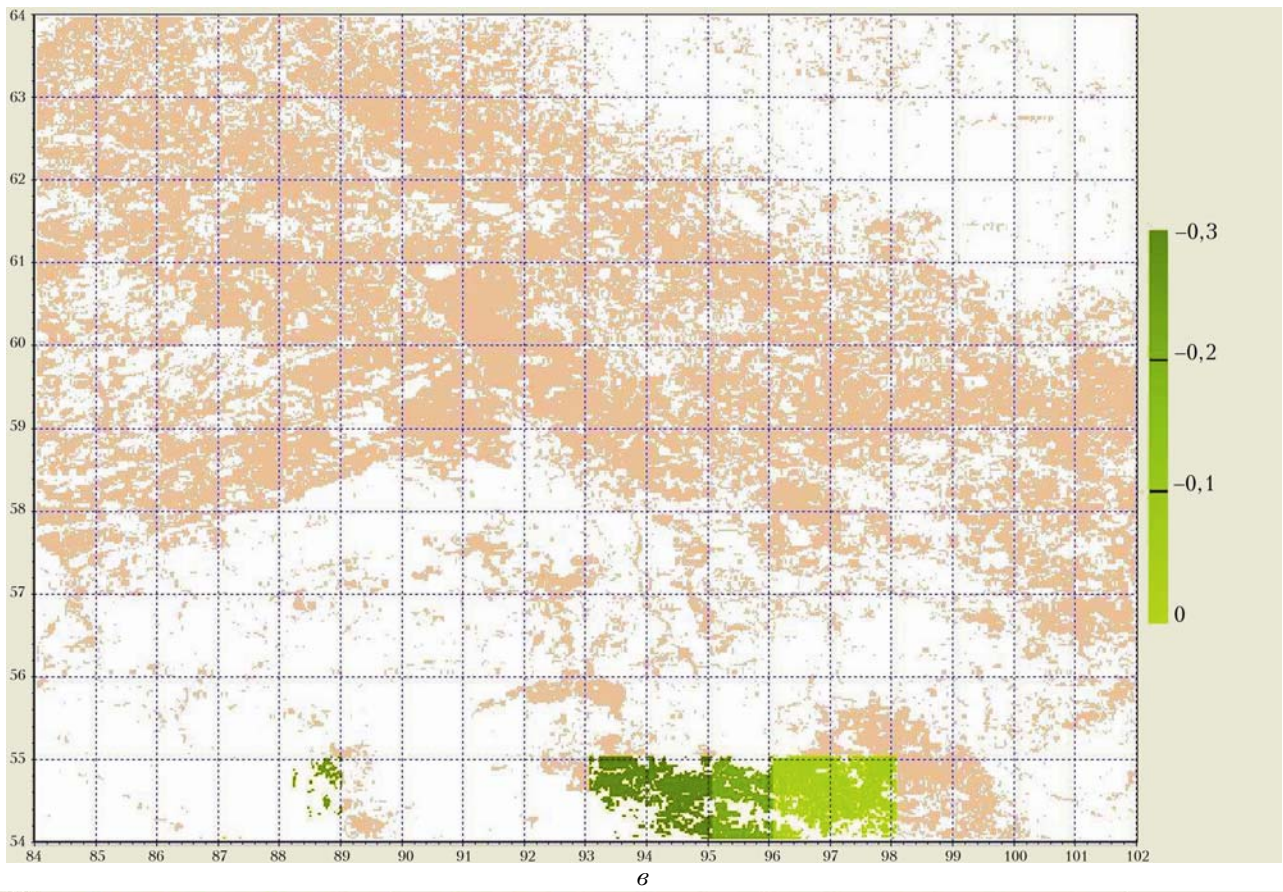


Рис. 3 (окончание)