

Использование спутниковых изображений для оценки потерь углерода лесными экосистемами в результате вырубок

С.А. Барталев¹, Т.С. Ховратович¹, В.В. Елсаков²

¹*Институт космических исследований РАН*

E-mail: beml@smis.iki.rssi.ru

²*Институт биологии Коми НЦ УрО РАН*

E-mail: elsakov@ib.komisc.ru

В работе предлагается новый подход к оценке потерь углерода в лесах в результате вырубок на основе совместного использования спутниковых изображений и данных выборочных наземных обследований. Разработаны методы оценки по спутниковым изображениям породной структуры, полноты и возраста насаждений с использованием линейной модели спектрального смешения. Приведены результаты экспериментальных исследований по применению данного подхода для оценки потерь углерода в лесах тестового участка на территории Республики Коми.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, эмиссия углерода, запас углерода, вырубка лесов, породная структура насаждений, полнота насаждений, возраст насаждений.

Введение

Оценка запасов углерода в лесах, а также потоков углерода между лесными экосистемами и другими компонентами геосистемы является важной задачей глобальной экологии и климатологии. Вырубки, как главный фактор антропогенной трансформации лесного покрова, в значительной мере определяют динамику запасов и потоков углерода в лесах [1].

Для определения связанных с рубками потерь углерода лесными экосистемами необходимо наличие данных об удельной фитомассе насаждений и площадях вырубленных лесов, которые в настоящее время получают по материалам лесоустройства и статистической отчетности лесного хозяйства. К ограничениям данного подхода относится недостаточная регулярность обновления данных лесоустройства (в зависимости от региона РФ данные обновляются с периодичностью 10-15 лет и реже) и неполнота данных статистической отчетности, не содержащих, в частности, данные о нелегальных вырубках.

Одним из возможных источников эффективного получения актуальных данных для оценки потерь углерода лесными экосистемами в результате вырубок могут стать спутниковые системы дистанционного зондирования Земли.

В основу предложенного в настоящей работе подхода положено использование для обработки многоспектральных спутниковых изображений метода декомпозиции спектральных смесей, который в контексте рассматриваемой проблемы может применяться для решения широкого круга задач, включая собственно детектирование вырубок, оценку породного состава насаждений, сомкнутости древесного полога и некоторых других характеристик лесов.

Тестовый регион и экспериментальные данные

В качестве тестового участка для проведения исследований был выбран Междуреченский лесхоз Республики Коми, площадью около 958408 га и лесистостью 93%. В составе насаждений участка преобладают хвойные породы, занимающие 79.6% от лесопокрытой площади при доминировании еловых лесов. Средний возраст еловых насаждений составляет 150-160 лет.

Междуреченский лесхоз относится к региону интенсивной лесозаготовки. Здесь леса, отведенные для рубок главного пользования, составляют 91 % от лесопокрытой площади и 86% от общих запасов древесины.

Повыдельная база данных лесоустройства Вашкинского лесничества, площадь которого занимает около 6% территории лесхоза, послужила источником опорной информации для проведения экспериментальных исследований. База данных содержит, в частности, такие параметры насаждений, как породный состав, класс бонитета, возраст, полнота и высота древостоев, средний диаметр стволов и удельные запасы древесины.

Использованные в исследованиях спутниковые изображения тестового участка представлены в таблице 1. Изображения были переведены в систему координат UTM и пространственно совмещены между собой с уровнем среднеквадратической ошибки, не превышающей размер элемента пространственного разрешения изображений Landsat-TM/ETM+ (28,5 м).

Таблица 1. Экспериментальные данные спутниковых наблюдений тестового участка

Дата съемки	Спутниковая система
03.08.1989	Landsat-TM
01.06.1995	Landsat-TM
11.07.2001	Landsat-ETM+
06.06.2002	Landsat-ETM+
29.06.2004	Метеор-3М/МСУ-Э

Указанные спутниковые изображения были использованы для построения карты основных типов растительного покрова тестового участка и динамики вырубок лесов за весь период наблюдений [2].

Метод оценки потерь углерода

Предложенный метод оценки вызванных рубками потерь углерода лесными экосистемами на основе спутниковых изображений предполагает выполнение следующих этапов:

- получение заранее заданного множества чистых компонент на основе декомпозиции спутниковых изображений с помощью линейной модели спектральных смесей;
- вычисление на основе полученного множества чистых компонент индексов породной структуры и сомкнутости насаждений;
- восстановление зависимостей между индексами породной структуры и сомкнутости насаждений, а также характеристиками насаждений по данным выборочного наземного обследования;
- оценка запасов углерода в лесах на основе восстановленных по спутниковым изображениям характеристик насаждений и имеющихся моделей;
- оценка объемов потерь углерода лесными экосистемами на основе выявленных по спутниковым изображениям участков вырубок леса и пространственных данных о запасах углерода в насаждениях.

Метод декомпозиции спектральных смесей

При использовании данных спутниковых наблюдений для мониторинга лесов часто существует необходимость дифференцированного рассмотрения и измерения площадей объектов, более мелких по сравнению с пространственным разрешением изображений. В зависимости от пространственного разрешения используемых изображений, это могут быть задачи определения породной структуры насаждений или состояния лесовозобновления на вырубках и гарях, оценки

степени повреждения насаждений пожарами, насекомыми и болезнями. Использование традиционных методов классификации спутниковых изображений для решения такого рода задач сопряжено с рядом ограничений. Получаемые этими методами оценки, как правило, не могут быть естественным образом выражены в количественных шкалах, а точность результатов в значительной мере зависит от степени пространственной однородности насаждений в пределах пикселей изображений. Эти ограничения являются следствием принципа классификации, ставящего целью отнесение каждого пиксела только к одному классу заданного множества на основе решающего правила, разбивающего пространство признаков на соответствующие классам области. В случаях неоднородной территории и, следовательно, наличия значительного числа смешанных пикселей двух различных типов объектов, оценка площадей объектов по результатам классификации может приводить к уровню ошибки до 50%. В качестве альтернативы методы декомпозиции спектральных смесей предполагают количественную оценку относительной доли участия в пикселе каждого рассматриваемого класса.

В основе оценки площадей объектов на подпиксельном уровне лежит известное положение о том, что регистрируемое спутником излучение интегрирует всю радиацию, отражаемую попадающим в поле зрения прибора участком подстилающей поверхности, а соответствующая пикселу яркость может быть выражена линейной функцией взвешенных яркостей отдельных типов объектов или компонентов [3-5]. При этом вес компонент принимается пропорциональным их площади в проекции пиксела на земную поверхность, что позволяет оценить площади компонент в пикселах изображения на основе решения системы линейных уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^I eps_i^2 \rightarrow \min \\ R_i = \sum_{k=1}^K m_k R_{ik} + eps_i \\ \sum_{k=1}^K m_k = 1 \end{cases} \quad (1)$$

где i - индекс спектрального канала спутникового прибора ($i=1, I$), k - индекс оцениваемой компоненты ($k=1, K$), R_i - значение яркости произвольного пиксела в i -ом спектральном канале, R_{ik} - значение яркости k -ой компоненты в i -ом спектральном канале, m_k - доля площади k -ой компоненты в пикселе; eps_i - погрешность измерения яркости в i -ом спектральном канале.

Входными данными для линейной модели спектральных смесей являются набор яркостей чистых компонент и значение в каждом из каналов изображения. Применяя данную модель можно получить относительное содержание чистых компонент в пикселе, так, например, как представлено на рисунке 1.

В общем случае, определение элементов множества чистых компонент - сложная задача, требующая экспертных знаний о территории и анализа делимости соответствующих объектов земной поверхности в пространстве спектральных яркостей. От того, насколько удачно будут выбраны элементы множества компонент и насколько точно оценены значения спектральных яркостей чистых компонент (опорные значения спектральных яркостей), существенно зависит и результат декомпозиции [6].

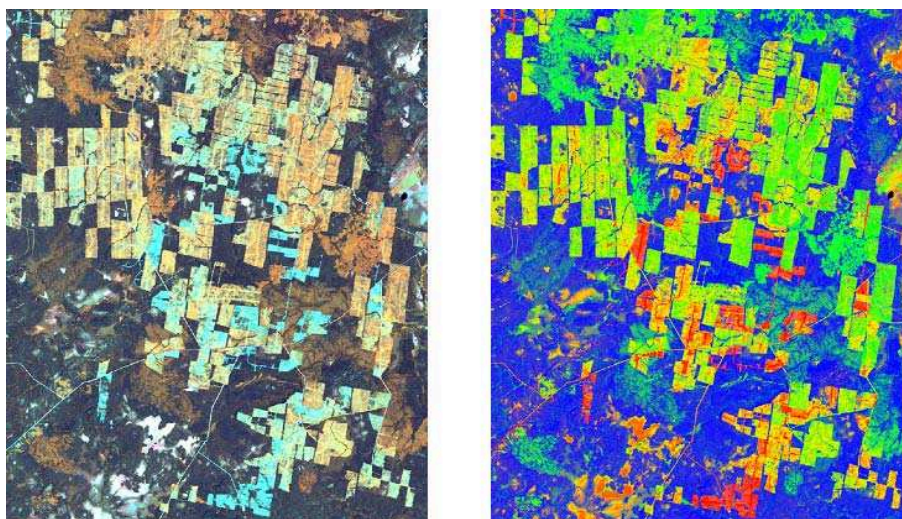


Рис. 1. Фрагменты изображения Landsat-ETM+ (слева) и фрагмент этого же изображения, разложенного на три компонента (*R* – открытая почва, *G* – лиственный лес, *B* – хвойный лес)

Оценка характеристик лесов на основе спутниковых изображений

Исходя из анализа имеющихся моделей оценки запасов углерода в лесных экосистемах и необходимых для их использования данных о характеристиках лесов, выполненные эксперименты были направлены на исследование возможностей определения породной структуры, полноты и возраста насаждений на основе спутниковых изображений и выборочных данных наземного обследования. Метод декомпозиции спектральных смесей при этом был использован для оценки относительного содержания в каждом пикселе временной серии спутниковых изображений Landsat-TM/ETM+ и Метеор/МСУ-Э следующих трех чистых компонент: кроны хвойных деревьев, кроны лиственных деревьев и участки открытой почвы.

Полученные значения чистых компонент могут быть использованы для формирования тематических индексов фокусированных на оценку различных характеристик лесов, таких как породный состав и полнота с последующей их калибровкой по выборочным наземным данным на основе предварительно установленных корреляционных связей.

Оценка породной структуры

Индекс породной структуры SI вычисляется на основе данных о соотношении площади кроны деревьев хвойных и лиственных пород в каждом пикселе спутникового изображения согласно следующему выражению:

$$SI = \frac{S_c - S_d}{S_c + S_d},$$

где S_c – доля площади кроны хвойных деревьев, а S_d – доля площади кроны лиственных деревьев.

Аналогичный индекс SI_d может быть вычислен по данным о запасах стволовой древесины обеих групп древесных пород на основе информации лесоустройства.

Представленная на рисунке 2 зависимость между значениями SI и SI_d на уровне лесоустроительных выделов (значения SI усреднялись в границах выделов) была использована для оценки соотношения запасов хвойных и лиственных пород в насаждениях.

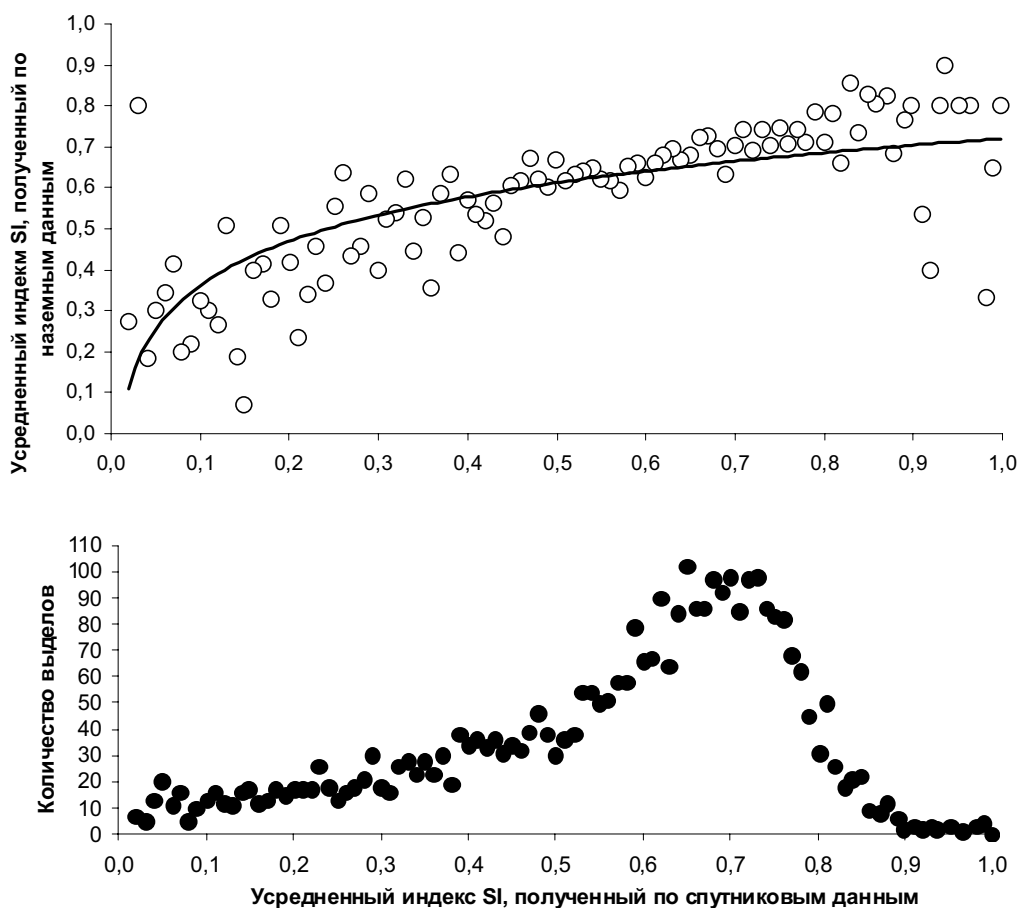


Рис. 2. Связь между индексами породного состава, полученными по данным Landsat-ETM+ (SI) и инвентаризации лесов соответственно (SI_d)

Оценка полноты насаждений

Оценка полноты насаждений выполнялась на основе данных о сомкнутости насаждений, или иными словами, доли площади земной поверхности, покрытой кронами деревьев всех пород, которая вычислялась по результатам разложения каждого пиксела спутникового изображения на соответствующие чистые компоненты. Зависимость средних для выделов значений сомкнутости по результатам обработки спутникового изображения и полноты по данным инвентаризации лесов представлена на рисунке 2, из которого можно также сделать вывод о наличии корреляции между указанными характеристиками и росте тесноты связи по мере увеличения объема статистической выборки.

При оценке возраста древостоев использовалась типичная для темнохвойных лесов региона закономерность сукцессионного развития насаждений, согласно которой лесовозобновление и дальнейший рост лесов на вырубках начинаясь с лиственных пород постепенно замещается хвойными до полного их доминирования [7]. Наличие такого рода закономерности открывает возможность оценки возраста насаждений на основе индекса породного состава SI , полученного по спутниковым данным на основе метода декомпозиции спектральных смесей. Зависимость между возрастом насаждений A по данным лесоинвентаризации и индексом породного состава SI , полученным по спутниковым данным, представлена на рисунке 3. Очевидно, что при положительных значениях индекса SI , соответствующих насаждениям старше 125 лет, наблюдается достаточно хорошая корреляция между указанными параметрами. Данный возраст характерен для спелых насаждений, пригодных для промышленных рубок, что позволяет использовать полученные закономерности для оценки потерь углерода лесными экосистемами в связи с рубками.

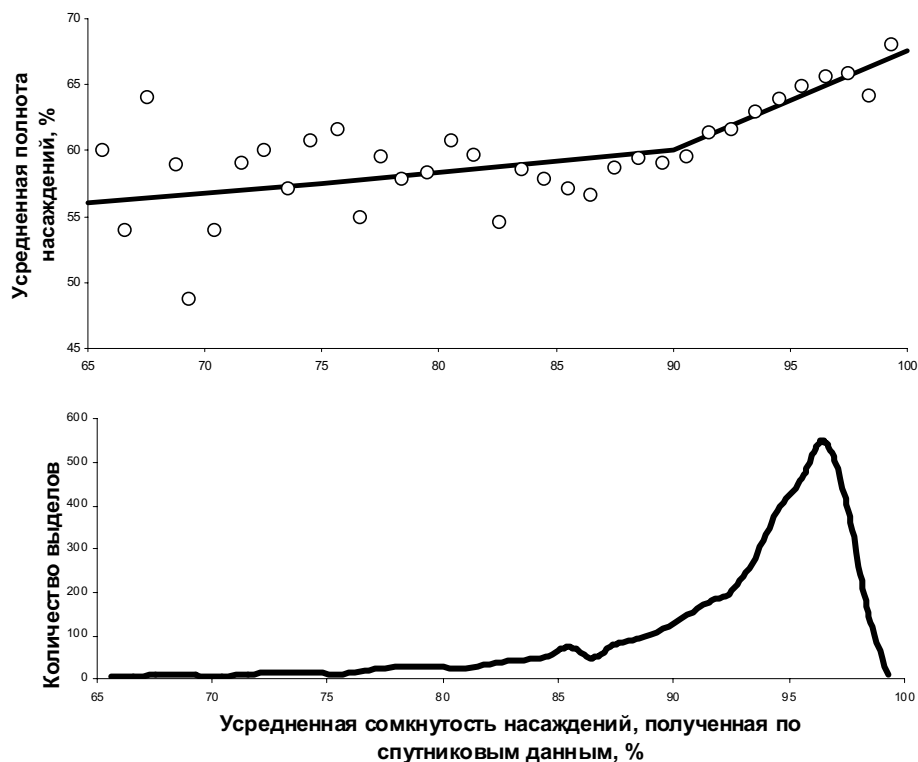


Рис. 3. Связь между сомкнутостью крон, полученной по спутниковому изображению Landsat-ETM+, и полнотой насаждений по данным лесоустройства

Оценка возраста насаждений

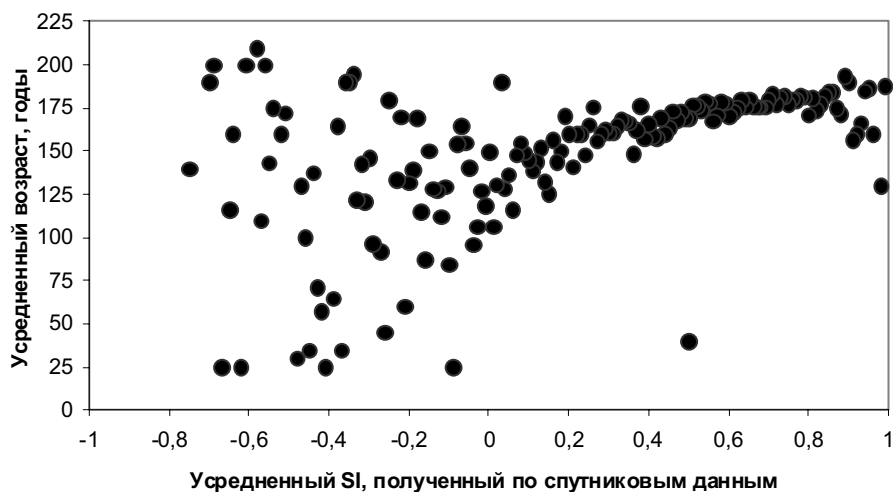


Рис. 3. Зависимость между возрастом насаждений и значениями индекса породного состава SI по спутниковому изображению Landsat-TM

Оценка запасов углерода в лесах

Полученные характеристики насаждений, такие как породный состав, полнота и возраст, могут быть использованы для оценки запасов углерода в лесах на основе разработанной в Международном институте прикладного системного анализа (IIASA) модели [8]. Согласно

предложенной модели запас углерода в лесах может быть вычислен с использованием следующего простого выражения:

$$C = \gamma P,$$

где γ – коэффициент пересчета органических соединений в углерод, равный 0.5;

C – масса углерода;

P – фитомасса.

Фитомасса может быть получена как сумма нескольких компонент:

$$P = \sum_{i=1}^5 M_i^t + \sum_{i=1}^2 M_i^g$$

где M_i^t – фитомасса, зависящая от фракций деревьев, M_i^g – фитомасса, зависящая от фракций деревьев, которые вычисляются по формулам:

$$M_i^t = 0.1 * S * \sum_{j=1}^n (C_j * GS_j * R_{ij})$$

$$M_i^g = S * \sum_{j=1}^n (C_j * K_{ij})$$

В двух последних формулах S означает площадь вырубki, n – количество пород в породном составе, C_j – доля породы j в породном составе и GS_j – запас. Оставшиеся коэффициенты определяются следующим образом:

$$R_{ij} = \begin{cases} c_0^{ij} I^{c_1^{ij}} A^{(c_2^{ij} + c_3^{ij} RS + c_4^{ij} RS^2)}, & \text{если порода } j - \text{ сосна} \\ c_0^{ij} A^{c_1^{ij}} I^{c_2^{ij}} RS^{c_3^{ij}} e^{(c_4^{ij} A + c_5^{ij} RS)}, & \text{иначе} \end{cases}$$

$$K_{ij} = c_0^{ij} A^{c_1^{ij}} I^{c_2^{ij}} RS^{c_3^{ij}} e^{(c_4^{ij} A + c_5^{ij} RS)}$$

где I – бонитет, A – возраст, RS – полнота, c_0^{ij} , c_1^{ij} , c_2^{ij} , c_3^{ij} , c_4^{ij} , c_5^{ij} – коэффициенты.

Результаты экспериментов

Оценка на основе описанного выше метода возраста, полноты и породного состава насаждений выполнялась с использованием спутниковых изображений Landsat-ETM+ и выборочных данных лесоинвентаризации тестового участка.

Для декомпозиции изображений Landsat-ETM+ использовались спектральные каналы TM2, TM3, TM4 и TM5, совокупность которых обеспечивает достаточно хорошую разделимость хвойных и лиственных лесов, а также участков открытой почвы. Зависимость индексов породного состава по спутниковым изображениям и данным инвентаризации, была аппроксимирована следующим образом:

$$SI_d = \begin{cases} 0.16 \ln(SI) + 0.72, & \text{if } SI \geq 0, \\ 0.91SI + 0.14, & \text{if } SI < 0. \end{cases}$$

Данная зависимость была использована для оценки соотношения запасов хвойных и лиственных пород на тестовом участке.

Зависимость между сомкнутостью древесного полога и полнотой насаждений была приближена следующей кусочно-линейной функцией:

$$RS = \begin{cases} 0.755CD - 7.8821, & \text{if } CD \geq 90, \\ 0.1673CD + 45.012, & \text{if } CD < 90 \text{ and } CD \geq 65. \end{cases}$$

где RS – полнота древостоя и CD – сомкнутость крон.

Использование данной функциональной зависимости позволило оценить полноту древостоя на тестовом участке.

Зависимость между возрастом насаждений A и индексом породного состава SI была описана следующим уравнением:

$$A = \exp\left(\frac{SI + 1.2437}{0.3463}\right), SI \geq 0.$$

Применение полученных зависимостей позволило оценить значения индекса породного состава, полноты и возраста насаждений тестового участка. В качестве значений класса бонитета и запаса спелых насаждений были использованы средние для используемой опорной выборки наземных данных оценки, составившие соответственно $SI=9$ и $GS=138,807$ м³/га.

Так как коэффициенты модели, используемые для оценки фитомассы сосны и других хвойных пород, значительно различаются, при построении по изображениям Landsat-ETM+ карты типов лесного покрова насаждения ели и сосны выделялись в отдельные классы [4]. Для лиственных пород в модели использовались коэффициенты, соответствующие березе, как самой распространенной на тестовом участке лиственной породе.

Полученные оценки потерь углерода лесами тестового участка в результате вырубок представлены в таблице 2.

Таблица 2. Среднегодовые потери углерода лесами в результате вырубок на тестовом участке в период с 1989 по 2004 годы (т/га)

Период	1989-1995	1995-2001	2001-2002	2002-2004
Оценка потерь углерода с использованием спутниковых данных	57.45	58.45	57.18	58.89
Оценка потерь углерода с использованием данных официальной статистики	53.05	53.09	40.34	44.06

Следует отметить, что сопоставление, полученных по спутниковым изображениям, объемов потерянного лесами углерода с оценками на основе данных официальной статистики по запасам вырубленного леса показывает довольно близкие результаты и сходную временную динамику (таблица 2, рисунок 4).

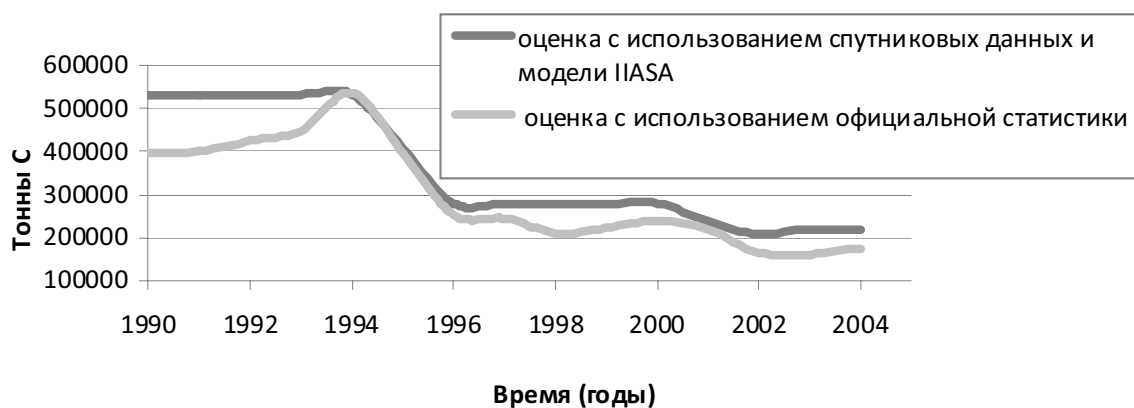


Рис. 4. Сравнение динамики потерь углерода на тестовом участке, полученных с помощью спутниковых изображений и данных официальной статистики по объемам вырубок

Таким образом, предложенный метод оценки потерь углерода лесами в результате вырубок позволяет существенно снизить зависимость от наличия данных наземного обследования за счет использования многоспектральных спутниковых изображений. В тоже время необходимо отметить, что одним из наиболее существенных ограничений данного подхода является его применимость главным образом к лесам темнохвойной тайги, характерной для регионов Европейского Севера, Центральной Сибири и Дальнего Востока.

Авторы считают своим приятным долгом выразить признательность профессору А.З. Швиденко за консультации и предоставленные материалы по вопросам использования, разработанной в Международном институте прикладного системного анализа, модели оценки запасов углерода в лесах.

Литература

1. *Исаев А.С., Г.Н. Коровин, В.И. Сухих и др.* Экологические проблемы поглощения углекислого газа посредством лесовосстановления и лесоразведения в России (аналитический обзор) // Центр экологической политики России. М., 1995. 156 с.
2. *Барталев С.А., Курятникова Т.С., Стибиг Х.Ю.* Методы использования временных серий спутниковых изображений высокого пространственного разрешения для оценки масштабов и динамики вырубок таежных лесов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных объектов и явлений. Сб. научных статей. М.: ООО "Полиграф сервис", 2004. С. 217-227.
3. *Heinz D. C., Chang C. I., 2001.* Fully constrained least squares linear spectral mixture analysis method for material quantification in hyperspectral imagery // IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, 2001, 39 p.
4. *Zhu H.L.* Linear spectral unmixing assisted by probability guided and minimum residual exhaustive search for subpixel classification // International Journal of Remote Sensing, 2005. 26 (24), 5585-5601.
5. *Shimabukuro, Y.E., J.A. Smith* The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data // IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 1991, vol. 29(1), p. 16-20.
6. *Asner, G., J. Hicke, and D. Lobell* Per-pixel analysis of forest structure: Vegetation indices, spectral mixture analysis and canopy reflectance modeling. // Wulder M, Franklin S, eds. Remote Sensing of Forest Environments: Concepts and Case Studies. Boston: Kluwer Academic, 2003, p. 229–254
7. *Мелехов И. С.* Лесоведение: Учебник для вузов. Лесная промышленность, 1980. 408 с.
8. *Швиденко А.З., Щенащенко Д.Г., Нильссон С., Булуй Ю.И.* Система моделей роста и динамики продуктивности лесов России (таблицы биологической продуктивности) // Лесное хозяйство, 2004. №2. С. 40-44.

Estimation of carbon losses in a forest ecosystem caused by logging with the use of satellite data

S. Bartalev¹, T. Khovratovich¹, V. Elsakov²

¹*Space research institute RAS*

E-mail: beml@smis.iki.rssi.ru

²*Komi biology institute RAS*

E-mail: elsakov@ib.komisc.ru

The paper proposes a new approach to estimate carbon losses in forest caused by logging using a combination of satellite and selective ground data. Developed method is based on linear model of spectral mixture analysis and allows evaluating of a species structure, a ground stock and an age structure of the canopy. The paper describes results of a method application to assess carbon losses in the forest caused by logging at the test-site in Komi.

Keywords: remote sensing, carbon emission, carbon stock, forest logging, canopy species structure, canopy ground stock, canopy age structure.