

## Спутниковые изображения в анализе количественных характеристик лесных фитоценозов Печоро-Ильчского заповедника Республики Коми

В.В. Елсаков, И.О. Марущак

Институт биологии Коми НЦ УрО РАН  
167610 Сыктывкар, Коммунистическая, 28  
E-mail: elsakov@ib.komisc.ru

В работе представлены результаты, демонстрирующие выявленные направления изменения количественных характеристик лесных экосистем в пределах наиболее крупной особо охраняющейся территории Европейского Севера России. Привлечение материалов съемки Terra-MODIS за период 2000-2010 гг. показало, что в пределах равнинной части заповедника для старовозрастных лесов прослеживаются устойчивые тренды снижения индекса NDVI, связанные с естественными процессами. Основные «катастрофические» изменения, связанные с ветровальной активностью и пожарами, стали причиной последующего демутационного восстановления растительного покрова отдельных участков.

**Ключевые слова:** лесные фитоценозы Печоро-Ильчского заповедника, сомкнутость крон, дистанционный мониторинг.

### Введение

В последние годы возросло внимание исследователей, направленное на изучение изменений растительного покрова, наблюдаемых в пределах границ различных особо-охраняемых природных территорий (ООПТ), и отражающих общую направленность процессов трансформации природных экосистем под влиянием региональных или глобальных естественных факторов, прежде всего климатических. Развитие представлений о типах леса как индикаторах различных природных режимов (Сукачев, 1950), характеризующих энергетические и геохимические процессы, наблюдаемые в элементарных ландшафтах, нашло представление в трудах многих исследователей (Солнцев Н.А., Исаченко А.Г., Арманд Д.Л., Колесников Б.П., Киреев Д.М.).

Анализ пространственных структур – сравнительно недавняя тема экологических исследований (Восточноевропейские..., 2004). Пространственная гетерогенность (ПГ) рассматривается как мозаика экологических условий, экосистем различных типов, компонентов внутри экосистемы или их отдельных характеристик. Показатели ПГ не статичны, испытывают изменчивость во времени.

Материалы спутниковых наблюдений все чаще выступают в качестве важных информационных источников при характеристике растительных сообществ, их ландшафтной приуроченности, выявлении изменений под влиянием естественных и антропогенных причин. Поэтому, их использование становится незаменимым для анализа истории и причин формирования растительного покрова отдельных территорий, уровня ПГ и направления ее трансформации.

В настоящее время целесообразно использование ДДЗ для исследования особо охраняемых природных территорий (ООПТ), поскольку:

– возможны сопоставления результатов с данными полевых наблюдений, ранее полученных на территории ООПТ и направленных на фиксирование дат смены отдельных фенологических явлений, характеристик компонентов живой природы (летопись природы), что значительно снижает вероятность возникновения ошибок при проведении дешифрирования;

– при составлении временных рядов изображений практически исключено влияние антропогенной деятельности;

– постоянство границ ООПТ, расположенных чаще всего вдоль хорошо различимых объектов гидрографической сети, упрощает географическую привязку космоснимков.

Вместе с тем, разработка методов количественной оценки характеристик и показателей растительного покрова по материалам обработки спектрозональных изображений (использование спектральных индексов, метода разложения спектральных смесей (SMA-анализ)), демонстрирует широкие возможности для изучения пространственно-временной изменчивости характеристик фитоценозов (породный состав, сомкнутость крон, возраст насаждений) и их изменений под влиянием экологических факторов.

Несмотря на то, что использование материалов спутниковой съемки высокого и очень высокого разрешения применительно исследований растительного покрова получило в настоящее время достаточно широкое распространение, данные высокого разрешения в полной мере не позволяют осуществить анализ количественных изменений показателей экосистем ввиду их фрагментарной доступности по времени съемки. Нередко сравниваются характеристики по изображениям разных лет, отличающихся по климатическим параметрам, степени фенологического развития растительного покрова, различающиеся условиями выполнения съемки.

Корректную оценку в этом случае можно получить, сочетая данные спутниковой съемки различного разрешения и временного охвата, данные составленных временных се-рий одного сенсора, имеющие непрерывный ряд наблюдений за состоянием территории. Наиболее полно для этой цели подходят данные среднего разрешения, использование которых в настоящее время адаптировано к задачам оперативного космического мониторинга (данные MODIS спутники TERRA и AQUA).

Цель настоящей работы состояла в анализе возможностей использования материалов спутниковой съемки применительно исследований отдельных количественных характеристик (сомкнутость крон, индекс породного состава, NDVI) лесных фитоценозов территории заповедника.

## Материалы и методы

Территория Печоро-Илычского биосферного заповедника расположена в пределах границы Русской равнины и Уральской горной страны, в градиенте смены границ подзон средней и северной тайги. На своеобразие климата, характер распределения растительного покрова территории во многом оказывает влияние Уральский горный хребет, имеющий меридиональную направленность и ограничивающий территорию с востока. В растительном покрове равнинной части заповедника господствуют темнохвойные леса, сложенные видами сибирской полидоминантной тайги (Флора и растительность..., 1997). Территория является эталоном растительности boreальных девственных лесов с абсолютным доминированием равнинных, низкогорных и горных лесов елово – пихтовых с примесью кедра, травянисто – кустарниковых зеленошерстистых (Нейфельд, 2006). Сосновые леса имеют малую представленность, сформированы на участках боровых террас и заболоченных территориях. Лиственные леса немногочисленны, приурочены к поймам рек и участкам восстанавливавшихся гарей. На участках высокогорий прослеживаются высотные смены лесов горными тундрами и каменистыми россыпями.

В качестве основы для выполнения исследований брались материалы съемки Landsat и Terra-MODIS. Важной характеристикой для выявления изменений фитоценозов территории по данным зимней и летней съемки Landsat был анализ показателей сомкнутости крон древостоев и представленности породного состава, рассчитанный по ранее представленному алгоритму (Елсаков, Марущак, 2010), используя принципы декомпозиции спектральных смесей (метод SMA). В качестве показателя для выполнения картографирования был предложен и индекс «породного состава», рассчитанный как:

$$A = (A_i - B_i) / (A_i + B_i), \quad (1)$$

где  $A_i$  – суммарное значение состава хвойных пород на выделе  $i$ ,  $B_i$  – лиственные породы на выделе  $i$ . Величина принимает значения от 1 (порода имеет абсолютное доминирование – чистый древостой) до -1 (незначительная примесь породы в качестве подчиненной). Итогом обработки изображений нескольких лет стали тематические картосхемы, отражающие показатель изменения сомкнутости древесного яруса (в %) и породного состава для отдельных лет наблюдений. Результаты обработки легли в основу выявления участков изменений, связанных с ветровальной активностью.

Основой для выявления долговременных устойчивых трендов изменений в пределах лесных фитоценозов территории заповедника стали материалы съемки спутника Terra-MODIS (MOD13Q1.005) пространственного разрешения 0.25 км, периода 2000-2010 гг. (источник данных: modis.gsfc.nasa.gov). Временные композиты изображений нормализованного разностного индекса растительного покрова (NDVI), широко используемого для оценки распределения надземной фитомассы, были составлены для 16 дневных периодов. Максимальные величины показателя отмечены для периода июль-август (12-15 композит). Для каждого года наблюдений выбирали наибольшее значение индекса ( $NDVI_{MAX}$ ). В связи с тем, что предгорные и горные территории Урала характеризуются присутствием большого количества дней с полуясным и пасмурным состоянием атмосферы (так в летний период вероятность пасмурного состояния неба по данным метеостанции Троицко-Печорска в среднем варьирует от 56% в июне до 67% в августе (Климатологический..., 1932)), а данный показатель способен оказать существенное влияние на величины NDVI, для учета изменений были использованы только величины индекса, входящие в предел доверительный интервал ( $\sigma_o \pm S_x$ ,  $n_{2000-2010 \text{ гг.}} = 10$ ,  $p < 0.05$ ). На основании полученных величин рассчитывали тренды изменений индекса NDVI за 10-летний период наблюдений.

## Результаты работы и их обсуждение

**Анализ показателя сомкнутости.** Для территории заповедника характерны участки с развитым древесным покровом (86.6% территории). Из них, по данным зимних изображений доминируют лесные фитоценозы с классом сомкнутости крон 70-90% (41.7% территории). Площадь покрываемая классами сомкнутости крон выше 90%-26.8%, 50-70% – 10.2%, 30-50% – 5.3%. Сомкнутость крон лесных сообществ заповедника по данным построенной модели достигала максимальных значений (выше 95%) в пределах пойменных участков рек и небольших водотоков (рис. 1А). Разреженные древостои приурочены к заболоченным водораздельным плато, участкам верхней границы лесной растительности.

**Индекс породного состава.** Анализ распределения индекса в пределах территории показал абсолютное доминирование (86.8% территории) в формировании полога древостоя хвойных пород (ели, пихты, сосны) (значение индекса выше 0.25). Наибольшее существенную долю среди них занимают древостои с представленностью индекса 0.75-1 (56.2%) (9Е1Б-10Е). Примерно равный состав березы и хвойных пород (5Е5Б) отмечен в сообществах 7.7% территории. Участки с высоким участием березы (от -0.25 до 0.25) отмечены на территориях, ранее подвергавшихся влиянию пожаров и представляющих собой заключительные стадии демутационного восстановления хвойных фитоценозов, заболоченные территории и пояс горных широколиственных лесов из *B.totuosa*. Площадь пород с доминированием лиственных пород составила 5.6% территории. Различные соотношения породного состава в пределах территории, с одной стороны, маркируют различные по экологическим условиям участки, с другой, маркируют территории ранее подвергавшиеся катастрофическим воздействиям (пожары, ветровалы) и могут быть использованы для оценки возраста восстановления древесных пород на участке.

Анализ изменений сомкнутости крон и индекса породного состава разновременных изображений позволил выявить отдельные участки, связанные с ветровалами и пожарами. На примере Якшинского участка установлено, что штормовые события временного периода между 17.7.2001 и 12.9.2001 г. привели к вывалу деревьев в с-в направлении на площади 126 га. Вывал деревьев отмечен на предварительно затронутых огнем участках в пределах сосновых лесов: сосняков кустарничково-зеленомошно-лишайниковых (47.5%), сосняков сфагновых (13.0%) и сосняков лишайниковых (10.1%). На меньшей площади вывал отмечен и в пределах еловых древостоев: ельниках травяных (13.9%) и ельниках кустарничково-сфагновых (13.2%). Роль экспозиции в формировании ветровалов возрастает с ростом уклона поверхности. Максимальные величины вывала в пределах рассмотренных групп наблюдаются на ветроударных склонах ю.-в. экспозиции более 7° (до 35%). Анализ смежных с заповедником территорий показал массовость явления в регионе, и может рассматриваться в качестве важного фактора для формирования биологического разнообразия. В Верхне-Печорском лесничестве Комсомольского лесхоза отмечено несколько ветровальных разновременных участков, при этом наиболее ранние и крупные участки ветровалов вытянуты в с-в. направлении в буферной зоне П-И заповедника, протяженностью в 60-70 км (на границе Республики Коми и Пермского Края). Они детектируются на изображении 6.5.1986. Возможно, их происхождение относится к более раннему периоду. Так, в 1975 году на западном макросклоне Урала (север Пермского края) ураганом был повален лес на площади 260 тыс. га с запасом древесины более 22 млн м<sup>3</sup>. Поврежденные участки леса по очертаниям имели вытянутую в широтном направлении конфигурацию длиной до 150 км и шириной с севера на юг до 50 км (Рожков, Козак, 1989).

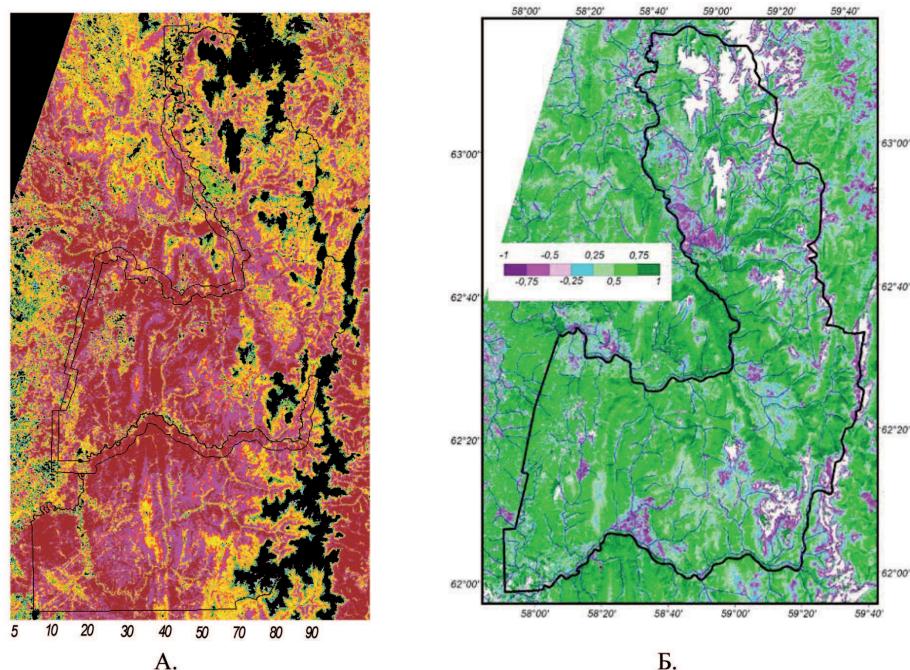
**Анализ долговременных межгодовых изменений индекса NDVI.** Значения индекса NDVI определяются спектральным диапазоном в интервале поглощения солнечного излучения хлорофиллом, и косвенно рассматриваются как величины, отражающие распределение запаса надземной фотосинтетически-активной фитомассы, коррелируют с листовым индексом и проективным содержанием хлорофилла в ассимилирующих органах на единице площади поверхности (хлорофильный индекс, ХИ) (Тужилкина, Бобкова, 2010). Последняя величина применима для количественной оценки стока фотосинтетического связывания углерода растительными ассоциациями (Проективное содержание..., 1995; Цельниker, Малкина, 1994; Экологические проблемы..., 1996). В многоярусных лесных фитоценозах заповедника формирование значений отражения для конкретных пикселей изображения

определяется вкладом в суммарный спектр величин, полученных от растений различных жизненных форм, однако в спелых хвойных насаждениях определяется в основном автотрофной частью древостоя. Так для ельника черничного данная величина составила порядка 85.9% (Тужилкина и др., 1998).

Анализ трендов изменения индекса NDVI территории показал, что в большинстве случаев для равнинных лесов Печоро-Илычского заповедника отмечено снижение индекса с интенсивностью до 0.02-0.03 за 10 лет, что характерно для старовозрастных лесов, для которых по мере увеличения возраста степень просматриваемости «в глубину» на аэрофотоизображениях возрастает (Аковецкий, 1983). «Так, для лиственных пород до 30 лет и хвойных до 40 лет земная поверхность практически не просматривается» (т.е. спектральные величины полога леса являются основными при формировании суммарного спектра отражения, прим. авторов), «с каждым последующим классом возраста в чистых и одновозрастных насаждениях просматриваемость «в глубину» повышается. Чем старше насаждение, тем больше просматриваемость «в глубину» при одной и той же полноте».

Существенный рост значений индекса маркирует участки послепожарного восстановления. Так, максимальное увеличение показателя (более 0.04 за 10 лет) наблюдается на восстанавливающемся участке площадью порядка 829.5 га в сосняке лишайниковом, расположенному южнее устья р. Укью, произошедшего по данным обработки Spot-VGT, в 20-21 декаду (вторая половина июля) 2000 г. (Елсаков, Щанов, 2005). По материалам съемки Spot-VGT величины максимальные за год значений индекса для участка изменились в пределах: 0.71-0.74 (ненарушенный), в последующий после пожара год – 0.62, и постепенный рост индекса в течение последующего года на 0.09.

Работа выполнена в рамках проектов «Биологическое разнообразие наземных и водных экосистем Приполярного Урала: механизмы формирования, современное состояние, прогноз естественной и антропогенной динамики»; гранта РФФИ «Влияние климатических изменений на биоценозы ненарушенных территорий российского Севера» (проект № 10-04-92514-ИК\_а).



*Рис. 1. Сомкнутость крон древостоя территории (%) (A) и распределение индекса породного состава (Б) по материалам съемки Landsat*

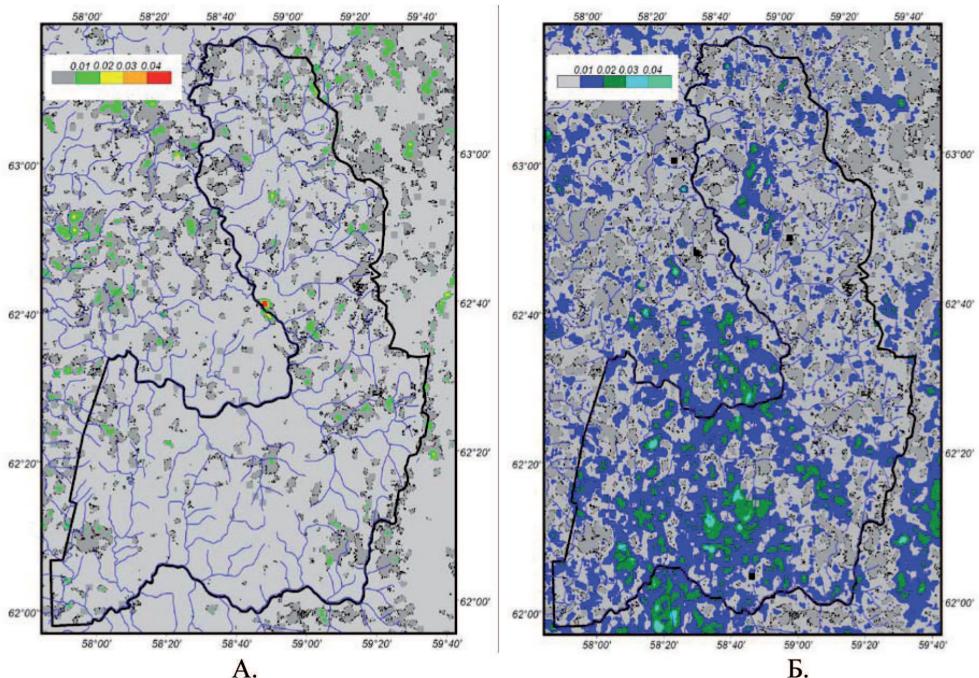


Рис. 2. Положительные (А) и отрицательные (Б) тренды изменений значений индекса NDVI за период 2000-2010 гг.

## Литература

1. Аковецкий В.И. Дешифрирование снимков. М.: Недра, 1983. 374 с.
2. Восточноевропейские леса: история в голоцене и современность. В 2 кн. / Центр экологии и продуктивности лесов. – М.: Наука, 2004. Кн. 1 / Отв. ред. О.В. Смирнова. – 2004. – 479 с.
3. Елсаков В.В., Марущак И.О. Роль спутникового мониторинга в выявлении изменений растительного покрова предгорной и горной части Урала // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 1. С.310-318.
4. Елсаков В.В., Щанов В.М. Оценка временных изменений растительного покрова Печоро-Ильчского заповедника // Труды Печоро-Ильчского заповедника. Вып. 14. Сыктывкар, 2005. С. 54-58.
5. Климатологический справочник по СССР. Вып. I. Европейская часть СССР. Л.: Главная геофизическая обсерватория, 1932. 118 с.
6. Нейфельдт В.Н. История и проблемы на пути развития «Печоро-Ильчского биосферного заповедника» // Российские биосферные резерваты на современном этапе. М.: 2006. 231 с.
7. Рожков А. А., Козак В. Т. Устойчивость лесов. М.: Агропромиздат, 1989. 239 с.
8. Сукачев В.Н. О некоторых основных вопросах фитоценологии // Проблемы ботаники. Т. I. – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1950. – С. 449-464.
9. Тужилкина В.В., Бобкова К.С., Мартынюк З.П. Оценка баланса углерода лесного фитоценоза // Физиология растений, 1998. Т. 45. С. 914-918.
10. Тужилкина В.В., Бобкова К.С. Хлорофильный индекс в фитоценозах коренных ельников Европейского северо-востока // Лесной журнал, 2010. №2. С. 17-23.
11. Флора и растительность Печоро-Ильчского биосферного заповедника. Екатеринбург: УрО РАН, 1997. 384 с.
12. Цельниker Ю.Л., Малкина И.С. Хлорофильный индекс как показатель годичной аккумуляции углерода древостоями леса // Физиология растений, 1994. Т. 41. № 3. С. 325-330.
13. Экологические проблемы поглощения углекислого газа посредством лесовосстановления и лесоразведения в России (аналитический обзор) / А.С. Исаев, Г.Н. Коровин, В.Н. Сухих и др. М., 1996. 154 с.

# **The satellite monitoring of quantitative parameters of forest ecosystems of Pechoro-Ilych Nathural Reserve**

**V.V. Elsakov, I.O. Marushak**

*Institute of Biology Komi SC UrD RAS  
167610, Syktyvkar, Kommunisticheskaja 28  
E-mail: Elsakov@ib.komisc.ru*

The preliminary mapping of changes of quantitative parameters of forest ecosystems Pechoro-Ilych natural reserve was done with using of remote sensing data. The landscape structure, natural seral transformation of communities, revegetation after fires and windfalls were the main sources of changes. The Terra-MODIS data analysis demonstrate the stable trend of NDVI index decrease related with natural age-specific processes.

**Keywords:** vegetation cover, Pechoro-Ilych natural reserve, Ural, remote sensing.