

ОСОБЕННОСТИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ГЛОБАЛЬНЫХ И РЕГИОНАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

В.И. Лялько¹, С. Нильсон², А.З. Швиденко², А.И. Сахацкий¹,
А.Я. Ходоровский¹

¹Центр аэрокосмических исследований Земли ИГН НАН Украины, Украина,
01601, Киев, ул. О.Гончара, 55 б, E-mail: casre@casre.kiev.ua;

²Международный Институт прикладного системного анализа (IIASA),
Лаксенбург, Австрия, Shlossplatz 1, A-2361 Laxenburg, Austria,
e-mail: E-mail: shvidenk@iiasa.ac.at

Приведены материалы совместных работ Центра аэрокосмических исследований Земли ИГН НАН Украины с Международным институтом прикладного системного анализа (IIASA, Австрия) по компьютерной тематической интерпретации космоснимков SPOT-Vegetation и Landsat-7 в пределах территории Центральной Сибири для определения видового состава и состояния лесов. Результаты работ используются для оценки углеродного баланса в пределах бореальных лесов региона с целью прогнозирования глобальных климатических изменений.

Введение

С начала XIX ст. до конца XX ст. произошло увеличение температуры Земли на 0,6 -1,5 °С (по данным различных авторов), связанное с возрастанием в атмосфере содержания CO₂ – на 30% и CH₄ – почти вдвое. Поэтому возник вопрос выявления распределения на Земле источников и стоков этих “парниковых” газов и разработки рекомендаций международного уровня для ослабления прогрессирующего глобального потепления.

Для реализации рекомендаций Киотского протокола и Иоганесбургского саммита-2002 по ограничению выбросов в атмосферу “парниковых” газов при хозяйственной деятельности необходима технология установления истинного распределения источников – стоков CO₂, CH₄ и др. газов - “утеплителей”, которая может быть основана на использовании мультиспектральных космических съемок в мониторинговом режиме и наземного инструментального определения потоков этих газов в разных ландшафтно-климатических зонах и для различных видов растительности. Учитывая ослабевающую адсорбцию CO₂ тропическими лесами, особое внимание следует уделить бореальным лесам Евразии, которым предстоит принять на себя функции глобальных “легких” планеты.

На протяжении 2001 – 2004 г.г. сотрудниками ЦАКИЗ совместно с Международным институтом прикладного системного анализа (IIASA, Австрия) была выполнена компьютерная тематическая интерпретация космоснимков SPOT-Vegetation (за 1999 г.) и Landsat (за 1977 – 2000 г.г.) в пределах территории Центральной Сибири. Полученные результаты, совместно с данными определения потоков CO₂ в лесных и болотных сообществах, свидетельствуют об уменьшении площадей хвойных лесов, замене их лиственными лесами, кустарниково-болотными сообществами, что ведет к существенному уменьшению поглощения лесами углекислого газа и усилению “парникового” эффекта.

Следует продолжить и расширить подобные исследования в рамках международных проектов, уделив особое внимание созданию соответствующей сети по наземному экспериментальному определению потоков “парниковых” газов в системе “атмосфера-растительность”. Оценка изменения площадей и видового состава лесов с помощью методов ДЗЗ и установление потоков CO₂ позволят создать адекватные физико-математические модели прогнозирования изменения регионального и глобального климата Земли и выполнить с их помощью расчёты сценариев оптимального природопользования.

1. Использование многозональных снимков разного пространственного разрешения с КА Landsat и SPOT VGT для изучения лесной растительности Сибири

Исследуемая территория находится на юге Красноярского края и покрыта преимущественно хвойными лесами разного состава [1-4]. Сравнительный анализ разновременных космических снимков разрешает проводить мониторинг изменений этой территории. Все исследования базируются на обязательном использовании наземных данных по отдельным тест-участкам.

На первом этапе выполнения работ основной задачей была отработка методических подходов к обработке имеющихся материалов космической съемки для проведения классификации лесных растительных

сообществ регионов Сибири. Работы велись на площадях, на которые имелись лесотаксационные карты, что позволяло оценить возможности космической съемки для решения поставленных задач. По этой территории в нашем распоряжении были такие космические снимки [10]:

1. SPOT VGT – 18 снимков (продукт S10), за период 1.04.1999 – 30.09.1999. Снимки покрывают площадь 2500x1600 км и охватывают всю территорию исследований. Снимки имеют разрешающую способность 1x1 км и представляют собой изображения, которые интегрируют спектральные яркости земных покровов в четырех спектральных каналах за десятидневный период. Съемка SPOT VGT проводится в следующих четырех каналах: 1 - 430 – 470 нм (Blue); 2 - 610 – 680 нм (Red); 3 - 780 – 890 нм (NIR) ; 4 - 1580 – 1750 нм (SWIR).
2. Landsat-7 – 7 снимков в 7 стандартных спектральных диапазонах. Снимки сделаны летом 1999 и 2000 года, на них расположены все тестовые участки.

Для дешифрирования по космоснимкам состава растительности лесных массивов использовалась созданная ранее база данных, включающая описание лесотехнических характеристик выделов в границах нескольких десятков лесничеств, которые относительно равномерно расположены по всей территории исследования. База данных была создана в формате ArcInfo.

Векторные изображения кварталов и выделов были совмещены с космоснимками с помощью программы ERDAS Imagine [5] и таким образом была обеспечена возможность сопоставления данных космической съемки с лесотехническим описанием отдельных участков.

Используя установленные сигнатуры основных классов растительности, была проведена классификация с обучением космоснимков Landsat - 7 с помощью программного продукта ERDAS Imagine. Классификация была выполнена методом максимальной вероятности, так как было доказано нами раньше, что этот метод позволяет получить более точную классификацию по сравнению с методом минимального расстояния и расстояния Махаланобиса [5]. По данным других исследователей при классификации лесной растительности метод наибольшей вероятности также показал удовлетворительные результаты.

Суть работы заключалась в следующем: программой опрашивались пиксели изображения в пределах значительного количества тестовых участков. По результатам замеров были построены гистограммы распределения спектральных яркостей, вычислены средние значения и статистические параметры распределения для различных видов растительных сообществ в каждом из каналов многозональных космических снимков Landsat-7. Затем на основе анализа отдельных тестовых участков с помощью программы ERDAS Imagine были созданы суммарные сигнатуры, которые объединяли данные по отдельным растительным ассоциациям. Таким образом были получены спектральные характеристики для всех групп древостоев, выделяемых на лесотаксационных картах, и для разных элементов ландшафта (водная поверхность, пески и т.д.). Всего первоначально было выделено 72 класса растительности и элементов ландшафта и определены их спектральные характеристики. Затем была проведена сравнительная оценка сигнатур всех выделенных классов объектов с целью прогноза надежности классификации растительности района по методу наибольшей вероятности.

В результате проведенной классификации получено распределение растительных сообществ в пределах четырех полных сцен Landsat-7.

Дополнительно к проведенной классификации был выполнен анализ классифицированного изображения в отношении порогового расстояния пикселей, которые хотя и отнесены к определенному классу по методу наибольшей вероятности, но их спектральные яркости сильно отличаются от среднестатистических для данного класса. При анализе хвойных лесов установлено, что пиксели, которые превышают стандартные пороговые значения, обычно отвечают хвойным лесам, пораженным вредителями, главным образом сибирским шелкопрядом (*Dendrolimus sibiricus*).

Значительную сложность представляет проблема оценки точности проведенной классификации. Сопоставление данных по отдельным выделам лесотаксационных карт с результатами проведенной классификации показало, что данные дешифрирования дают значительно более детальную картину распределения растительности. Это и неудивительно: по материалам дешифрирования идет попиксельная оценка (30x30 м), тогда как по наземным данным такой единицей есть выдел, размеры которого порядка 1 га и более. Поэтому была предложена 12 – бальная шкала точности оценки результатов классификации. Контрольные сопоставления с наземными данными указывают на точность классификации снимков Landsat-7 на уровне 8-10 баллов, что соответствует хорошей точности классификации (в среднем 75 – 85 %). В ряде случаев расхождения наземных и дистанционных данных обусловлено значительно большей детальностью наблюдений на снимках, а также, вероятно, теми изменениями, которые произошли за время между проведением лесотаксационных работ и космической съемкой.

Данные классификации растительности по снимкам с Landsat-7 были использованы для работы со снимками SPOT VGT, которые имеют гораздо меньшее пространственное разрешение, но охватывают значительно большие площади, проводятся с высокой периодичностью (ежедневно) и по стоимости намного дешевле. Более того, использование снимков SPOT VGT позволяет вести работы в режиме мониторинга, а это значительно повышает информативность исследования и расширяет круг решаемых задач. Однако, при

использовании этих снимков приходится сталкиваться с целым рядом трудностей. Прежде всего, это проблема выборов тест-участков. Площади выделов на лесотаксационных картах измеряются первыми гектарами, тогда как каждый пиксел SPOT VGT охватывает площадь в 100 га. Поэтому для обучения выбирались наиболее однородные участки растительности.

В настоящее время изучаются возможности использования временных серий снимков SPOT VGT для проведения классификации данной территории. Проведенные исследования изменений спектральных яркостей и вегетационных индексов на протяжении вегетационного цикла по данным снимков SPOT VGT в пределах полигона “Большое” позволяют говорить о возможности использовать отличия в изменении, в частности, индекса NDVI у различных растительных сообществ, для выполнения классификации изображений с целью определения пространственного расположения основных растительных группировок в пределах рассматриваемой территории.

2. Изучение динамики изменения видового состава лесов по разновременным снимкам Landsat с целью оценки изменения углеродного баланса

Общеизвестно, что повышение содержания углерода в атмосфере приводит к глобальным климатическим изменениям с отрицательными тенденциями. Такие исследования интенсивно проводятся, в частности, в ИАА в рамках Киотского протокола 1997 года. Протокол вмещает юридические обязательства стран, которые подписали Киотский протокол, ограничить или уменьшить содержание углерода в атмосфере и, в частности, проводить лесонасаждения, восстанавливать лесные массивы. Для контроля за выполнением принятых обязательств должны быть разработаны методы, которые позволяли бы проводить оценку изменения углеродного баланса с достаточным уровнем точности в условиях некоторой неопределенности. Это может быть достигнуто путем широкого привлечения данных дистанционного зондирования Земли.

На примере полигона “Большое” (Средняя Сибирь) показанная возможность использования разновременных многозональных космических снимков Landsat для оценки изменения во времени породного состава лесов вследствие естественных процессов и техногенного влияния в границах отдельных территорий. Для проведения исследований и разработки методических вопросов нами использованы снимки Landsat MSS (за 21 июня 1977 года) и Landsat – 7 (22.06.2000 г.). Таким образом, рассматриваются изменения за период в 23 года. С этой целью, с помощью программного продукта ERDAS Imagine, была проведена классификация снимков по методу максимальной вероятности [5].

Учитывая ненадежное отделение сосновых лесов от темнохвойных с преимуществом ели и пихты на снимке Landsat MSS (21.06.1977), как установили наши исследования, при подсчетах изменений площади светлохвойные и темнохвойные леса были объединены в одну группу хвойных лесов. В районе полигона наблюдается интенсивная вырубка темнохвойных лесов, за 23 года исчезнувшая значительная часть большого лесного массива. При сохранении подобного темпа рубок лесной массив может исчезнуть за 15-20 лет. Темпы восстановления хвойных пород значительно отстают от их рубок, а потому наблюдается значительный процентный прирост лиственных лесов (см. табл. 1). Последние занимают площади рубок, пожаров, степных участков территории.

Таблица 1. Изменения в распределении различных видов лесных растительных сообществ в пределах полигона “Большое”
(Общая площадь участка 9456 кв.км)

N	Выделенные растительные сообщества	21.06.1977 Landsat MSS		22.06.2000 Landsat-7		Изменения площадей
		Площадь кв.км	%	Площадь кв.км	%	
1	Хвойные леса (молодые, до 30 лет)	2330	25	1904	20	-5
2	Хвойные леса (старше 30 лет)	2070	22	1704	18	-4
3	Лиственные леса (молодые, до 30 лет)	875	9	2067	22	+13
4	Лиственные леса (старше 30 лет)	1183	12	2196	23	+11
5	Не лесные земли, луга, болота, рубки зарастающие молодой березой и т.п.	2919	31	1290	14	-17
6	Водная поверхность	79,4	1	80	1	0
7	Тучи, тени от туч	-	-	213	2	+2
	Интегральные показатели	9456,4	100	9454	100	0

Полученные по результатам обработки разновременных космических снимков данные позволяют с достаточной точностью оценить изменение площадей лесных покровов, уменьшая неопределенность рас-

четов поступлений углерода в атмосферу, в частности, на данном участке. Аналогичный подход можно использовать и для исследования более значительных площадей.

3. Особенности экспериментальных исследований потоков углерода в лесах Сибири

Как известно, леса играют основную роль не только в процессах поглощения, но и выделения CO_2 в атмосферу. В последние годы благодаря интенсивным процессам эксплуатации тропических лесов и интенсификации в них процессов гибели растений, они превратились в могущественный источник снабжения CO_2 в атмосферу. Поэтому оценка экологического состояния бореальных лесов Евразии и экспериментальное определение потоков CO_2 в системе растение-атмосфера стало глобальной не только научной, но и прикладной проблемой.

Дешифрирование разновременных космических снимков за последние годы показало, что состояние лесных массивов Сибири существенным образом изменилось за счет уменьшения хвойных деревьев и увеличения лиственной и болотно-тундровой растительности. Проведенные японскими и русскими исследователями экспериментальные работы по изучению потоков CO_2 , которые абсорбируются и выделяются растительностью, установили, что на протяжении периода вегетации (май-сентябрь) в местах, где первичные хвойные леса замещены лиственными и болотно-тундровой растительностью, выявлены превышения выделения CO_2 в атмосферу над его поглощением растениями в размере почти $+184 \text{ гС/м}^2$. Таким образом, это является одной из составных, что оказывают содействие глобальному потеплению наряду с выделением CO_2 и NH_4 в местах таяния вечной мерзлоты и выделением углерода и углекислого газа при лесных пожарах [9].

Интересные обобщающие данные о динамике главных показателей кругооборота углерода в лесах России в 1961 – 1998 годах было приведено в докладе представителей ИАСА, Forestry Project - Nilsson, S., Shvidenko, A. and V. Stolbovoi [8]. В соответствии с приведенных данных, в бореальных лесах России наблюдается на протяжении последних почти 40 лет существенное уменьшение (2,5-3 раза) поглощение лесами CO_2 , что трудно объяснить уменьшением площади и биомассы этих лесов, поскольку этот показатель возрос за указанный период на 123%. Итак, возможно, этот феномен вызван интенсивным выделением CO_2 в процессе гниения мертвой органики, которая увеличилась за эти годы почти в 1,5 раза.

Сравнение материалов разновременных космических съемок показало, что с 1977 по 2000 год на рассматриваемой территории площадь лесов почти не изменилась, но площади вырубленных хвойных лесов заняли березовые и осиновые молодые леса, кустарниковые и тундровые виды растительности [6,7,10].

Тенденция такого изменения растительного покрова может привести к увеличению потока CO_2 в атмосферу.

Выводы

1. Выполнена обработка космических снимков разной пространственной разрешающей способности Landsat-7 и SPOT Vegetation с целью построения карты видового состава лесов в границах исследуемого района.
2. Проведены экспериментальные работы для оценки различных методических подходов к классификации лесов Среднего Сибири и уточнения приемов классификации с выбором наиболее оптимальных вариантов.
3. Установлено, что во многих случаях при классификации космических изображений совместное использование абсолютных значений спектрального отражения и вегетационных индексов лесных растительных группировок разрешает провести отбраковку заверочных наземных данных еще на этапе формирования сигнатур классов, которые идентифицируются.
4. Проведены исследования в пределах территории полигона «Большое» (Средняя Сибирь) по динамике изменения видового состава лесов и площадей их распространение с использованием снимков со спутников Landsat за 23 годовой период. На следующем этапе работ планируется подобные работы выполнить для других регионов, что позволит создать информационную базу для оценки изменений углеродного баланса для территорий Среднего Сибири.

Литература

1. Леса СССР. М.: «Наука», т. 4. 1969, - С. 350-387.
2. Лялько В.И., Сахацкий А.И., Ходоровский А.Я., Буянова И.Я. и др.. Комплексирование многозональных космических снимков различного пространственного разрешения для повышения эффективности исследований лес-

- ных массивов (на примере зоны отчуждения ЧАЭС и районов Сибири) // Космічна наука і технологія, 2002. Т.8. N 2/3. С. 239 – 246.
3. Молчанов А.А. Продуктивность органической массы в лесах различных зон // М.: Наука, 1971. 276 с.
 4. Попов Л.В. Южнотаежные леса Средней Сибири // Иркутск: Изд. Иркутского университета, 1982. 293 с.
 5. ERDAS Field Guide // 1999. Fifth Edition, Revised and Expanded. ERDAS c Inc., Atlanta, Georgia
 6. Lyalko, V.I., Sakhatsky, A.I., Hodorovsky, A. Ya. (CASRE, NAS, Ukraine) Nilsson, S., Shvidenko, A., McCallum, Ja.(IIASA, Austria). Application of multi-sensor concept of remote sensing and GIS for Northern Eurasia boreal forests monitoring // Abstracts Book. 22nd EARSeL Symposium & General Assembly, Prague, Czech Republic, June 4-6. 2002. p. 164.
 7. Lyalko, V.I., Sakhatsky, A.I., Hodorovsky, A. Ya. (CASRE, NAS, Ukraine), Nilsson, S.,
 8. Shvidenko, A. (IIASA, Austria). Features of the space control of forests of Ukraine and Siberia, for an estimation of their state, fire risk and carbon cycle // Abstract book. 24nd EARSeL Symposium “NEW STRATEGIES FOR EUROPEAN REMOTE SENSING”, Dubrovnik, 25-27 May 2004, p. 91.
 9. Nilsson, S., Shvidenko, A. and Stolbovoi, V., Russian forests and fluxes of major greenhouse gases // XI IBFRA Conference, Krasnoyarsk, Russia. 2002.
 10. Proceeding of the Eighth Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1999, edited by Inoue Gen and Takenaka Akio, 2000. pp. 323
 11. Sakhatsky A., Hodorovasky A., Buyanova I., (CASRE, NAS, Ukraine), McCallum J. (IIASA, Austria). Classification of space images for forest state identification within the Siberia region (Part 1) //IIASA, Laxenburg, Austria, IR-02-29 /April 2002. 45 p. (http://www.iiasa.ac.at/docs/IIASA_Publications.html)