

## Обработка многоспектральных и гиперспектральных аэрокосмических изображений: информационно-прикладные аспекты

В.В. Козодоров<sup>1</sup>, Е.В. Дмитриев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
119991, Москва, ГСП-1, Воробьевы горы, МГУ, д. 1

E-mail: vkozod@mes.msu.ru

<sup>2</sup>Институт вычислительной математики РАН,  
119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 8,  
E-mail: yegor@intm.ras.ru

Рассматриваются основные этапы создания унифицированного программно-алгоритмического обеспечения обработки данных разных типов аппаратуры многоспектрального и гиперспектрального аэрокосмического зондирования от исходной постановки задачи переноса солнечного излучения в системе «земная поверхность – атмосфера» до распознавания образов природно-техногенных объектов и оценки параметров состояния почвенно-растительного покрова вместе с оценкой биологической продуктивности разных типов растительного покрова. Демонстрируются примеры получения соответствующей информационной продукции обработки гиперспектральных изображений, восстановления объема фитомассы разных типов экосистем, породного состава лесной растительности, межкроновой растительности и расчета чистой первичной продукции как важнейшего показателя приложений разработанной технологии для изучения возможных изменений климата.

**Ключевые слова:** многоспектральные и гиперспектральные аэрокосмические изображения, обработка данных, лесные экосистемы, параметры состояния, биологическая продуктивность.

### Введение

Общая схема обработки данных как многоспектрального (до десяти спектральных каналов), так и гиперспектрального (сотни спектральных каналов) дистанционного аэрокосмического зондирования, включает этапы распознавания образов наблюдаемых объектов и оценки параметров, характеризующих состояние этих объектов. В работе [1] рассматриваются приложения методов, алгоритмов и расчетных программ для обработки данных летных испытаний гиперспектральной аппаратуры видимого и ближнего инфракрасного диапазонов спектра. Важнейшая особенность создаваемого универсального программного обеспечения в том, что оно применимо как для обработки многоспектральных данных аппаратуры «Видеоспектрорадиометр среднего разрешения» (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer/MODIS) спутника Terra, аппаратуры «Усовершенствованный тематический картограф» (Enhanced Thematic Mapper/ETM+) спутника Landsat-7, так и гиперспектральных данных отечественной аппаратуры.

Вместо индексных приближений («Индекс нормализованной разности» – Normalized Difference Vegetation Index/NDVI, «Индекс листовой поверхности – Leaf Area Index/LAI и др.) предлагается решение прямых задач формирования интенсивности уходящего излучения, регистрируемого аппаратурой дистанционного зондирования (ДЗ), и обратных задач восстановления параметров состояния объектов аэрокосмического мониторинга для каждого элемента обрабатываемых многоспектральных (гиперспектральных) изображений. Слабости традиционного индексного приближения связаны с тем, что при построении индексов

используются какие-то специально выбранные длины волн дистанционного зондирования. Если же имеются сотни спектральных каналов, как в случае гиперспектрального аэрокосмического зондирования, то постановка задачи требует либо использования данных всех каналов, либо обоснования оптимального числа каналов, обеспечивающих решение прикладных задач с заданной точностью. Кроме того, индексы нельзя увязать с весовыми характеристиками растительности на заданной площади, с которыми имеют дело региональные специалисты по управлению лесными и другими ресурсами.

Решение рассматриваемых в настоящей публикации прикладных задач обработки данных гиперспектрального аэрокосмического зондирования в привязке к данным аэрофотосъемки, синхронной с измерениями гиперспектральной аппаратуры, и данным наземных лесотаксационных обследований выбранной территории охватывает следующие этапы:

– постановка краевых задач о формировании интенсивности спектрального уходящего излучения, регистрируемого аппаратурой дистанционного аэрокосмического зондирования с учетом искажающего влияния атмосферы (прямая задача), с адаптацией расчетной схемы к задаче восстановления параметров состояния почвенно-растительного покрова по данным многоспектрального/гиперспектрального зондирования (обратная задача) [2, 3];

– уточнение нижнего граничного условия решаемой задачи для почвенно-растительного покрова при рассмотрении отдельных фитоэлементов (листья/хвоя, ветки и т.п.), кронового и межкронового пространства лесных экосистем при разных условиях затенения фитоэлементов и воздействии разных типов подстилающей поверхности (трава, кустарники, болота и т.п.) [4-6];

– обработка данных многоспектрального и/или гиперспектрального аэрокосмического зондирования с распознаванием образов наблюдаемых объектов и восстановлением количественных параметров состояния объектов класса «растительность» (объем зеленой фитомассы разных типов экосистем, породный состав лесной растительности, тип межкроновой растительности и др.) [7];

– получение новой информационной продукции о биологической продуктивности растительности как скорости изменения восстановленных параметров за определенный промежуток времени.

Последний этап относится к приложениям результатов обработки данных гиперспектрального зондирования для возможного их использования в моделях изменения климата с точки зрения параметризации биопродукционных процессов в этих моделях. Ниже демонстрируются соответствующие примеры таких возможных приложений.

## Постановка задачи

Постановка задача для первых трех перечисленных этапов подробно изложена в отмеченных публикациях. В этой части остановимся более подробно на четвертом этапе использования данных гиперспектрального зондирования для оценки параметров биологической продуктивности разных типов лесных экосистем.

Биопродуктивность растительности определяется как скорость роста (изменения) соответствующих характеристик растительности за вегетационный сезон, в течение года и т.п. Известны эмпирические закономерности, которые позволяют восстанавливать основные характеристики биологической продуктивности лесной древесной растительности на основе трех параметров – породы, возраста и бонитета [8]. Первые два параметра могут

быть оценены непосредственно на основе гиперспектральных данных ДЗ, поскольку они существенным образом определяют характерные особенности спектров отражения и пропускания живого листа. Бонитет лесонасаждений является производной характеристикой качества и полностью зависит от возраста и высоты выделенной древесной породы. Если в умеренных широтах определение высоты отдельно стоящего дерева по данным ДЗ высокого пространственного разрешения принципиально возможно (по длине тени), то для деревьев внутри лесного массива это представляется весьма затруднительным.

С другой стороны, могут быть построены альтернативные эмпирические модели биологической продуктивности, где вместо бонитета используется фитомасса листьев/хвои. Для лесных деревьев данный параметр в большой степени определяется плотностью и сомкнутостью крон, которые, в совокупности с растительным и почвенным покровом в межкроновой области, в свою очередь определяют спектр отражательной способности лесного полога. Фитомасса листьев/хвои является одной из ключевых характеристик древесной лесной растительности. По значениям данного параметра можно достаточно достоверно судить о нормальном или стрессовом состоянии деревьев. Кроме этого, фитомасса листьев здоровых деревьев непосредственно связана с фитомассой древесины их стволов, коры и кроновой части, а также с продукцией углерода, в частности с величиной чистой первичной продукцией, знание которой необходимо для моделирования изменений климата.

Методика решения задачи оценки параметров биопродуктивности на основе данных ДЗ состоит в следующем. На основе данных измерений в спектральных каналах фиолетовой области видимого диапазона определяется тип атмосферных условий. Далее осуществляется поиск регуляризованного решения обратной задачи. Действительно, изначальная постановка рассматриваемой обратной задачи некорректна по Адамару, т.е. решение задачи может не существовать, быть неединственным, либо существенно неустойчивым. Таким образом, искомое решение должно быть тем или иным способом регуляризовано. В нашем случае, общий принцип регуляризации состоит в поиске наилучшего соответствия между измеряемыми значениями энергетических яркостей и их значениями, полученными в результате модельных расчетов.

Определяемые при решении рассматриваемых обратных задач значения типов древесной и травянистой растительности, биомассы листвы (хвои) сомкнутости полога и ажурности крон, позволяют оценить такие параметры как «Доля поглощенной фотосинтетически активной радиации – ДПФАР» и «Чистую первичную продукцию – ЧПП». Для определения ДПФАР вводится понятие «Плотности проективного покрытия – ППП» – степень заполнения поверхности почвы растениями при рассмотрении сверху.

В нашей модели под ДПФАР понимается только часть, поглощенная зелеными фитоэлементами лесных деревьев. Для расчета FAPAR применяется следующее соотношение [9]:

$$FAPAR = A * F * [1 + R * (1 - (1 - T) * F)],$$

где  $A = A$  (Тип леса) – коэффициент поглощения фитоэлементами деревьев различного типа,  $F$  – значение ППП, рассчитанное в нашей модели,  $R = R$  (Тип межкроновой растительности) – коэффициенты отражения межкроновой растительностью различного типа,  $T = T$  (Тип леса) – коэффициент пропускания фитоэлементами деревьев различного типа. В соответствии с работой [9], значения указанных параметров оценены по цифровым данным измерений из разных литературных источников.

Чистой первичной продукцией (ЧПП) называют массу углерода, поглощенного растениями из атмосферы на единичной площади в единичный период времени за вычетом дыхания растений. Устоявшаяся единица измерений г/м<sup>2</sup>/год. В нашей методике используются параметризации – зависимости чистой первичной продукции от биомассы листвы, которые адаптированы к растительности восточно-европейской части России [8]. Туда вошли данные по таким породам леса, как сосна, ель, береза, осина и др.

## Обсуждение результатов

Проиллюстрируем сначала результаты обработки данных синхронной аэрофото- и гиперспектральной съемки на примере одной из версий гиперспектральной аппаратуры на дату съемки 20.09.2008 г. для выбранной тестовой территории (рамка на рис.1). Затем для соответствующего породного состава лесной растительности рассмотрим примеры параметризации ЧПП для разных типов лесной растительности этой территории.

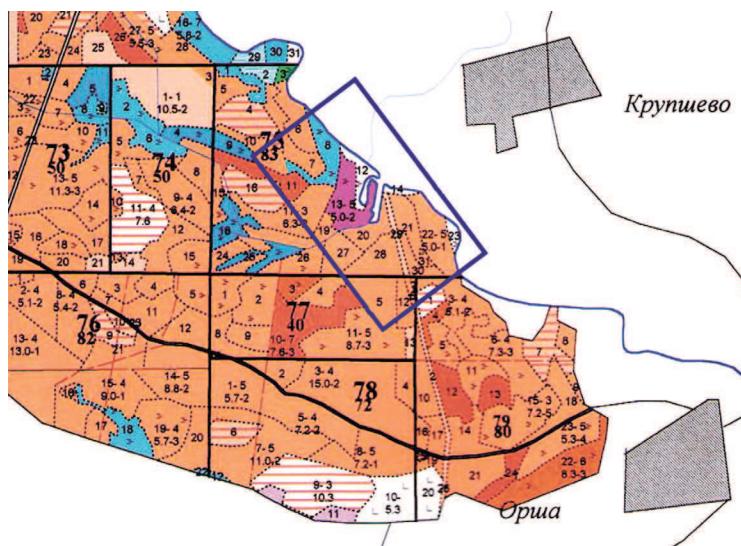


Рис. 1. Данные наземных лесотаксационных обследований выбранной территории в виде отдельных кварталов и выделов с рамкой, соответствующей иллюстрируемым в данной публикации примерам аэрофото- и гиперспектральной съемки на дату 20.09.2008 г.

Для выбранного тестового участка характерно преобладание сосновок, причем для выдела 11 квартала 75 возраст преимущественно сосновых насаждений выше, чем для остальных выделов этого квартала. Можно видеть также выдел 13 квартала 75 с преобладанием ельников, а также выдел 8 того же квартала с преобладанием березняков. Нижняя граница рамки проходит по границе вырубки (выдел 1 квартала 79).

Примеры исходного аэрофотоизображения, охватывающего территорию внутри рамки рис. 1, вместе с синхронным изображением гиперспектрометра в канале 121 (длина волны 631.4 нм) и выделенными на нем номерами выделов квартала 75 (рис. 1) приведены на рис. 2а и рис. 2б, соответственно. На рис. 2б выделены контуры преобладающего ельника (выдел 13), березняка (выдел 8), прогалины (выдел 12), заросшей тропинки в лесу (выдел 29), сосновок разных возрастов (выделы 6, 7, 14, 20, 21, 22). Можно заметить, в частности, что внутри выдела 13 присутствуют не только еловые насаждения: видны достаточно большие площади иной растительности в виде полосы серого цвета на рис. 2б, которая покрывает также выдел 12.

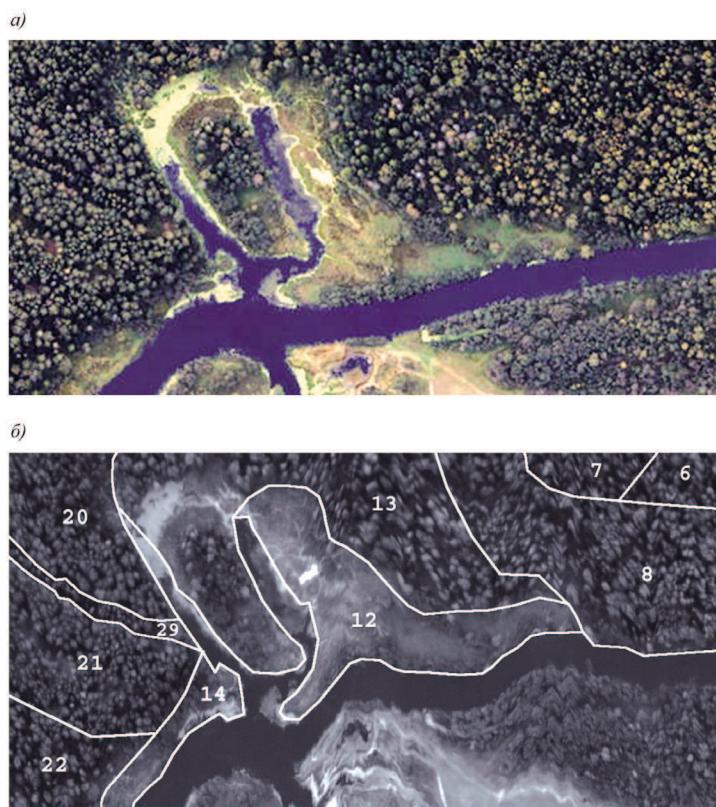


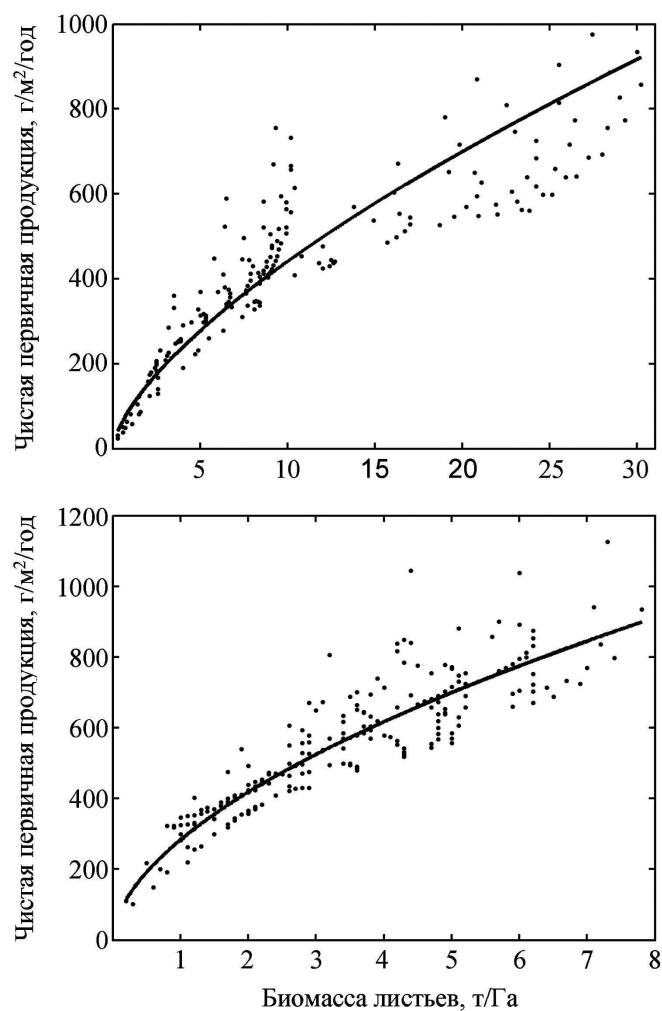
Рис. 2. Аэрофотоснимок тестового участка (а) и синхронное изображение этого участка со щели гиперспектрометра (б) с нанесенными контурами разных типов лесных покровов (цифры соответствуют выделам рис.1)

На рис. 3 приведены результаты классификации данных рис. 2б методом квадратичного дискриминантного анализа. Классификация проведена в соответствии с имеющейся наземной более подробной информацией по выделенной территории, чем данные рис. 1. Не останавливаясь подробно на процедуре классификации, отметим, что на конечном обучающем множестве исходных спектральных данных в многомерном пространстве признаков строится функция, называемая дискриминантной, которая на обучающем множестве обеспечивает минимальную ошибку классификации.



Рис. 3. Результаты классификации гиперкуба данных рис.2б

Из данных рис. 3 следует наличие, по крайней мере, шести разных классов объектов: открытые почвогрунты, открытая водная поверхность, заросшая ряской водная поверхность, травянистая болотная растительность, луговая растительность, разные типы лесной растительности. Использование исходных спектральных образов объектов в рассматриваемом методе дискриминантного анализа позволяет различить разные типы болотной растительности с преобладанием водной поверхности и почвенного покрова. Заметны также разные типы луговой растительности (более зеленой и более желтой), а также разные типы лесной растительности. В соответствии с данными рис. 1 заметно преобладание сосняков в левой части рис. 3. Вкрапления еловых насаждений можно различить не только в пределах выдела 13, но и выдела 8, который по данным рис. 1 характеризуется как выдел с преобладанием березняков. Ближе к правому верхнему углу рис. 3, действительно, можно заметить преобладание лиственных пород деревьев (березы и осины). Кроме того, в соответствии с уточненными наземными обследованиями выбранной территории выделяются ольховые насаждения, которые никак не отражены на исходных данных лесотаксации (рис.1). Проведенная наземная валидация результатов рис. 3 подтвердила повышение точности поэлементной обработки данных гиперспектрального зондирования (рис. 2б) в сравнении с исходными данными наземной лесотаксации (рис. 1).



*Рис. 4. Параметризация ЧПП как функции биомассы листьев для хвойных (верхний рисунок) и лиственных (нижний рисунок) деревьев*

Возвращаясь к оценкам биопродуктивности выделенных типов лесной растительности, отметим, что для решения этой задачи используется эмпирическая модель

$$Y = (1 - W) \left( \frac{X}{B_{decid.}} \right)^{A_{decid.}} + W \left( \frac{X}{B_{conif.}} \right)^{A_{conif.}},$$
 где  $Y$  – чистая первичная продукция (текущий прирост углерода в  $\text{г}/\text{м}^2/\text{год}$ ),  $X$  – биомасса листьев (в  $\text{т}/\text{Га}$ ), параметры  $A$  и  $B$  получены с помощью нелинейного метода наименьших квадратов (рис. 4) и имеют следующие значения: для преобладающих хвойных пород:  $A_{conif.} = 0.66722$ ;  $B_{conif.} = 0.0010883$ ; для преобладающих лиственных пород:  $A_{decid.} = 0.56139241$ ;  $B_{decid.} = 0.00004279189$ ,  $W$  – доля содержания хвойных пород.

В дальнейшем развитии разработанного программного обеспечения обработки данных многоспектрального и гиперспектрального зондирования планируется ввести параметры, характеризующие значения фитомассы надземной и подземной части древостоя, в частности, фитомассу ствола и корней, а также древесины крон. Применительно к гиперспектральным изображениям планируется расширять модельную базу данных. Для этого необходимо провести расчет спектральных яркостей отраженного излучения для смешанного леса с конкретным видовым составом. Также необходимо проделать работу по уточнению, согласованию и дополнительной спецификации используемых параметризаций.

## Заключение

Были показаны информационно-прикладные аспекты обработки данных многоспектрального и гиперспектрального аэрокосмического зондирования для решения задач распознавания образов природно-техногенных объектов, восстановления параметров состояния почвенно-растительного покрова и использования получаемой информационной продукции для нахождения оценок чистой первичной продукции в применении к моделям изменений климата. Вместо неясных индексных характеристик (NDVI, LAI) и их различных модификаций для описания состояния растительного покрова предлагается определение объема фитомассы растительности в двумерных координатах «плотность растительного полога – ажурность», т.е. дырчатая структура, крон и межкронового пространства с учетом затенений фитоэлементов». В результате значения проективного покрытия почв растительностью восстанавливаются на основе предлагаемой новой информационной продукции без использования этих индексов. Расчет фотосинтетически активной радиации (ФАР) требует построения модели приходящего солнечного излучения, достигающей конкретной по широте и долготе территории на дату съемки, а также той части приходящей ФАР, которая идет на фотосинтез (остальная часть бесполезно рассеивается фитоэлементами). Скорости изменения восстановленных значений объема фитомассы растительности в единицу времени в большей степени характеризуют биологическую продуктивность соответствующих экосистем, чем значения «чистая первичная продукция» (NPP), оценки которых обычно основываются на тех же индексных представлениях о запасании или убывании углерода в каждом конкретном случае.

Исследования проводятся в рамках проектов РФФИ №08-07-13515\_офи\_ц и 09-05-00171.

## Литература

1. Козодеров В.В., Кондранин Т.В., Казанцев О.Ю., Бобылев В.И., Щербаков М.В., Борзяк В.В., Дмитриев Е.В., Егоров В.Д., Каменцев В.П., Беляков А.Ю., Логинов С.Б. Обработка и интерпретация данных гиперспектральных аэрокосмических измерений для дистанционной диагностики природно-техногенных объектов // Исследование Земли из космоса, 2009. №2. С.36-54.
2. Козодеров В.В. Атмосферная коррекция видеоизображений // Исследование Земли из космоса, 1983. №2. С.65-75.
3. Кондратьев К.Я., Козодеров В.В., Федченко П.П. Аэрокосмические исследования почв и растительности // Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 232 с.
4. Козодеров В.В., Косолапов В.С. Модели оценки состояния почв и растительности по многоспектральным спутниковым данным // Исследование Земли из космоса, 1993. №5. С.40-57.
5. Козодеров В.В., Косолапов В.С., Садовничий В.А., Тимошин О.А., Тищенко А.П., Ушакова Л.А., Ушаков С.А., под редакцией В.А. Садовничего. Космическое землеведение: информационно-математические основы // М.: изд. Московского университета, 1998. 576 с.
6. Козодеров В.В., Садовничий В.А., Ушакова Л.А., Ушаков С.А., под редакцией В.А. Садовничего. Космическое землеведение: диалог природы и общества. Устойчивое развитие // М.: изд. Московского университета, 2000. 640 с.
7. Козодеров В.В., Кондранин Т.В. Методы оценки почвенно-растительного покрова по данным оптических систем дистанционного аэрокосмического зондирования // М.: изд. МФТИ, 2008. 222 с.
8. Швиденко А.З., Щепащенко 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.
9. Nilson T., Kuusk A., Lang M., and Lükk T. Forest reflectance modeling: Theoretical aspects and applications // Ambio, 2003. V. 32. №8. P.535-541.

## Multispectral and hyperspectral airspace imagery processing: information and applied aspects

V.V. Kozoderov<sup>1</sup>, E.V. Dmitriev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*M.V.Lomonosov Moscow State University  
119991, Moscow, GSP-1, 1 Vorobievy gory, MSU  
E-mail: vkozod@mes.msu.ru*

<sup>2</sup>*Institute of Numerical Mathematics of Russian Academy of Sciences  
119333, Moscow, 8 Gubkina str.  
E-mail: yegor@inm.ras.ru*

Major stages of creation of unified software and algorithm tools are considered for data processing from different types of multispectral and hyperspectral airspace remote sensing instruments starting from initial assertion of solar radiation transfer problem in the “Earth surface – atmosphere” system up to pattern recognition of natural and anthropogenic objects as well as the state parameters assessment for soil-vegetation cover together with the biological productivity assessment for various types of vegetation. Examples are demonstrated of gaining the relevant information products concerning hyperspectral imagery processing, the vegetation phytomass volume retrieval of various types of ecosystems, forest vegetation species, inter-crown vegetation and calculation of net primary productivity as an important indicator of the elaborated technology applications to study possible climate changes.

**Key words:** multispectral and hyperspectral airspace imagery, data processing, forest ecosystems, state parameters, biological productivity.