

Алгоритмическое и программное обеспечение технологии восстановления параметров состояния природных объектов по данным многоспектрального и гиперспектрального аэрокосмического зондирования

В.В. Козодеров¹, В.В. Борзяк¹, Е.Д. Дмитриев², В.Д. Егоров²

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

²Институт вычислительной математики РАН

Демонстрируются примеры алгоритмического и программного обеспечения обработки многоспектральных космических изображений среднего (7 спектральных каналов, пространственное разрешение около 500 м) и высокого пространственного разрешения (6 спектральных каналов, пространственное разрешение около 30 м), а также гиперспектральных самолетных измерений (число спектральных каналов около 200, пространственное разрешение около 2 м с высоты 10 км). Показаны возможности получения новой информационной продукции обработки изображений и спектров при распознавании образов объектов природно-техногенной сферы и количественной оценки состояния этих объектов на основе предлагаемых технологических усовершенствований.

Введение

Основой решения задач обработки многоспектральных аэрокосмических изображений и регистрируемых спектров интенсивности уходящего излучения служат принципы распознавания образов и оценки состояния объектов природно-техногенной сферы – обширной отрасли прикладной математики, связанной с описанием формирования полей уходящего излучения. В рамках данного направления научно-технологических разработок развиваются методы, алгоритмы и расчетные программы решения прямых задач расчета интенсивности уходящего солнечного излучения, регистрируемого аппаратурой дистанционного зондирования, и обратных задач восстановления параметров, характеризующих состояние объектов аэрокосмического мониторинга, для каждого элемента обрабатываемых многоспектральных изображений и спектров. Представление данных дистанционного зондирования в терминах абсолютной энергии регистрируемого излучения позволяет объединить эти данные с данными моделирования уходящего излучения и тем самым использовать методы вычислительной математики и информатики для решения прикладных задач оценки параметров состояния объектов аэрокосмического мониторинга. В дополнение к традиционным подходам к отображению пространственных характеристик яркости наблюдаемых объектов при обработке абсолютно калиброванных данных гиперспектрального зондирования появляются новые возможности поэлементного восстановления количественных параметров состояния объектов с учетом тонкой структуры их спектральных образов.

Развитие новых технологий использования данных аэрокосмических измерений в итоге оказывается зависящим от решения прямой задачи математического описания интенсивности уходящего излучения и обратной задачи оценки параметров состояния наблюдаемых объектов [1-2].

Прямая задача сводится к созданию исходной базы спектральных образов объектов природно-техногенной сферы при различных условиях их освещения Солнцем и оптической толщины атмосферы для множества реальных углов визирования отдельных элементов таких объектов. Для почвенно-растительного покрова возникает необходимость включения в соответствующую расчетную схему особенностей взаимодействия падающего солнечного излучения с отдельными фитоземлементами (листья/хвоя, ветки и др.) такой сложной системы с учетом их спектральной отражательной способности и условий их затенения при различных высотах Солнца.

Специалисты-биологи имеют свои собственные подходы для определения объема фитомассы пробных площадок (в поле, в лесу и т.п.). Например, в полевых условиях скашивается травянистая растительность в пределах выбранной площадки (2х2 метра) и взвешивается сырой вес об-

разцов растительности, а при необходимости определяется и сухой вес. Так находится объем сырой или сухой фитомассы травянистой растительности. Для отдельных деревьев объем фитомассы определяется по таким эмпирическим параметрам, как диаметр ствола на уровне груди. У биологов-лесников для выбранных тестовых участков их наземных обследований существуют также эмпирические связи между значениями зеленой фитомассы и общей биомассой древесины. В наших разработках предлагается восстановление именно этих количественных параметров состояния лесных экосистем на больших площадях в пределах каждого элемента обрабатываемого многоспектрального изображения. При этом вводится физико-математическое описание условий формирования спектральных образов наблюдаемых объектов и обращения основного функционала многоспектральных данных дистанционного зондирования.

Решение обратной задачи восстановления количественных параметров состояния растительности (в частности, объема фитомассы вегетирующей растительности) для каждого элемента многоспектрального космического изображения сводится к соответствующим преобразованиям данных на основе модельных расчетов множества всех возможных состояний системы. Для наиболее сложных по структуре лесных экосистем поиск компьютерных решений организован в координатах «плотность лесного полога – ажурность крон деревьев». Именно в этих координатах создана расчетная база спектральных образов соответствующих объектов в виде отдельных «листов» такой расчетной «книги». Фактически нахождение численных решений обратной задачи состоит в поиске пересечений кривых, относящихся к отдельным спектральным каналам в упомянутых координатах. Поскольку решение может быть неединственным, то должен быть организован поиск всех возможных решений (пересечений спектральных кривых) для заданных «листов книги» с использованием процедуры осреднения как информационной меры соответствия модельных и измерительных данных. При этом в каждом «листе книги» ищется также минимальное расстояние от пересечения указанных кривых до соответствующей изолинии объема фитомассы растительности, что и определяет возможности восстановления данного параметра для каждого элемента обрабатываемого многоспектрального изображения. Соответственно, значительно возрастает компьютерное время поиска решений. Поэтому разрабатываемые технологии ориентированы на использование высокопроизводительных многопроцессорных вычислительных систем, но значительное внимание при реализации технологии уделяется также повышению расчетной эффективности программного обеспечения для его применения на обычных персональных компьютерах.

Конкретные примеры реализации технологии количественной оценки состояния объектов природно-техногенной сферы по данным дистанционного космического зондирования разного пространственного разрешения показаны в работах [3-5]. Примеры охватывают обработку данных аппаратуры MODIS/Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer среднего пространственного разрешения (250-500 м) спутника Terra и аппаратуры ETM+/Enhanced Thematic Mapper спутника Landsat-7 высокого пространственного разрешения (30 м). Полученные результаты показали необходимость увеличения числа спектральных каналов и спектрального разрешения аппаратуры дистанционного зондирования для повышения точности распознавания наблюдаемых объектов.

В последние годы появились гиперспектральные системы аэрокосмического зондирования, в которых возможно использование 200 и более спектральных каналов при разрешении в единицы нанометров во всей видимой и ближней инфракрасной области спектра. Стали говорить о нанодиагностике объектов природно-техногенной сферы по данным указанных измерений. Реальные информационные возможности таких систем до конца не ясны, но при таком высоком спектральном разрешении открываются возможности различения тонкой структуры отдельных линий и полос поглощения излучения различными соединениями атмосферы и земной поверхности. Однако разработанное ранее алгоритмическое и программное обеспечение рассматриваемой технологии обработки многоспектральных изображений с некоторыми доработками применимо и для обработки гиперспектральных данных аэрокосмического зондирования.

Некоторые результаты соответствующих приложений данных многоспектральных и гиперспектральных измерений для территории Тверской области на основе алгоритмического и программного обеспечения обработки данных приведены ниже.

Постановка задачи

В соответствии с требованиями разработки новой технологии оценки состояния объектов природно-техногенной сферы по данным аэрокосмического зондирования вводится физико-математическое описание условий формирования спектральных образов наблюдаемых объектов и обращения основного функционала многоспектральных данных. Указанный расчетный функционал служит основной математической категорией моделирования прямой задачи. Как сказано выше, удобной формой отображения результатов модельных расчетов для почвенно-растительного покрова оказалось их унифицированное представление в координатах, которые характеризуют плотность распределения основных рассеивателей падающего излучения и степень заполнения фитоэлементами пространства между кронами деревьев или стеблями травянистой растительности. Первый из введенных таким образом параметров характеризует плотность полога (для лесной или другой растительности); второй из них в применении к лесным экосистемам дает представление об ажурности крон деревьев. Обозначим эти основные параметры через $(C_{п}, A_{кр})$, соответственно.

Функционал интенсивности уходящего излучения оказывается зависящим от множества параметров (тип лесной растительности, тип межкрановой растительности, условия затенения фитоэлементов при их освещении прямым солнечным излучением и диффузным рассеянным излучением, приходящим со всех участков небесной сферы, оптическая толщина атмосферы и др.), включая объем фитомассы растительности $M(C_{п}, A_{кр})$. В реальности функционал представляет собой интеграл свертки суммарного падающего излучения с весовой функцией чувствительности используемой аппаратуры дистанционного зондирования в пределах телесного угла визирования наблюдаемого объекта при конкретных значениях зенитного угла визирования (θ) соответствующего объекта и разности азимутов визирования и Солнца (φ).

Если уровень земной поверхности обозначить вертикальной координатой $z = 0$, а уровень верхней границы атмосферы (уровень спутниковых наблюдений) через $z = H$, то с помощью современных схем переноса излучения можно увязать значения расчетного функционала на этих уровнях. Теория переноса излучения справедлива для атмосферы как достаточно прозрачной среды разной степени замутнения. Однако, теория переноса не работает при формировании поля отраженного излучения в указанной сложной системе, состоящей из отдельных фитоэлементов и межкранового пространства [5].

Спектральное распределение энергии падающего излучения Солнца на верхней границе атмосферы $S^{(\lambda)}_{z=H}$ для любой длины волны λ оптического диапазона считается известным. Интенсивности прямого солнечного излучения $I^{(\lambda)}_{z=0,s}(\theta_0)$, достигающего земной поверхности при заданном зенитном угле Солнца (θ_0), а также диффузного рассеянного излучения атмосферы как рассеивающей среды $I^{(\lambda)}_{z=0,d}(\theta', \varphi')$ рассчитываются для дискретных k -моделей оптической толщины атмосферы. Здесь (θ', φ') – множество значений зенитных углов и азимутов для падающего излучения, соответственно. Рассеивающие и поглощающие свойства атмосферы связаны с наличием как молекулярных газовых компонентов воздуха (кислород, углекислый газ, озон и др.), так и с частицами атмосферного аэрозоля разных размеров.

Общий эффект рассеяния и поглощения приходящего солнечного излучения можно оценить по величине спектрального пропускания атмосферы $P^{(\lambda)}_k$ с учетом так называемой «яркости атмосферной дымки» $D^{(\lambda)}_k$, которая функционально связана с пропусканием и характеризует процесс многократного рассеяния солнечного излучения в атмосфере. Спектральное пропускание атмосферы часто увязывают с ее спектральной оптической толщиной – основной характеристикой

экспоненциального ослабления прямого солнечного излучения на различных наклонных трассах его прохождения через атмосферу. На практике широко используются эмпирические связи между значениями $P_k^{(\lambda)}$ и $D_k^{(\lambda)}$ в приложениях данных наземных спектрофотометров, работающих по прямому солнечному излучению.

Если представить общую площадь S_0 , охватываемую полем зрения измерительной аппаратуры, в виде суммы межкрановой части S_1 и крановой части деревьев S_2 , то в рамках заданной модели можно рассчитать, с какими весами входят спектральные отражательные способности межкрановой растительности $\rho_1^{(\lambda)}$, крановой растительности $\rho_2^{(\lambda)}$, а также многократного рассеяния излучения внутри крон $\rho_3^{(\lambda)}$. Учитывая наличие освещенных и затененных участков межкрановой растительности (площади S_1 и $S_1^{(t)}$, соответственно), указанный вес для $\rho_1^{(\lambda)}$ будет равен $W_1 = (S_1 - S_1^{(t)})/S_0$. В крановой части растительности важны не только условия затенения отдельных фитоэлементов, но и межкрановые просветы $S_2^{(m)}$, так что вес, с которым входит отражательная способность $\rho_2^{(\lambda)}$ в общую схему формирования поля зрения аппаратуры, равен $W_2 = (S_2 - S_2^{(m)} - S_2^{(t)})/S_0$. Наконец, отражательная способность $\rho_3^{(\lambda)}$, связанная с многократным рассеянным излучением внутри крон, должна быть умножена на $W_3 = S_2^{(m)}/S_0$. К сформированной таким образом взвешенной сумме $W_1\rho_1^{(\lambda)} + W_2\rho_2^{(\lambda)} + W_3\rho_3^{(\lambda)}$ после ее умножения на сумму падающего излучения $I_{z=0,s}^{(\lambda)}(\theta_0)$ и диффузно рассеянного излучения $I_{z=0,d}^{(\lambda)}(\theta', \varphi)$ нужно добавить еще условие освещения затененных участков наблюдаемой системы. Затененные участки системы освещаются лишь диффузным излучением, так что к указанной взвешенной сумме добавляется еще одно слагаемое $\{[S_1^{(t)}\rho_1^{(\lambda)} + S_2^{(t)}\rho_2^{(\lambda)}]/S_0\} I_{z=0,d}^{(\lambda)}(\theta', \varphi)$.

Общая сумма, характеризующая условие полного освещения отдельных элементов системы в пределах поля зрения измерительной аппаратуры, должна быть умножена на функцию спектральной чувствительности этой аппаратуры $F^{(\lambda)}(\theta, \varphi; \theta', \varphi'; \theta_0)$. После интегрирования получаемого таким образом выражения по полусфере для приходящего излучения и в пределах длин волн спектрального разрешения аппаратуры получается выражение для основного функционала интенсивности уходящего излучения в пределах поля зрения используемой аппаратуры при конкретных значениях (θ, φ) .

В указанных обозначениях сомкнутость лесного полога определяется с помощью выражения $C_{\text{п}} = S_2/S_0$, ажурность крон деревьев $A_{\text{кр}} = S_2^{(m)}/S_0$. Долю теней в межкрановых областях системы можно обозначить как $\delta_1 = S_1^{(t)}/S_0$, на кронах деревьев как $\delta_2 = S_2^{(t)}/S_0$. Предлагаемая оригинальная модель расчета спектральной интенсивности уходящего от земной поверхности излучения для известных из атмосферной модели значений $I_{z=0,s}^{(\lambda)}(\theta_0)$ и $I_{z=0,d}^{(\lambda)}(\theta', \varphi)$ падающего излучения записывается в следующем символическом виде

$$J_{z=0}^{(n)} \{W_p \rho_p^{(\lambda)} [M(C_{\text{п}}, A_{\text{кр}}); \theta, \varphi; \theta_0] | [\delta_1, \delta_2]_{ijk} * F^{(\lambda)}(\theta, \varphi; \theta_0),$$

где $W_p \rho_p^{(\lambda)}$ – уже упомянутые комбинации спектральных отражательных способностей отдельных фитоэлементов лесной растительности, которые формируют величину фитомассы единицы объема лесного полога с весовыми функциями площадей этих фитоэлементов в пределах общей площади S_0 (индекс $p = 1, 2, 3$ характеризует межкрановую, крановую и «остальную часть» этой площади, соответственно). Эти комбинации зависят от введенных выше характеристик ($C_{\text{п}}, A_{\text{кр}}$), от которых в свою очередь зависят значения объема фитомассы M ; эти комбинации зависят также от угловых координат солнечного освещения и визирования наблюдаемых объектов при условии (символ « $\langle \rangle$ ») учета моделей затенения отдельных фитоэлементов (δ_1, δ_2). Соответствующие комбинации (по индексу проводится p суммирование), которые рассчитываются для каждого типа объекта (индекс i), каждого типа межкрановой растительности (индекс j) и каждого типа состояния атмосферы (индекс k), интегрируются (символ « $*$ » интеграла свертки) с весовой функцией спектральной чувствительности аппаратуры и в пределах ее поля зрения $F^{(\lambda)}(\theta, \varphi; \theta_0)$. Выражение записано для конкретного спектрального канала (индекс n) с учетом интегральных свойств

аппаратуры, а специфика записанного выражения как функционала отражена в представленном формульном виде прямой буквой J (как матрицы).

Записанное выражение для функционала представляет собой значения интенсивности уходящего излучения в пределах спектральных каналов измерительной аппаратуры с учетом монохроматических значений падающего излучения $I_{z=0,s}^{(\lambda)}(\theta_0)$ и $I_{z=0,d}^{(\lambda)}$. В итоге должна быть задана сетка расчетных значений представленного вариационного функционала для моделирования влияния различных пород лесной растительности, спектральных отражательных способностей фитоэлементов, углов визирования соответствующих почвенно-растительных объектов при их дистанционном зондировании и условий рассеяния/поглощения атмосферы в момент съемки для заданной измерительной аппаратуры. Проведение необходимых расчетов по существу и составляет содержание прямой задачи формирования интенсивности уходящего излучения в отдельных спектральных каналах того или иного типа аппаратуры дистанционного зондирования.

Выходная продукция проведения таких расчетов – создание банка данных спектральных образов исследуемых объектов почвенно-растительного покрова при различных условиях их освещения Солнцем, визирования из космоса и оптического состояния атмосферы. Как сказано выше, полученные результаты удобно представить в виде «книги», отдельные «страницы» которой обозначены с помощью координат $(C_{п}, A_{кр})$.

Проведенные ранее исследования переноса солнечного излучения в атмосфере как помехи, искажающей информацию о спектральной интенсивности уходящего излучения от земной поверхности, показали, что указанный функционал для верхней границы атмосферы ($z = H$) можно записать в виде

$$J_{z=H}^{(n)} = J_{z=0}^{(n)} P_k^{(n)} + D_k^{(n)}$$

через его значения на уровне нижней границы атмосферы ($z = 0$) и уже упомянутые выше значения спектрального пропускания атмосферы $P_k^{(n)}$ и яркости атмосферной дымки $D_k^{(n)}$. Тем самым, рассчитанные значения функционала спектральной интенсивности уходящего излучения для уровня верхней границы атмосферы можно связать с данными измерений соответствующей аппаратуры, установленной на космическом носителе. Поэлементное восстановление значений M $(C_{п}, A_{кр})$ после распознавания образов соответствующих объектов – основа решения рассматриваемой здесь задачи количественной оценки параметров состояния объектов по их многоспектральным изображениям и спектрам.

Исходные данные

Исходными данными аппаратуры MODIS и ETM+ являются цифровые матрицы абсолютно калиброванных данных спектральных каналов. Для аппаратуры MODIS это 7 каналов: 0.459-0.479 мкм; 0.545-0.565 мкм; 0.62-0.67 мкм; 0.841-0.876 мкм; 1.23-1.25 мкм; 1.628-1.652 мкм; 2.105-2.155 мкм. Первый из этих каналов служит для определения уровня замутнения атмосферы в момент съемки. Второй канал характеризует максимум энергии солнечного излучения, достигающего земной поверхности. Третий канал относится к полосе поглощения хлорофилла – основного пигмента фитопланктона в воде и зеленых листьев (хвои) лесной и другой растительности, т.е. данный канал дает представление о фотосинтезе – запасании углерода в течение вегетационного сезона. Четвертый канал – это область максимума отражательной способности вегетирующей растительности; это максимум отсутствует для объектов типа «растительность» после прекращения вегетационного сезона. Три остальные каналы определяют особенности отражательной способности разных типов почвенно-растительного покрова и используются для классификации наблюдаемых объектов природно-техногенной сферы. Для аппаратуры ETM+ общее число используемых каналов равно 6 (отсутствует 5-й из перечисленных выше каналов, а 4-й канал охватывает диапазон 0.78-0.90 мкм).

Пространственное разрешение всех перечисленных каналов аппаратуры MODIS около 500 м, за исключением 3-го и 4-го каналов, где разрешение составляет около 250 м. Для всех указанных каналов аппаратуры ETM+ пространственное разрешение около 30 м.

Иллюстрируемые ниже данные гиперспектрометра, разработанного в НПО «Лептон», охватывают область спектра от 0.4 мкм до 1.0 мкм с реально используемым числом каналов около 200 с пространственным разрешением около 2 м с высоты самолетной аэрофотосъемки около 1 км.

Исходные данные всех трех типов измерительной аппаратуры вводятся в компьютерную программу, которая позволяет проводить классификацию объектов природно-техногенной сферы (выделять открытые водные поверхности, облачность, города и поселки, распаханнные почвы и др.), а для каждого элемента разрешения класса «растительность» восстанавливать значения объема фитомассы по изложенной выше схеме.

Обсуждение результатов

На рис.1 приведен пример получения информационной продукции обработки изображения аппаратуры MODIS для территории Тверской области на дату съемки 02.10.2005 г. Сначала производится распознавание объектов для каждого элемента обрабатываемого 7-канального изображения; выделяются классы: облака, открытые водные поверхности, почвенно-растительный покров. Затем для последнего из этих классов производится поэлементное восстановление объема фитомассы и других параметров состояния растительности (данные о породном составе лесной растительности, о типе подстилающей поверхности и др.).

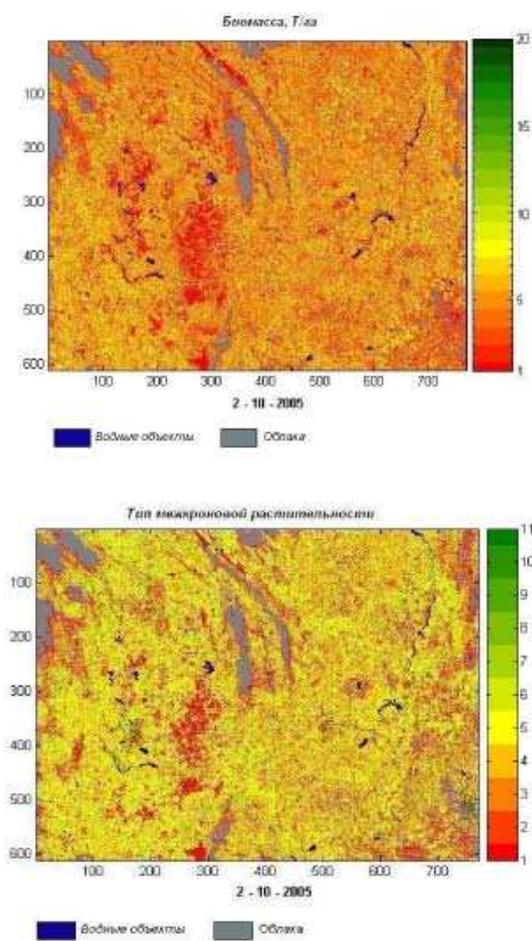


Рис. 1. Значения объема фитомассы растительности (вверху) и породного состава лесной растительности (внизу) на дату съемки 02.10.2005 г. аппаратуры MODIS

Верхняя часть рис. 1 дает представление о восстановленных значениях объема фитомассы зеленой/желтой растительности для данного изображения размерностью 800 x 600 элементов разрешения, а нижняя часть рис. 1 – о породном составе тех элементов разрешения, которые классифицированы как «лесная растительность». Цветовая шкала верхней части рис. 1 характеризует значения объема фитомассы от 1 до 20 т/га, нижней части рис. 1 – преобладание лиственных (на цветовой шкале значения от 1 до 4) и хвойных пород (значения 8-11) в соответствующих районах выбранной территории. При этом малые значения объема фитомассы (преобладающие красные цвета) в верхней части рис. 1 могут относиться к болотной, луговой и другой низкорослой растительности, а средние значения иллюстрируемого показателя в нижней части рис. 1 (желто-зелено-зеленые цвета) характеризуют смешанный лес. Синим цветом на рис. 1 показаны водные объекты, серым – облачные образования.

На изображениях рис. 1 можно видеть в левой части систему Верхневолжских озер (между столбцами 100 и 200), реку Волга вблизи строк 400-450 и реку Волга в правой части (между столбцами 600 и 700). Можно видеть также водохранилище вблизи Вышнего Волочка (строка вблизи 280, столбец приблизительно соответствует 300). Из характерных особенностей объектов других цветов можно отметить ярко выраженное пятно красного цвета как в верхней части рис. 1, так и в нижней части рис. 1 (строки 300-500, столбцы 250-300). По данным верхней части этого рисунка можно утверждать о преобладании болотных экосистем, а по данным его нижней части – о преобладании лиственных пород деревьев в этом районе. При внимательном рассмотрении на данных рис. 1 можно видеть контуры реки Волга вплоть до города Тверь (приблизительно соответствует номеру строки 400 и столбца 450).

Данные рис. 2 характеризуют результаты распознавания объектов и восстановления объема фитомассы растительности по данным аппаратуры ЕТМ+ для территории вблизи г. Тверь (серый цвет слева в центре на верхнем рисунке и чуть выше центра на нижнем рисунке) на две разные даты съемки в разные годы: летом (вверху) и осенью (внизу). В верхней части рис. 2 приведены нефильТРованные данные (приводятся результаты для 5 x 5 квадратов размерностью 310 x 310 элементов каждый), в нижней части – фильТРованные данные в соответствии со специальной процедурой (приводятся результаты для 2 x 2 квадратов размерностью 1000 x 1000 элементов каждый). Математическая фильТрация данных необходима вследствие возможной сильной изменчивости данных дистанционного зондирования для соседних элементов разрешения. Говорят об артефактах формирования интенсивности уходящего излучения, регистрируемого аппаратурой дистанционного зондирования: при таком достаточно высоком пространственном разрешении (около 30 метров) излучение для двух соседних элементов может формироваться как от освещенных частей, то от затененных частей полога леса.

Как и при обработке данных рис. 1, сначала проводилась классификация выбранных изображений: выделялись элементы разрешения, соответствующие облакам (здесь обозначены белым цветом), водным объектам (сохранился синий цвет), почвогрунты (здесь серый цвет), растительности (остальные цвета, кроме черного – это «особые объекты», соответствуют переходным объектам между растительностью и почвой). К числу указанных «особых объектов» относятся, например, торфоразработки и некоторые другие объекты. Система болот и торфоразработок видна, в частности, в правых верхних углах обоих рис. 2 с характерным контуром озера Светлое. Возможные пропуски данных обозначены на рис. 2 фиолетовым цветом (нижняя шкала).

При некоторых различиях в визуализации данных рис. 2 (на верхнем изображении преобладают желто-красные цвета, на нижнем – оттенки зеленого цвета) можно отметить в целом сходство полученных результатов восстановления объема фитомассы растительности. Различия обусловлены шкалами визуализации (приведены справа): до 25 т/га для нефильТРованных данных и до 17 т/га для фильТРованных данных. В нефильТРованных данных возможно появление избыточно больших значений фитомассы для отдельных элементов разрешения; при фильТрации эти «выбросы» сглаживаются. При сравнении данных рис. 2 также следует иметь в виду, что верхнее изображение получено в летний сезон, а нижнее – в осенний сезон. Соответственно, на верхнем

изображении в районе торфоразработок преобладают красные оттенки вегетирующей растительности с невысокими значениями объема фитомассы, а на нижнем изображении в этом районе преобладают черные оттенки более желтой растительности.

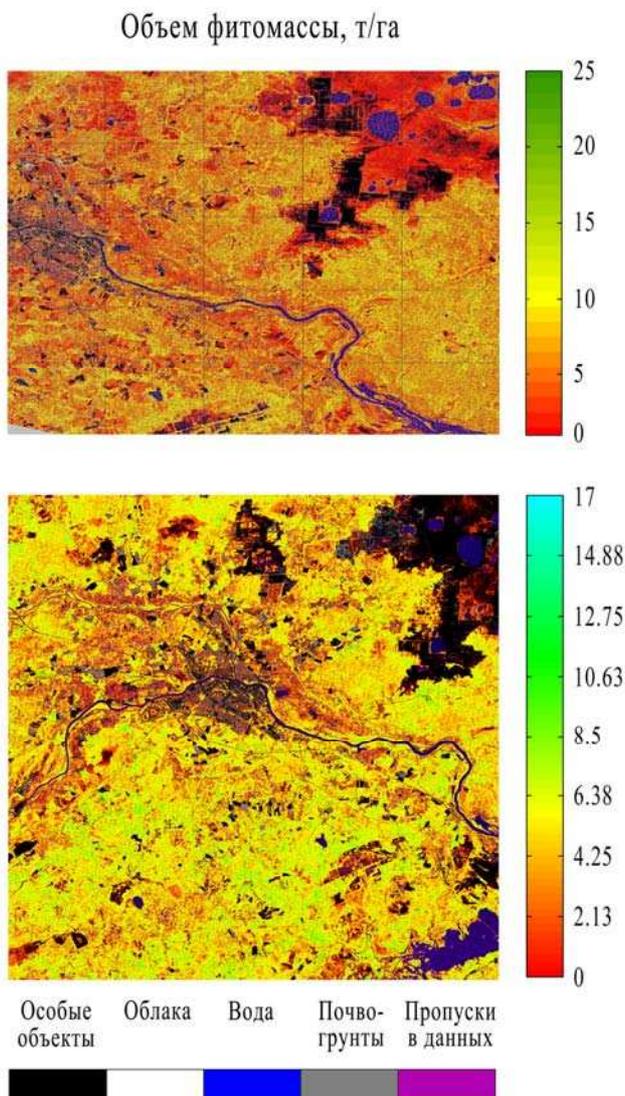
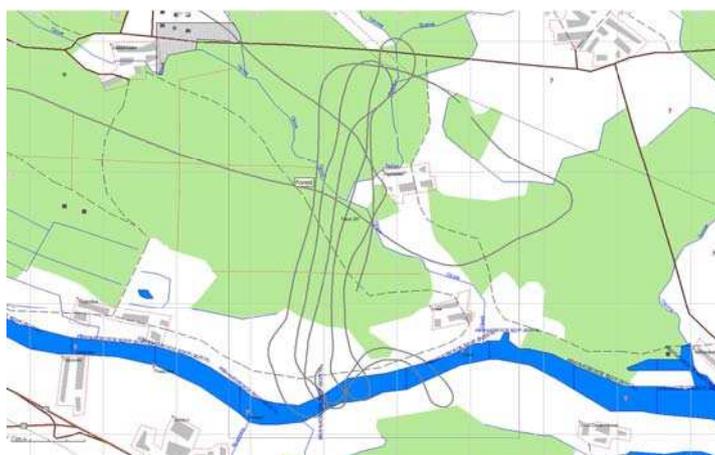


Рис. 2. Результаты восстановления объема фитомассы растительности для одной и той части территории Тверской области для двух дат съемки: 30.07.2001 – сверху и 02.09.1999 – внизу

При обработке данных рис. 1 и рис. 2 использовалось одно и то же программное обеспечение. Различия полученных результатов – в более детальной классификации объектов на рис. 2 при более высоком пространственном разрешении в сравнении с данными рис. 1 более низкого разрешения. В первом случае появляются, например, объекты типа почвогрунтов (дорожно-транспортная инфраструктура и др.), наличие которых не столь заметно при классификации данных рис. 1. Дальнейший этап реализации предлагаемой технологии – развитие аналогичных приложений для данных гиперспектральной съемки, совмещенной с аэрофотосъемкой, при установке обоих типов измерительной аппаратуры на самолет Як-12.

Иллюстрируемые здесь результаты обработки исходных данных гиперспектрометра соответствуют летному эксперименту, который проводился на территории Савватьевского лесничества. Эта тестовая территория расположена к востоку от г. Тверь (на рис. 2 видны два водоема на выбранной территории вдоль самого верхнего изгиба реки Волга). Иллюстрируемые ниже примеры относятся к дате самолетной съемки 30.09.2007 г.

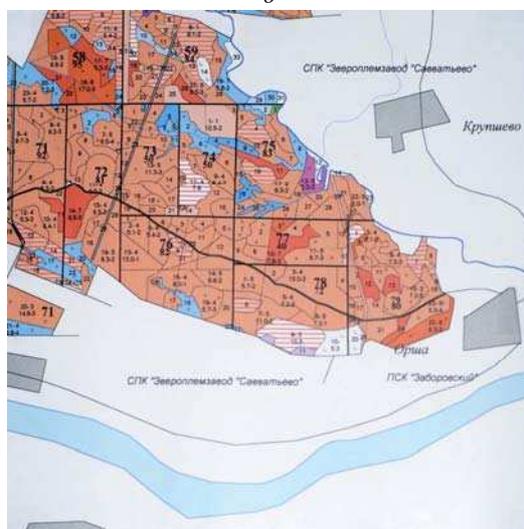
Маршруты облета выбранного тестового участка в виде пяти отдельных «полос» представлены на рис. 3а. Ориентир – река Орша, впадающая в реку Волга, и населенный пункт Крушицево



а



б



с

Рис. 3. Исходные данные летного эксперимента на территории Савватьевского лесничества Тверской области, проведенного 30.09.2007 г.

а – маршруты облета тестовой территории (сплошные линии); далее иллюстрируются результаты для одного из 5 отдельных треков (справа от надписи «Forest») облета, которые проводились с севера на юг и обратно от р. Орша до Ивановского водохранилища (р. Волга)

б – аэрофотоснимок тестовой территории, развернутый на 90 градусов относительно направления с севера на юг; приблизительно в его центре (справа от р. Орша) как ориентир видна вырубка

с – данные наземных лесотаксационных обследований той части рис.3б, которая расположена справа от р. Орша

(кратчайшее расстояние до реки Волга около 2.5 км) справа/слева от трассы облета. На рис. 3*b* приведен общий аэрофотоснимок одной из трасс, собранный из отдельных кадров аэрофотосъемки. Снимок следует развернуть на 90 градусов для правильной ориентации на местности, тогда н.п. Крупшево будет находиться справа. Река Орша течет с северо-запада на юго-восток.

На рис. 3*b* видны слева направо: населенный пункт; река Орша; дорога в форме дуги (в реальности это проселочная дорога с тенью на ней от деревьев); лесные вырубki; подлесок; берег реки Волга. Можно видеть также просеку, идущую от реки Орша до указанной затененной дороги. Приблизительно на середине пути этой просеки как ориентир видна также еще одна вырубка.

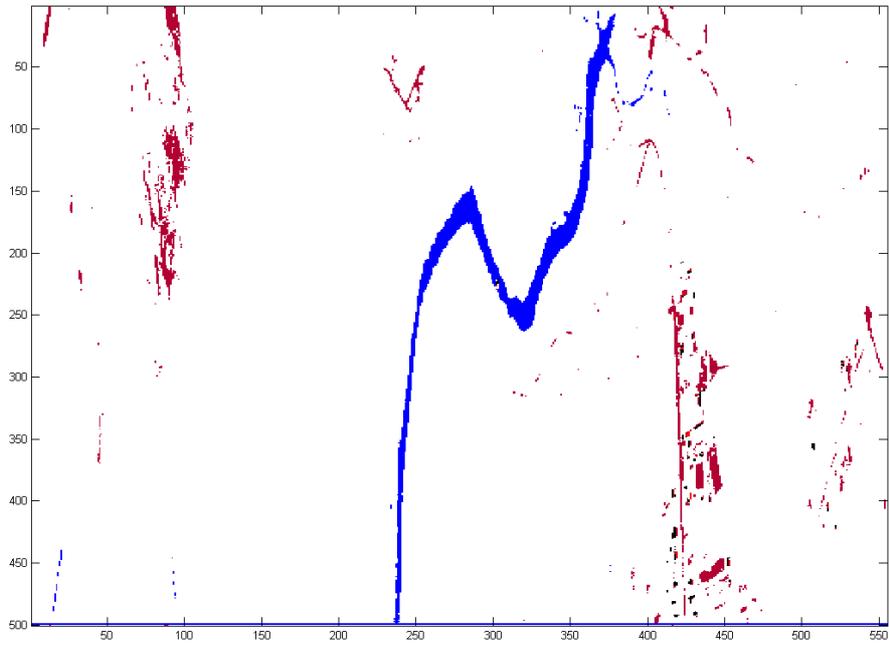
Наземные данные проведенных лесотаксационных работ (рис. 3*c*) относятся к территории между этой просекой и рекой Орша. Данные рис. 3*c* представлены уже в правильной ориентации относительно направлений на север-юг. Указанная просека видна справа на рис. 3*c*. Лесотаксационные работы обычно проводятся по отдельным кварталам и выделам – внутренним участкам с характерными контурами лесонасаждений. В процессе проведения наземных обследований были собраны необходимые данные по кварталам 75-79 (рис. 3*c*), внутри которых расположены выделы со своей нумерацией. Для отдельных выделов в типичных лесотаксационных планах фиксируется площадь, состав древостоя, возраст, высота, тип леса (содержание типичных пород с характерными типами подстилающей поверхности), общий запас древесины. Полученные данные использовались как обучающие выборки в процессе обработки данных гиперспектрометра, привязанных к соответствующим выделам.

На данных рис. 3*c* для каждого выдела сосняки отображены коричневым цветом (более возрастной состав древостоев имеет более темный цвет), ельники – фиолетовым цветом, березняки – синим цветом, болота – зеленым цветом, вырубki обозначены горизонтальными цветными полосами. Четыре характерные цифры внутри выделов характеризуют номер выдела, возраст древостоя, площадь выдела, бонитет (качество древесины), соответственно. Например, в квартале 75 при значительной площади, занятой сосняками, преобладание ельников заметно в выделе 13, преобладание березняков – в выделах 9 и 18, болота – в выделе 3, а объект под номером 16 – это только что упомянутая вырубка приблизительно на середине рассматриваемой просеки.

К каждому из выделов кварталов 75-79 были привязаны данные гиперспектрометра и подсчитаны средние значения и среднеквадратические отклонения соответствующих энергетических спектральных характеристик. Эти данные составили дополнительную обучающую выборку для классификации объектов на всем изображении рис.3*b*.

Для отработки элементов предлагаемой технологии распознавания объектов и оценки их состояния была выбрана часть территории рис. 3*b* в виде матрицы 550 x 500 элементов разрешения, которая охватывает площадь от н.п. Крупшево до района сильных вырубок. В выбранной форме отображения данных рис. 3*b* на рис. 4*a* приведены результаты распознавания объектов на этом тестовом участке по данным гиперспектральной съемки. Классификация всех данных иллюстрируемой территории основывалась на использовании знаний о кривых спектрального хода различных объектов природно-техногенной сферы. В соответствии с данными рис. 4*a* отделяются открытые водные поверхности (синий цвет) и растительность (белый цвет). Остальные объекты представлены почвогрунтами, дорожной сетью и крышами зданий (отображены на рис. 4*a* коричневым, черным и красным цветами). Как следует из данных рис.4*a* класс «остальных объектов» необходимо дополнительно разделять на подклассы. В частности, требуется разделение отмеченных выше вырубок леса (в виде латинской буквы «v» в верхней центральной части и сплошные вырубki в левой части рис.4*a*) от дорог и крыш зданий в населенном пункте (справа внизу).

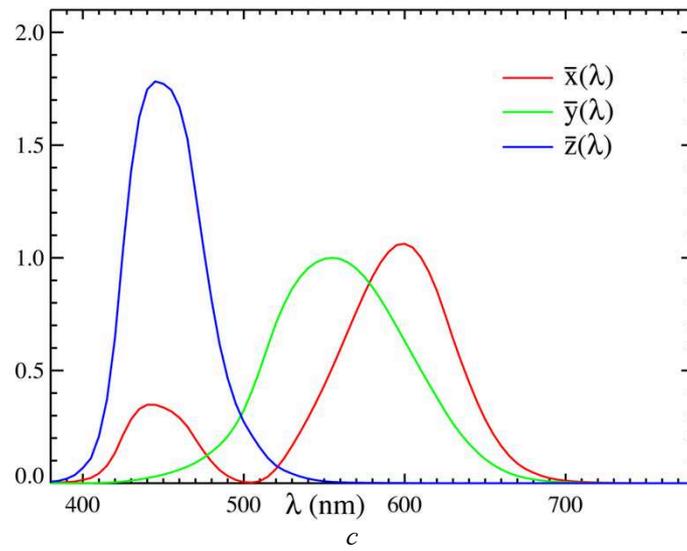
На рис. 4*b* приведены исходные данные гиперспектрометра для выбранного фрагмента территории в виде, близком к естественным цветам (так называемое RGB-представление данных). Это общепринятое представление, утвержденное Международной комиссией по освещению, по трансформации исходных кривых спектрального хода на три базисные функции, которые называются как «color matching functions» (рис. 4*c*). При получении данных рис. 4*b* использовались данные гиперспектрометра для всех длин волн более 380 нм.



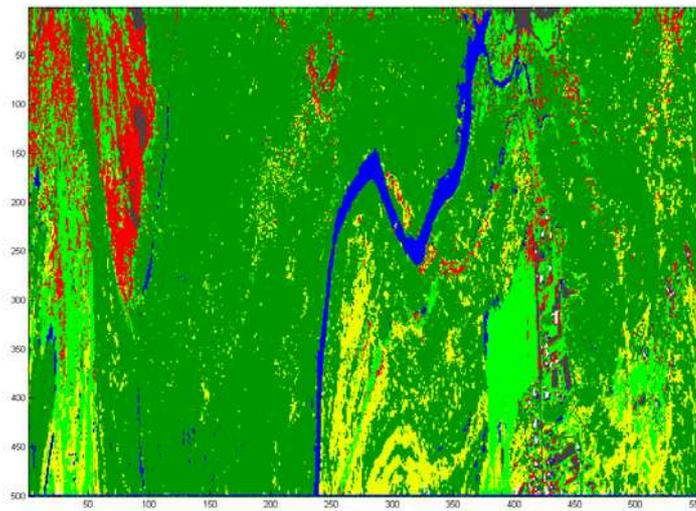
a



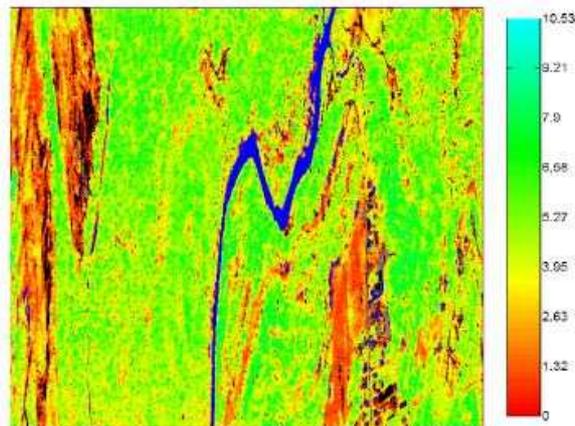
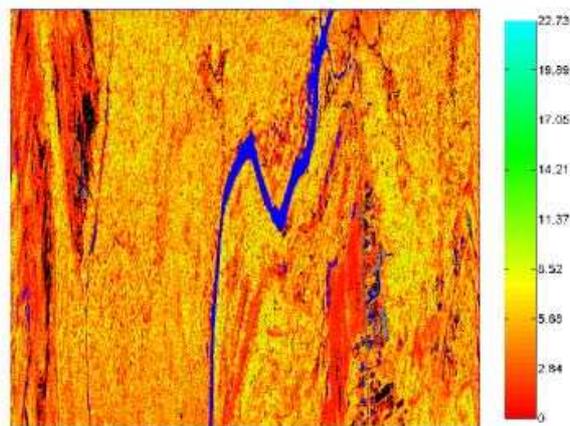
b



c



d



e

Рис. 4. Результаты распознавания образов объектов тестового участка и оценки состояния этих объектов по данным самолетных гиперспектрометрических измерений.

a – исходное выделение классов: вода (синий цвет); растительность (белый цвет); остальные объекты (коричневый, красный и другие цвета).

b – отображение выбранного участка в близком к естественным цветам с использованием «координат цвета».

c – базисные функции используемой проекции данных гиперспектрометра.

d – уточненная классификация выбранной территории; цвета: синий – вода; серый – грунт; белый – строения; светло-зеленый – луга; темно-зеленый – зеленый лес; желтый – желтый лес; красный – вырубки; черный – переходные объекты между почвой и растительностью.

e – восстановление объема фитомассы растительности по исходным данным гиперспектрометра (вверху) и при фильтрации полученных значений в пределах квадрата 3 x 3 элемента

Данные рис.4*b* позволяют видеть особенности рассматриваемой территории. В частности, кроме отмеченных вырубок леса, затененной дороги в левой части рис. 4*b*, излуины реки и характерных особенностей наблюдаемых лесных экосистем, можно отчетливо видеть дорожное покрытие в населенном пункте Крупшево, сплошной травяной покров слева от него и т.д.

Результаты классификации объектов выбранного участка приведены на рис. 4*d*. Классификация проводилась следующим образом. Отбирались спектры, соответствующие тому или иному объекту в соответствии с методом максимального правдоподобия. В итоге была собрана довольно значительная статистика расклассифицированных спектров. Затем для каждого элемента разрешения искался наиболее близкий спектр из полученной базы данных по объектам. Все детали наблюдаемых объектов распознать не удастся. Трудности распознавания связаны с тем, что иногда спектры для разных объектов оказывались близкими до такой степени, что построить статистически значимый критерий, характеризующий различия между объектами, не удастся. Например, не проявляются в результатах классификации заметные на аэрофотоснимке рис. 3*b* детали распределения пожелтевшей и зеленой растительности в основном массиве лесной растительности между излуиной реки и затененной дорогой (слева на рис. 4*d*). Сама эта дорога вследствие наличия на ней затенений от леса воспринимается на рис. 4*d* как водный объект. В то же время хорошо воспроизводится зеленая луговая или сельскохозяйственная растительность (слева от основного населенного пункта; номера строк матрицы 300-500, номер столбца 400), преобладание желтой лесной растительности левее этого объекта (строки – те же, столбцы 250-350) и другие детали.

На рис. 4*e* приведены результаты восстановления объема фитомассы растительности по исходным данным гиперспектральных самолетных измерений (вверху) и после фильтрации результатов восстановления в пределах окна 3x3 элемента разрешения. Соответственно, максимальные значения объема фитомассы при использовании исходных данных для отдельных элементов разрешения могут достигать 22 т/га (шкала справа, верхнее изображение) и лишь 11 т/га после фильтрации (нижнее изображение). Можно отметить некоторые характерные особенности полученных результатов, которые близки к данным рис. 2: наличие объектов серого цвета (почвогрунты), черно цвета (переходные объекты между почвой и растительностью) и др. Однако точность решения задачи восстановления объема фитомассы на рис. 4*e* выше (около 15%), чем на рис. 2 (почти в два раза хуже).

Дальнейшие исследования проводятся в направлении оценки информационного содержания данных рис. 4 с точки зрения обоснования наиболее информативных каналов полученных гиперспектральных измерений в их увязке с данными более низкого спектрального и пространственного разрешения.

Заключение

В рамках создания алгоритмического и программного обеспечения технологии распознавания образов объектов природно-техногенной сферы по их многоспектральным аэрокосмическим изображениям и спектрам показаны примеры реализации отдельных этапов исследований. Демонстрированы примеры приложений разработанных методов, алгоритмов и расчетных программ при получении соответствующей новой информационной продукции обработки данных аэрокосмических измерений для выбранной тестовой территории. Полученные результаты о значительно более широких перспективах использования многоспектральных и гиперспектральных данных дистанционного аэрокосмического зондирования для распознавания образов объектов природно-техногенной сферы и количественной оценки их состояния, чем при традиционных подходах.

Исследования проводятся в рамках проектов РФФИ №08-07-00284, 06-05-64916.

Авторы выражают признательность за предоставление исходных цифровых данных: В.М. Шахпаронову (Центр приема и обработки спутниковых данных, МГУ) – данные аппаратуры MODIS; А.С. Черепанову (ЗАО «Совзонд») – данные аппаратуры ЕТМ+; В.М. Каменцеву (Техно-

парк Тверского государственного университета) – данные самолетной аэрофотосъемки и гиперспектрометрической съемки.

Литература

1. *Козодеров В.В.* Биосфера из космоса: интерпретация радиационных образов природных объектов по их многоспектральным изображениям // Исслед. Земли из космоса, 2004. №1. С.16-29.
2. *Козодеров В.В.* Особенности реализации моделей оценки фитомассы растительности по наблюдениям из космоса // Исследование Земли из космоса, 2006. №2. С.79-88.
3. *Козодеров В.В., Дмитриев Е.В., Думлер Ю.А., Черепанов А.С.* Космические системы наблюдений на службе регионов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Сб. научн. статей. М.: «Азбука-2000», 2007. Вып. 4. Т.2. С.247-255.
4. *Козодеров В.В., Кондранин Т.В., Косолапов В.С., Головкин В.А., Дмитриев Е.В.* Восстановление объема фитомассы и других параметров состояния почвенно-растительного покрова по результатам обработки многоспектральных спутниковых изображений // Исследование Земли из космоса, 2007. №1. С.57-65.
5. *Козодеров В.В., Кондранин Т.В., Дмитриев Е.В., Егоров В.Д., Борзяк В.В.* Инновационная технология обработки многоспектральных космических изображений земной поверхности // Исследование Земли из космоса, 2008. №1. С.56-72.