

Космические системы наблюдений на службе регионов

В.В. Козодеров¹, Е.В. Дмитриев², Ю.А. Думлер³, А.С. Черепанов³

¹ *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

² *Институт вычислительной математики Российской академии наук*

³ *ЗАО «Совзонд»*

Показаны особенности развития новых подходов к обработке многоспектральных космических изображений разного пространственного разрешения. Эти новые подходы характеризуются использованием абсолютно калиброванных исходных данных дистанционного космического зондирования и внедрением технологических приемов восстановления объема фитомассы разных типов растительного покрова для каждого элемента класса «растительность». Обоснованы более широкие возможности предлагаемых методов количественной оценки состояния лесной и другой растительности в сравнении с традиционными методами, основанными на известной концепции «вегетационных индексов».

Введение

Обработка данных дистанционного аэрокосмического зондирования, представленных в форме цифровых многоспектральных изображений, основана на использовании компьютерных систем, оснащенных специализированным программным обеспечением. Существующее программное обеспечение обработки многоспектральных аэрокосмических изображений, которое поставляется зарубежными фирмами, страдает тем недостатком, что в нем заложены некоторые стандартные преобразования изображений, которые позволяют проводить классификацию объектов на обрабатываемых изображениях на основе относительных градаций яркости этих объектов. Типичным является создание географических информационных систем (ГИС) для интегрирования баз данных различного назначения, относящихся к конкретному географическому региону. При этом создаются отдельные информационные слои в заданной предметной области, на которые накладываются текущие данные дистанционного спутникового зондирования.

Существенное значение при осуществлении разработок в области ГИС имеют вычислительные алгоритмы обработки данных (software) наряду с техническими средствами (hardware) реализации указанных работ. Прототипом наиболее известных приложений в области математического обеспечения обработки спутниковых данных могут служить, например, разработки компании Research Systems, Inc., специализирующейся на средствах визуализации (отображения с помощью компьютерных систем) и анализа данных. Эта компания лидирует в продвижении на рынок программного обеспечения соответствующих работ по анализу данных дистанционного зондирования природных объектов. Лидерство обеспечивается на основе создания своей новой продукции под названием “Среда для визуализации изображений” (the Environment for Visualizing Images/ENVI). Современные графические средства быстрой обработки данных с помощью языка IDL создают интерфейс для реализации программных средств ENVI. Получаемая таким образом информационная продукция получает все более широкое применение в науках о Земле, геологии, мониторинге окружающей среды и других приложениях. Аналогичные функции отображения картографических и других материалов наблюдений выполняют и другие стандартные программные средства обработки многоспектральных аэрокосмических изображений (ArcInfo, ArcView и др.), поставляемые зарубежными фирмами.

Наблюдаемые из космоса природные объекты представляют собой географически распределенные классы характерных особенностей земной поверхности. Эти объекты (геологические, почвенно-растительные, водные и др.) отображаются в виде тематических карт на локальном, региональном и глобальном уровнях с использованием географических координат местности (широт и долгот). С помощью декартовых координат можно осуществить представление конкретных результатов дистанционного зондирования в виде определенной проекции карты, что является

типичным средством трансформации точек или отдельных участков местности на сферической Земле в плоскую поверхность карты при соответствующем масштабировании измерительных данных. При этом используются характерные преобразования широтно-долготной сетки в выбранную проекцию карты. Возможно использование специальных преобразований типа построения контуров, затенения (штриховка) и т.п. с тем, чтобы отобразить исходные плоские фотографии или изображения в трехмерном виде. Топографические карты служат примером наиболее часто используемого представления данных дистанционного зондирования в трехмерном виде. Строятся так называемые цифровые модели местности наряду с использованием карт рельефа (например, в форме затенений), слоев разной цветопередачи (цветокодирование), визуализации изображений (в том числе в трехмерном виде).

На тематических картах отображается такая информация о наблюдаемых природных объектах, как выбранные меры графического отображения расстояний, масштабы, ориентации и направления, типы проекций, системы координат и некоторые дескрипторы, которые разъясняются использованием соответствующих легенд к этим картам. На топографических картах типичными единицами информации являются интервалы между контурами высот местности, уклонов местности и т.д. Используются и специальные атрибутивные данные, которые зависят от тех или иных характеристик объектов, а не от их географических координат.

Конкретный участок земной поверхности независимо от его размера содержит характерные особенности, которые и составляют содержание атрибутивных данных. Для полного описания свойств отдельных участков земной поверхности требуется большое количество тематических карт. Данные дистанционного зондирования составляют основную часть соответствующих описаний.

Существующие подходы и новые решения

Технологии ГИС являются типичной формой развития приложений данных дистанционного зондирования для решения прикладных задач. Приложения развиваются в направлении инвентаризации природных ресурсов и оценки экологического состояния соответствующих регионов. Наиболее часто используются стандартные программные средства, демонстрирующие пространственное распределение различных классов наблюдаемых объектов природно-техногенной сферы (лесные, сельскохозяйственные, другие экосистемы вместе с транспортной инфраструктурой, геотехническими сооружениями и т.п.) на обрабатываемых многоспектральных изображениях.

В реальности имеется, однако, необходимость перехода от получаемых таким образом качественных оценок состояния природных объектов по их многоспектральным изображениям к количественным оценкам. Для достижения этих новых целей требуется использование абсолютно калиброванных исходных данных дистанционного зондирования, что позволяет на основе методов вычислительной математики не только проводить классификацию объектов, но и получать новую информационную продукцию восстановления количественных показателей состояния объектов (например, объем биомассы разных типов экосистем) для каждого элемента многоспектрального изображения. Это новый уровень достижения целей по решению региональных задач [1]. Например, в задачах лесопользования и лесоустройства используются геоинформационные технологии в части отображения в среде ГИС отдельных участков местности, называемых выделами, в терминах бонитета (качества древесины) лесных сообществ, возраста древостоев и т.п. Соответствующие тематические карты характеризуют предшествующий уровень технологических разработок, которые были проведены ранее, включая материалы космических съемок. Текущее состояние лесного фонда, его изменения за счет вырубки на выбранных участках, гарей пожаров, нашествия насекомых-вредителей и т.п. могут отображаться на картографических материалах, но эти материалы, как правило, не затрагивают внутригодовые изменения растительности. Тем самым в традиционных подходах фактически не охваченной оказывается проблема оценки экологического состояния наблюдаемых экосистем по данным космического мониторинга.

При реализации технологий ГИС обычно используются эмпирические связи для перехода от исходных данных дистанционного зондирования к решению прикладных задач. Исходят из концепции «вегетационных индексов» (различных комбинаций спектральных каналов дистанционного зондирования) при использовании спутниковых данных низкого, среднего и высокого пространственного разрешения. Популярной эта концепция стала еще в первых разработках по развитию приложений данных многоспектрального космического зондирования [2]. В современных приложениях ориентируются на некоторые статистические характеристики отдельных регионов в процессе увязки этих комбинаций, например, с состоянием посевов сельскохозяйственных культур на выбранной территории. При использовании данных высокого пространственного разрешения усилия направляют также на построение множественной регрессии вегетационных индексов и такими показателями, как величина наземной биомассы растительности, которая может быть измерена на отдельных тестовых участках обследуемой территории. В наземных условиях для травянистой растительности берут пробы ее образцов путем срезания растительной массы на выбранной площади (например, 2 x 2 м) и их взвешивания (получают сырой и сухой вес биомассы). Для лесной растительности биологи-лесники имеют свои эмпирические связи для перехода от величины объема зеленой фитомассы листвы/хвои к общей биомассе древесной растительности путем измерения диаметра выборочных деревьев на уровне груди и некоторых других показателей (раскидистость крон и т.п.).

За пределами внимания в традиционных подходах использования технологий ГИС и данных дистанционного многоспектрального зондирования остаются такие показатели текущего состояния растительных сообществ, как объем зеленой фитомассы листвы/хвои и др. Это один из основных параметров, который может определяться региональными специалистами при точечных наземных обследованиях тестовых участков. Это также важнейший показатель бюджета углерода и его межгодовой изменчивости – того показателя, который входит в модели климата. Восстановление этого параметра для каждого элемента многоспектрального изображения возможно на основе новых разработок, в которых существенно значение имеют методы вычислительной математики при решении соответствующих обратных задач дистанционного аэрокосмического зондирования [3].

Остановимся более подробно на концепции «вегетационных индексов», используемых на практике. Их общее число при использовании данных многоспектрального спутникового зондирования достигает нескольких десятков. Это связано с тем, что специалисты-интерпретаторы стремятся в полной мере использовать известные знания о спектральном ходе отражательной способности различных почвенно-растительных покровов в конкретных регионах, переходя от исходных спектральных яркостей к их комбинациям. При этом одни комбинации способствуют эмпирическому различению типов растительности, водных объектов, заболоченных земель, распаханых почв, а другие – уменьшению влияния атмосферы, идентификации облачных полей и теней от них и т.п.

Наиболее часто используемый – «вегетационный индекс нормализованной разности» (NDVI – Normalized Difference Vegetation Index), как известно, равен отношению разности измерительных каналов в области максимума спектральной отражательной способности (0.7-0.8 мкм) и в полосе поглощения хлорофилла (0.62-0.69 мкм). Другим часто используемым индексом является так называемый «перпендикулярный индекс растительности». Дело в том, что в координатах яркостей двух упомянутых каналов данные, относящиеся к распаханым почвам, располагаются вдоль кривой на плоскости этих канальных данных. Если провести перпендикуляр к этой линии распределения почвенных данных, то набор всех точек таких двухканальных измерений будет располагаться слева и справа от перпендикуляра. Вводя угол между указанной «почвенной линией» и осью более длинноволнового из двух рассматриваемых каналов, можно соответствующий «перпендикулярный индекс растительности» (PVI – Perpendicular Vegetation Index) представить как разность значений этого канала, умноженных на синус указанного угла, и значений другого из рассматриваемых каналов, умноженных на косинус этого же угла. Если «линия почв» проходит по биссектрисе в заданной плоскости, то, как нетрудно убедиться, этот индекс равен разности рассмат-

риваемых канальных данных, деленных на постоянное число. Это означает, что фактически этот индекс ничего нового не дает в сравнении с NDVI, а проблема лишь сводится к тому, как далеко «линия почв» уклоняется от биссектрисы при заданных условиях съемки конкретной территории.

Необходимость указанных преобразований данных многоспектральной съемки возникает вследствие того, что все эти интуитивные поиски различных комбинаций измерительных каналов направлены на изучение чувствительности данных к отражательным свойствам почв и растительности в момент съемки. Предполагается, что с помощью этих комбинаций можно различить проективное покрытие почв растительностью, изменения в объеме биомассы наблюдаемых растительных покровов и т.д.

На практике развиваемые технологии обработки данных ограничиваются конкретным регионом с использованием методов многофакторной регрессии для изучения связей рассматриваемых эмпирических подходов с биометрическими и другими показателями состояния растительного покрова. Если же иметь возможность восстановления величины объема фитомассы растительности для каждого элемента многоспектрального изображения, то на первый план выступает реальная точность решения прикладных задач инвентаризации и оценки состояния почвенно-растительного покрова. В рамках предлагаемого нового подхода и реализуются соответствующие технологические внедрения на основе современных методов вычислительной математики. Создаются новые программные средства, с помощью которых данные аэрокосмического мониторинга представляются в терминах объема зеленой фитомассы растительности наряду с классификацией пород леса (хвойные, лиственные, смешанные), определением типов растительных сообществ (болота, увлажненные и засушливые территории) по данным дистанционного многоспектрального зондирования. Задача инвентаризации природных ресурсов с помощью космических средств тем самым увязываются с задачами оценки текущего экологического состояния наблюдаемых объектов природно-техногенной сферы.

Разрабатываемые инновационные технологии позволяют отображать получаемую информационную продукцию обработки многоспектральных космических изображений в терминах биомассы для выделенных классов почвенно-растительного покрова по всей области охвата территории данными дистанционного зондирования при конкретном пространственном разрешении измерительной аппаратуры. Технологии основаны на использовании исходных данных, представленных в абсолютных энергетических величинах, что открывает возможности подключения в процесс обработки программного обеспечения восстановления указанных параметров, инвариантных относительно угловых условий съемки, освещения объектов Солнцем и состояния атмосферы в момент съемки. Технологии развиваются в применении к космическим изображениям разного пространственного разрешения (аппаратура MODIS/Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer и ASTER/Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer спутника Terra, аппаратура ETM+/Enhanced Thematic Mapper спутника Landsat-7). Основные характеристики этих каналов приведены в табл.1. Три основных канала охватывают область спектра, соответствующую максимуму энергии солнечного излучения, достигающего земной поверхности (канал 2), полосе поглощения хлорофилла – основного пигмента листовой поверхности вегетирующей растительности (канал 3), главному максимуму спектральной отражательной способности вегетирующей растительности (канал 4). Три более длинноволновых канала (каналы 5-7) выбраны таким образом, чтобы учитывать характерные особенности (немонотонный ход) в отражательной способности объектов дистанционного зондирования. Самый коротковолновый канал 1 позволяет оценивать текущее состояние атмосферы в момент съемки (прозрачность атмосферы и связанную с ней яркость атмосферной дымки – той части солнечного излучения, которая обусловлена его многократным рассеянием в атмосфере).

Вместе с результатами восстановления биомассы на выбранной территории в рамках разрабатываемых технологий проводится классификации объектов (водные поверхности, облачность, почвенно-растительный покров) с выделением типов лесных экосистем (лиственные, хвойные, смешанные), типов подстилающей поверхности (леса, болота, сельскохозяйственные поля и др.). В работе [4] показаны примеры решения указанных задач по данным аппаратуры MODIS для территории Тверской области. Продемонстрированы более широкие возможности разработанного

программного обеспечения обработки многоспектральных космических изображений в сравнении с традиционными подходами, которые основаны на стандартной обработке исходных многоспектральных яркостей в терминах вегетационных индексов, изменчивых от одной обрабатываемой сцены к другой. Региональным специалистам предоставляются новые возможности получения информационной продукции космического мониторинга разного пространственного разрешения в том виде, с которым они имеют дело в своей повседневной практике.

Обсуждение результатов

При разработке рассматриваемой новой технологии количественной оценки параметров состояния растительности (объем биомассы и др.) исходят из необходимости решения прямых и обратных задач дистанционного зондирования. Обычно говорят о прямой задаче описания интенсивностей уходящего излучения, регистрируемых спутниковой аппаратурой, при его взаимодействии с природными средами (земная поверхность и атмосфера), и об обратной задаче восстановления параметров состояния наблюдаемых объектов по данным получаемых измерений. Решение прямой задачи – это получение расчетной базы многоспектральных образов различных типов растительных покровов (лесные, травянистые, сельскохозяйственные и др.) при разных высотах Солнца, угловых условиях съемки, атмосферного замутнения, условий затенения отдельных фитоэлементов системы и т.п. Для лесной растительности удобной формой отображения расчетных результатов служат координаты «плотность полога – ажурность крон деревьев».

Обратная задача восстановления фитомассы растительности при заданных условиях съемки сводится к поиску наилучшего соответствия между пересечениями кривых отдельных спектральных каналов и кривых объема фитомассы растительности в указанной системе координат. Сначала производится выделение водных объектов, облачности, а также объектов, не относящихся к классу «растительность» (распаханные почвы, городские территории, дорожно-транспортная сеть и др.). Для каждого элемента изображения, относящегося к классу «растительность», реализуется указанный поиск решений обратной задачи. Возможно появление таких элементов разрешения, которые не вошли в исходную расчетную базу многоспектральных образов. В результате значительно возрастает компьютерное время поиска таких решений. Возникает необходимость реализации обратной задачи на многопроцессорных вычислительных системах с параллельной обработкой каналов.

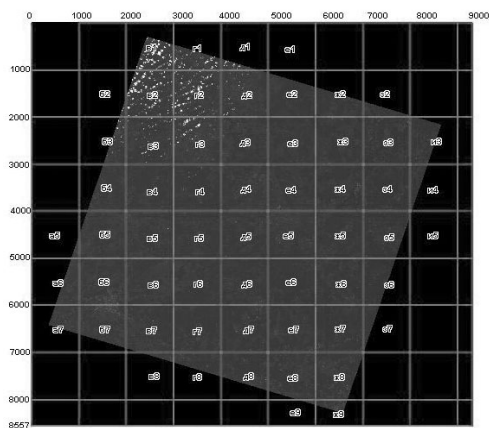


Рис. 1. Разбиение данных одного из каналов исходного изображения аппаратуры ETM+ на квадраты 1000 x 1000 элементов

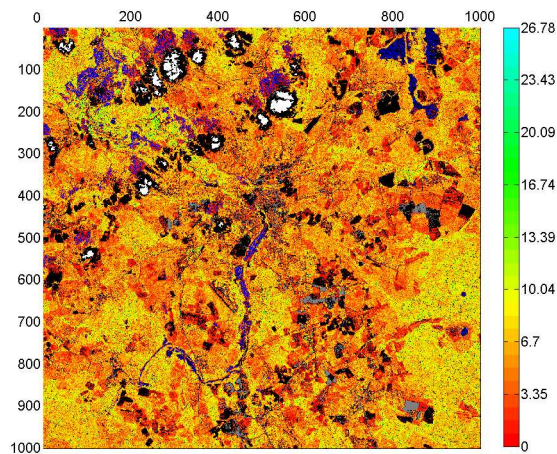


Рис. 2. Результаты классификации исходного 6-канального изображения и оценки состояния растительного покрова выбранной территории. Цветовая шкала, приведенная справа, соответствует значениям объема фитомассы растительности от нуля до близких к 27 т/га значений. Синие тона – открытые водные поверхности (озера, реки). Белый цвет – облака. Серый цвет – дорожно-асфальтовые покрытия, городские территории, распаханные почвы. Черный цвет – объекты, относящиеся к классу «растительность», но не входящие в исходную базу расчетных спектральных образов разных типов почвенно-растительного покрова. Тени от облаков частично отображаются черным цветом, частично – синими тонами

В данной публикации рассмотрим некоторые примеры реализации рассматриваемой технологии по данным аппаратуры ЕТМ+ на дату съемки 30.07.2005 части территории Тверской области. На рис. 1 приведен фрагмент наклонного витка одного из каналов данной аппаратуры для данной территории. Выбран канал, в котором заметны облачные образования на фоне остальной территории. Фрагмент содержит 9000 x 8557 элементов разрешения и разбит вертикальными линиями на отдельные квадраты (а5-а7, б2-б7, ..., и3-и5) размерностью 1000 x 1000 элементов.

Далее иллюстрируются некоторые результаты, относящиеся к квадрату «г3» на рис.1. Исходными являются данные 6 спектральных каналов, указанных в табл. 1. Данные представлены в абсолютных энергетических единицах в соответствии с инструкцией разработчиков аппаратуры ЕТМ+. Тем самым появляются новые возможности подключения результатов модельных расчетов к решению обратной задачи классификации объектов на иллюстрируемом изображении и восстановления объема фитомассы для выделенного класса «растительность».

Сложная нестандартная схема распознавания объектов на данном многоспектральном изображении включает использование всех 6 задействованных каналов дистанционного зондирования. Основу реализации данного подхода составляет использование конкретных пороговых уровней дистанционного многоспектрального зондирования. В частности, открытые водные поверхности выделяются как объекты, для которых разности значений яркостей в 4-м и 3-м каналах, нормированные на сумму этих значений (своего рода «вегетационные индексы»), меньше 0.6 при значениях этой же комбинации в 7-м и 6-м каналах меньше -0.45. Облака выделяются по максимальным значениям используемых абсолютных данных в 3-м канале. Эти значения достигают 4000 Вт/(м² мкм стер) в данном канале. Еще более сложной является логика распознавания объектов, которые можно назвать «почвогрунтами» (дорожно-асфальтовое покрытие, городские территории и др.). Для этих объектов одновременно выполняются условия: значения первой из указанной комбинаций (4-й и 3-й каналы) меньше 0.5, второй из указанной комбинаций (7-й и 6-й каналы) меньше -0.15, но больше -0.25 при том, что абсолютные значения данных 2-го канала находятся в пределах между 800 Вт/(м² мкм стер) и 1500 Вт/(м² мкм стер).

В итоге выделяются водные поверхности, облака и тени от них, дорожно-асфальтовые покрытия, городские территории и другие объекты, не относящиеся к классу «растительность». Для элементов изображения, относящихся к этому классу, проводится восстановление объема фитомассы лесных, травянистых, болотных, сельскохозяйственных и других экосистем. При этом для сокращения расчетного времени внутри класса «растительность» выделяется подкласс, который характеризуется элементами разрешения, относящимися к объектам, не попавшим в исходную базу спектральных образов модельных расчетов. Тем самым число элементов, относящихся к классу «чистой растительности», уменьшается на число элементов, относящихся к указанному подклассу.

На рис. 2 показаны результаты классификации выбранного изображения и восстановления объема фитомассы растительности для упомянутого класса «чистой растительности». Разные значения восстановленной величины фитомассы соответствуют на рис.2 цветовой гамме от красных оттенков (малые значения фитомассы) до голубых оттенков (большие значения фитомассы). Можно отметить преобладание сравнительно небольших значений фитомассы растительности на данном изображении. Видны облака (белый цвет) и тени от них (отображаются синими и черными оттенками). Объекты, отображенные серым цветом (городские территории, асфальтовое покрытие и т.п.), можно объединить с объектами, отображенными черным цветом (эти элементы разрешения характеризуются специфическим спектральным ходом отражательной способности в исходной базе расчетных спектральных образов). Такое объединение можно отнести к расширенному классу почвогрунтов.

На рис.3 дано распределение элементов разрешения спектральных каналов 3 (ось R3) и 4 (ось R4) для класса «растительность» иллюстрируемого изображения. Проведенные исследования по-

казали, что эти два канала практически не коррелируют между собой в отличие от других пар используемых каналов дистанционного космического зондирования.

На рис. 3 заметно существование упомянутой выше «линии почв», которая характеризуется основанием наблюдаемого гипотетического «треугольника». Разброс элементов вдоль этого основания дает представление об уровне просвечивания почв в пределах более темного полога лесной растительности (малые значения R3) в сравнении с более светлым пологом травянистой, болотно-луговой и другой аналогичной растительности (большие значения R3). Вершина «треугольника», к которой сходятся точки от «линии почв», представляет собой «сплошной растительный покров» (большое проективное покрытие почв). Эта область характеризуется наибольшими значениями величины объема зеленой фитомассы листвы или хвои (до 30 т/га, в пересчете на общую биомассу древесины может достигать сотен т/га). Левая часть кластеризуемых точек характеризуется большими значениями биомассы (хвойные и лиственные леса большого возраста – десятки и сотни лет), правая часть – меньшими значениями биомассы (подлесок и т.п.).

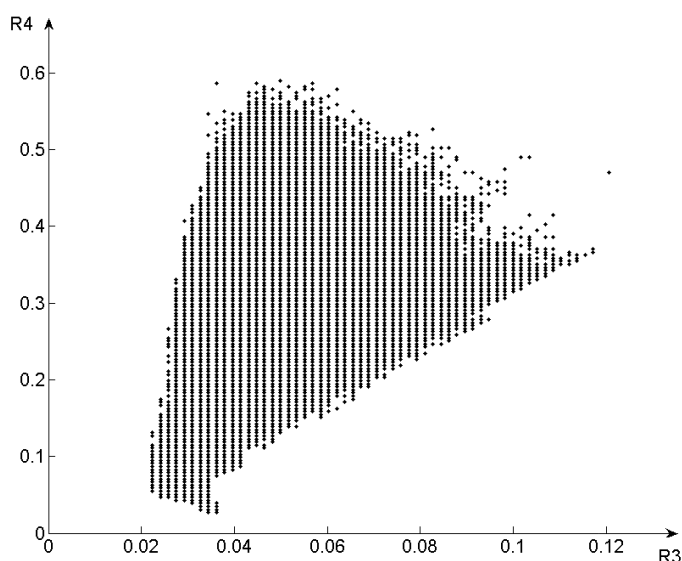


Рис. 3. Распределение элементов класса «растительность» для выбранной территории в координатах 3-го и 4-го каналов аппаратуры ETM+

Знание величины объема фитомассы соответствующих элементов разрешения позволяет построить трехмерную зависимость этой величины в координатах R3 и R4. До тех пор, пока в традиционных подходах имеют дело с обработкой только исходных данных многоспектрального дистанционного зондирования, пользователи ориентируются на многочисленные комбинации вегетационных индексов. Наши разработки позволяют восстанавливать значения объема фитомассы растительности для каждого элемента соответствующего класса объектов. Появляются возможности построения многофакторной регрессии между канальными значениями (R3, R4) и величиной объема фитомассы растительности.

На рис.4а приведена зависимость восстановленных значений объема фитомассы растительности для выбранного фрагмента от индекса NDVI. В целом, действительно можно заметить, что прослеживается некоторое возрастание значений этого индекса с ростом фитомассы. Видно, что значения этого индекса для выделенного класса растительности изменяются от 0.4 до 0.8. Однако очевидно, что применение NDVI для восстановления значений объема фитомассы (а также и общей биомассы) растительности невозможно: из данных рис.4а следует, что значения NDVI, близкие к единице, соответствуют как очень большим, так и очень малым (и даже отрицательным) значениям объема фитомассы.

Также представляется затруднительным и описание состояния растительности, которое нередко проводится с помощью данных по NDVI. Действительно, на рис. 4б выделены значения

элементов разрешения, соответствующие достаточно большим значениям вегетационного индекса ($NDVI > 0.6$). При этом также можно видеть, что значениям этого индекса, близким к макси-

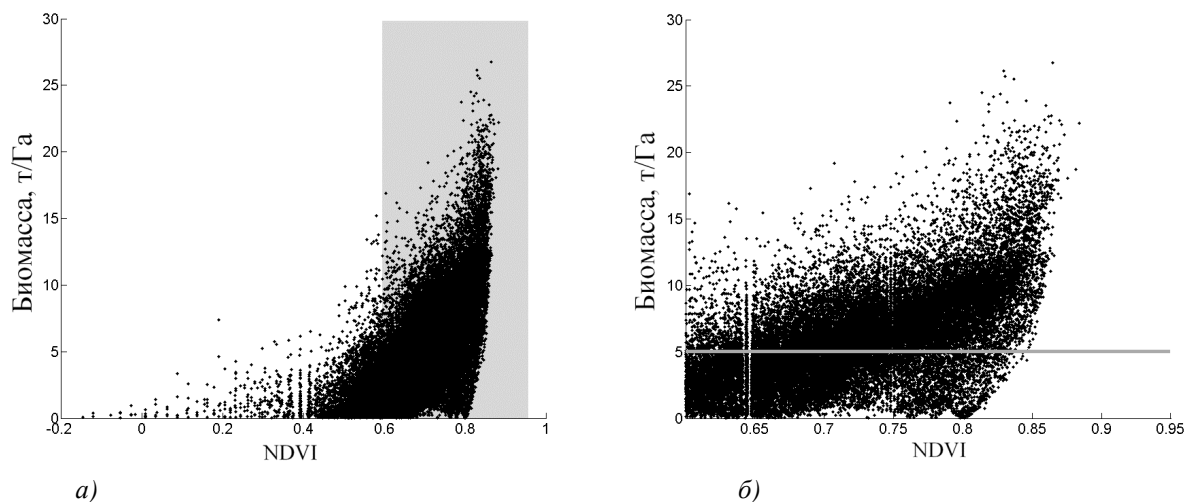


Рис. 4. Распределение восстановленных значений объема фитомассы растительности относительно значений индекса NDVI для соответствующих элементов разрешения. а) - распределение для всех элементов класса «растительность», б) - распределение элементов разрешения, соответствующих значениям NDVI, большим 0.6. Серым цветом выделена часть рисунка а), представленная на рисунке б)

мальным, соответствуют самые разные значения объема фитомассы от нуля до почти 30 т/га. Более того, около 30% точек соответствует значениям биомассы менее 5 т/га, а около 15% точек соответствуют биомассам более 15 т/га. Такая картина говорит о том, что индекс NDVI фактически не чувствителен к огромным различиям в содержании биомассы соответствующих растительных сообществ вопреки исходному интуитивному предположению, что комбинация NDVI несет полезную информацию о величине объема зеленой массы растительности. Несомненно, требуется валидация (наземное подтверждение) результатов восстановления биомассы растительности на основе предлагаемых программно-алгоритмических средств решения обратной задачи восстановления. Однако данный результат демонстрирует необходимость реализации предлагаемого нового подхода к такой обработке многоспектральных космических изображений, в которой поэлементное восстановление объема фитомассы растительности является обязательной процедурой.

Заключение

Были показаны новые возможности использования данных дистанционного космического зондирования для количественной оценки состояния почвенно-растительного. Основу разрабатываемой технологии оценки состояния составляет уникальное алгоритмическое и программное обеспечение решения задачи обработки многоспектральных аэрокосмических изображений. Требуется валидация (наземное подтверждение) полученных результатов. Проведение таких специализированных работ позволит уточнить основные позиции в части возможности замещения существующих аналогов программного обеспечения, предоставляемых зарубежными фирмами для обработки многоспектральных космических изображений.

Работы проводятся в рамках проектов РФФИ №05-05-64199, №05-07-90176, 06-05-64916.

Литература

1. *Козодеров В.В., Кузьмин Р.Н., Топчиев А.Г.* Аэрокосмический мониторинг природно-техногенной сферы // Инновации в экологии. М., изд. Группы «Эксперт» (Аналитический центр и инновационное бюро), 2006. С. 96-98.
2. *Кондратьев К.Я., Козодеров В.В., Федченко П.П.* Аэрокосмические исследования почв и растительности // Л., Гидрометеиздат, 1986. 232 с.
3. *Козодеров В.В.* Особенности реализации моделей оценки фитомассы растительности по наблюдениям из космоса // Исслед. Земли из космоса, 2006, №2. С. 79-88.
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 // Исслед. Земли из космоса, 2007. №1. С. 50-61.