

## КАРТИРОВАНИЕ РАСТИТЕЛЬНОСТИ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА ПО МАТЕРИАЛАМ КОСМИЧЕСКОЙ ЦИФРОВОЙ МНОГОСПЕКТРАЛЬНОЙ СЪЕМКИ

© 2004 г. А. В. Григорьев\*, С. Г. Крицук\*\*, А. Н. Мезенко\*\*\*, А. А. Тронин\*\*, канд. геол.-мин. наук;  
Б. В. Шилин\*\*, доктор геол.-мин. наук

\* Военно-инженерный космический университет им. А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург

\*\* Научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, Санкт-Петербург

\*\*\* Управление садово-паркового хозяйства, Санкт-Петербург

Изложены методика составления карты-схемы зеленого фонда административных районов Санкт-Петербурга по материалам космической цифровой многоспектральной съемки и результаты применения методики.

Коды OCIS: 120.0280, 120.1880.

Поступила в редакцию 15.05.2003.

### Введение

Картирование растительного покрова всегда относилось к основным задачам дистанционного зондирования. Давно известным и апробированным методом дифференциации растительного покрова является спектрально-аэрофотосъемка. Так как спектральное разрешение этого метода очень грубое (около 100 нм), то он используется для картографирования объектов с сильными различиями в спектральных характеристиках (например, хвойные и лиственные деревья). Существующие более тонкие различия в спектральных характеристиках растительности нельзя было использовать для практических целей. Это стало возможным с середины 60-х годов с появлением оптико-механических авиационных, а затем и космических сканеров, позволяющих получать изображения в узких спектральных диапазонах (до 10 нм). Реально подобные системы стали применяться с начала 80-х гг.

О возможности использования многоспектральной цифровой космической съемки для целей картографирования распределения зеленой биомассы на земной поверхности известно с начала 80-х гг. Обычно по отношению сигналов спектральных каналов ближнего инфракрасного и видимого диапазонов рассчитывается так называемый вегетационный индекс, являющийся прямой функцией содержания биомассы [1]. Хорошо зарекомендовала себя методика оценки урожая на больших площадях по данным многоканального сканера AVHRR спутников серии NOAA [1, 2]. Эта оценка является весьма мелкомасштабной из-за низкого геометрического разрешения сканера (около 1 км).

С улучшением геометрического разрешения новых типов многоспектральных сканеров, в первую очередь ТМ спутника Landsat (30 м) и МСУ-Э спутника Ресурс-О (40 м) [3, 4], оценка вегетационного индекса и точность картографирования существенно

увеличились и соответствовали масштабам карт, близким к 1:100 000. Это позволило решать ряд задач сельского и лесного хозяйства в рамках областей и крупных районов. Однако разрешения сканеров ТМ и МСУ-Э оказалось недостаточно для картографирования распределения зеленого фонда в пределах крупных мегаполисов типа Москвы и Санкт-Петербурга, где необходимо получить быструю общую оценку распределения зеленого фонда в масштабе карты 1:50 000 (с детальностью около 15–20 м).

### Спутниковые данные

Были проанализированы возможности спутниковых систем и сканеров с высоким пространственным разрешением. Анализ показал, что из систем высокого разрешения, обеспечивающих картирование в масштабе 1:50 000–1:200 000, следует использовать как Landsat (из-за большой глубины архивов), так и ASTER (из-за лучших технических характеристик и низкой стоимости) [5]. Данные JERS-1 и ADEOS [4] имеют небольшую глубину архивов. Данные SPOT и IRS [4] хотя и имеют обширные архивы, но отличаются высокими ценами.

В последнее время появились открытые системы сверхвысокого разрешения IKONOS и QuickBird: до 2,5 м в спектральных каналах и 60 см в панхроматическом канале [4]. Эти системы открыты для пользователей и являются коммерческими. Стоимость данных значительна – например, для съемки Санкт-Петербурга потребуется не менее \$ 5000.

В этой работе были использованы данные, полученные с помощью сканера ASTER (из-за его высоких технических характеристик, наличия свежих снимков и низкой стоимости данных).

ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) – многозональный сканер высокого пространственного разрешения на спутнике Terra (EOS AM-1), запущенном NASA в

Таблица 1. Технические характеристики сканера ASTER

Характеристика	VNIR	SWIR	TIR
Спектральный диапазон	Канал 1: 0,52–0,60 мкм смотрит в надир	Канал 4: 1,600–1,700 мкм	Канал 10: 8,125–8,475 мкм
	Канал 2: 0,63–0,69 мкм смотрит в надир	Канал 5: 2,145–2,185 мкм	Канал 11: 8,475–8,825 мкм
	Канал 3: 0,76–0,86 мкм смотрит в надир	Канал 6: 2,185–2,225 мкм	Канал 12: 8,925–9,275 мкм
	Канал 3: 0,76–0,86 мкм смотрит назад под углом 27,6° от надира	Канал 7: 2,235–2,285 мкм Канал 8: 2,295–2,365 мкм Канал 9: 2,360–2,430 мкм	Канал 13: 10,25–10,95 мкм Канал 14: 10,95–11,65 мкм
Пространственное разрешение на местности, м	15	30	90
Поток данных, Мбит/с	62	23	4,2
Максимальное отклонение прибора от надира поперек трассы спутника, град/км на земной поверхности	±24/±318	±8,55/±116	±8,55/±116
Ширина полосы обзора, км	60	60	60
Тип детектора	Si	PtSi-Si	HgCdTe
Квантование, бит	8	8	12

декабре 1999 г. [5]. ASTER дополняет другие приборы спутника (MODIS, MISR) данными с высоким пространственным разрешением. Орбита спутника Terra очень близка к орбите спутников Landsat, а спектральные характеристики некоторых каналов ASTER – к характеристикам сенсора TM. Благодаря этим особенностям цифровые снимки ASTER могут дополнять снимки Landsat TM в сборке мозаик и временных сериях. Существенные отличия – возможность отклонения сенсора в поперечном направлении, стереосъемка в канале 3, большое количество узких каналов в каждом диапазоне съемки.

ASTER конструктивно состоит из трех подсистем: VNIR – для видимого и ближнего ИК диапазонов, SWIR – для коротковолнового ИК и TIR – для теплового ИК. Каждый сканер снимает в своем диапазоне длин волн, имеет отдельный телескоп, набор детекторов и вспомогательных устройств, а также свой опорный источник излучения для радиометрической калибровки. Технические характеристики сканера ASTER приведены в табл. 1.

Исходные данные представлены двумя многоспектральными цифровыми сценами Санкт-Петербурга и окрестностей, полученными последовательно на одном проходе спутника 8 мая 2002 г. Уровень обработки полученных сцен – “1B”.

#### Спектральные свойства объектов земной поверхности

Растительность, почва, вода и различные конструкционные материалы имеют весьма характерные спектры отражательной способности. На рис. 1 по-

казаны обобщенные кривые для этих объектов [6, 7]. Из рисунка видно, что зеленая растительность имеет наиболее специфическую кривую отражательной способности. С точки зрения механизмов, отвечающих за поглощение, пропускание и отражение радиации листвой, весь интересующий нас диапазон можно разделить на три участка:

1) В видимой части спектра (400–700 нм) основным фактором поглощения солнечной радиации (70–90%) являются растительные пигменты: хлорофилл, каротеноиды, ксантофилл. Небольшой максимум отражения в районе 500 нм является причиной того, что мы видим здоровые растения в зеленом цвете.

2) В ближней ИК области (700–1300 нм) пигменты и целлюлоза практически прозрачны (поглощение не более 10%). Отражение от менее 10% в крас-

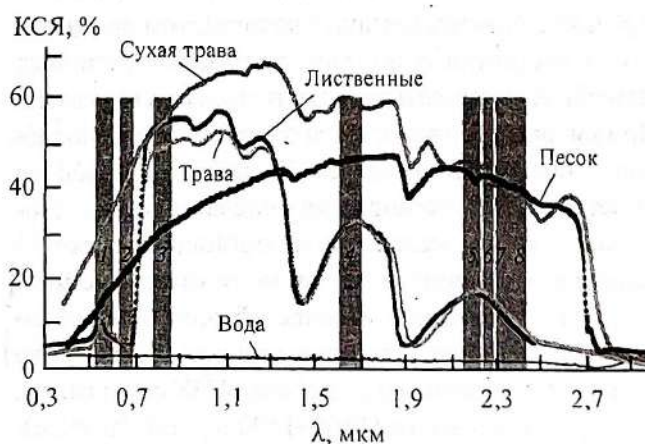


Рис. 1. Коэффициенты спектральной яркости растительности, песка и воды [5]. Колонки показывают спектральные каналы сканера ASTER.

ной области спектра резко возрастает здесь до 50% (для зеленой лиственной растительности этот участок не имеет значения для фотосинтеза). Основным фактором, определяющим отражение в этой области, является клеточная структура листа. Резкий рост отражения в районе 750 нм позволяет отделять растения от других видов поверхности, а также судить о видовом составе и состоянии растительности.

3) В средней ИК области (1300–3000 нм) отражение растительности определяется в основном содержанием в листьях воды (которая является причиной сильного поглощения в районе 1450 и 1950 нм).

Виды растительности наиболее сильно отличаются по отражению в красной и ближней ИК областях пропорционально содержанию хлорофилла и иных фотосинтезирующих пигментов, а также в связи с различиями в строении. Так, у хвойных растений отражение в ближней ИК области несколько ниже, чем у лиственных, у кустарников наблюдаются повышенные значения в красном диапазоне и пониженные – в ближнем ИК по сравнению с деревьями, травами и кустами, еще более снижены значения в ИК диапазоне у лишайников.

При старении растения в первую очередь уменьшается его отражательная способность в ближней ИК области, далее (при визуальном пожелтении листьев) максимум отражения уменьшается в зеленой зоне и растет в красной. Подобные эффекты могут возникать и при стрессе, вызванном атмосферным загрязнением, а также геохимическими аномалиями в почве, что используется в геоботанике и экологии. В связи с тем что растительностью покрыто более 70% суши, такие индикационные методы широко используются: идентифицируется нетипичный видовой состав, разреженный растительный покров, изменение пигментации, хлороз листьев, изменения фенологического цикла.

Спектральная отражательная способность для другого важного объекта, почв, монотонно возрастает с увеличением длины волны. Отражение в видимой части спектра связано с количеством органического вещества в почвах, которое определяет способность почвы накапливать и удерживать влагу. При уменьшении влажности отражательная способность почв увеличивается. В районе 850–930 нм имеется полоса поглощения окислами железа. Поскольку окислы железа также поглощают коротковолновое излучение (в особенности ультрафиолетовое), их присутствие в почве обычно придает ей красноватый цвет. Для почв характерны такие же полосы поглощения воды в средней ИК области, как и для растительности (1300–1500 и 1750–1950 нм). Наиболее высокие значения отражательной способности для почв обычно находятся между этими двумя минимумами, а после 2000 нм отражение почв

быстро уменьшается (здесь же, в диапазоне 2000–2500 нм, находятся полосы поглощения глинистых минералов).

Для водных объектов ход кривой спектрального отражения противоположен ее ходу для почв: значения уменьшаются с увеличением длины волны. Уже в ближней ИК области для глубоких и чистых водоемов спектральная отражательная способность близка к нулю. Присутствие органических и неорганических взвесей в воде повышает отражательную способность, в мелких водоемах значительный вклад также вносит отражение от дна.

Существенную роль в формировании дистанционно измеренных коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) поверхности играет также архитектура поверхности. Игра света и тени, вариации индикатрис рассеяния различных поверхностей могут внести существенный вклад в спектральные характеристики природных и антропогенных ландшафтов, объектов городской инфраструктуры, растительных сообществ.

Все рассмотренные выше закономерности наглядно демонстрируют высокие индикационные возможности цифровых многоспектральных съемок в видимом и ближнем ИК диапазонах для выделения растительного покрова на фоне других компонентов ландшафтов.

### Обработка изображений

Обработка спутниковых изображений состоит из двух крупных этапов: предварительной и тематической обработки. Предварительная обработка предназначена для извлечения необходимых данных, их радиометрической и геометрической коррекции. Тематическая обработка в нашем случае заключалась в построении карт растительности Санкт-Петербурга. Информация сканера ASTER уровня "1B" распространяется в формате HDF, где в одном файле содержатся как изображения, полученные в 14 спектральных каналах, так и дополнительная информация, которая может использоваться для геометрической и радиометрической коррекции снимков.

Геометрическая коррекция изображений состояла из нескольких этапов: геометрическая "калибровка" изображений, электронная "склейка" фрагментов и геометрическая трансформация снимка.

Изначально два файла в формате HDF содержали сцены размером 60 × 60 км с перекрытием около 10%, покрывающие территорию Санкт-Петербурга и окрестностей с севера и юга. В результате их коррекции и склейки был получен комбинированный снимок (рис. 2), из которого был вырезан фрагмент Санкт-Петербурга, а затем произведена трансфор-

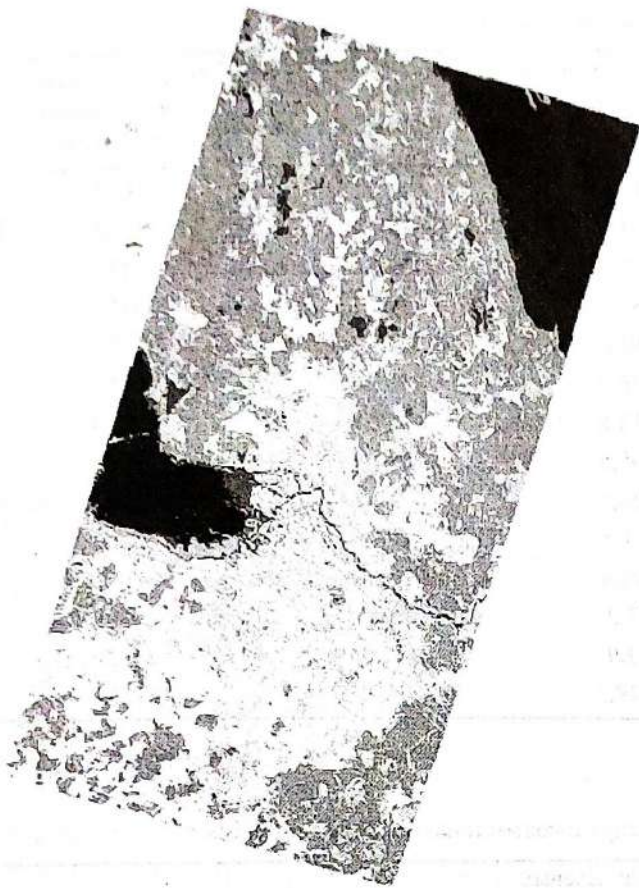


Рис. 2. Электронная «склейка» снимков ASTER на Санкт-Петербург 8 мая 2002 г.

мация в общепринятую в России проекцию Гаусса–Крюгера (на эллипсоиде Красовского).

Радиометрическая коррекция заключалась в удалении шума и дефектных линий сканирования, а также расчете коэффициентов спектральной яркости поверхности. Отметим важность восстановления КСЯ как физической характеристики, не зависящей от спутника, условий освещенности и т. д.

В результате предварительной обработки из исходных изображений формата HDF было получено многоканальное изображение коэффициентов спектральной яркости по площади Санкт-Петербурга. Именно такого рода информация необходима для следующего шага – тематической обработки.

Для пространственного анализа распределения растительности по районам Санкт-Петербурга была создана картографическая основа с административным делением Санкт-Петербурга на районы.

Тематическая обработка заключалась в классификации изображения с целью выделения городской растительности. Классификация – это процесс разбиения генеральной совокупности объектов на подмножества в пространстве признаков. В нашем случае признакам отвечают коэффициенты спектральной яркости, а объектам – пиксели изображения. Результатом классификации может быть тематическая карта, легенда которой будет содержать все подмножества классификации, например ландшафты.

Существуют два основных метода классификации: автономная классификация и классификация с обучением (классификация по эталонам). Автономная классификация представляет собой автоматический метод построения подмножеств данных и требует лишь задания алгоритма (правила) построения разбиения генеральной совокупности.

Метод классификации с обучением основан на использовании готовых эталонов, характеристики которых обычно соответствуют характеристикам реальных объектов. Эталоны могут определяться различными способами, в том числе и заданием эталонных площадей в пределах изучаемых территорий. Процесс классификации с обучением можно разделить на два основных этапа: создание набора эталонов (обучение) и непосредственно классификация.

### Результаты обработки

Классификация проводилась по КСЯ в видимых и ближних ИК диапазонах и по излучательной способности в тепловых каналах. Анализ этой информации проводился на основе классификации с обучением (по эталонам).

На основании анализа спектральных свойств поверхности (рис. 1) и визуального дешифрирования изображения территории города и окрестностей было выделено 5 типов объектов, характерных для рассматриваемой территории: вода, городская застройка, открытый грунт, травянистая растительность, древесно-кустарничковая растительность.

На основе спектральных характеристик этих объектов был создан набор эталонов и проведена автоматическая классификация по правилу минимального многомерного расстояния. В соответствии с этим правилом пиксел приписывается к тому классу, к среднему значению эталона которого его значение находится ближе всего.

Таким образом, было получено тематическое изображение всего города, несущее информацию о пространственном распределении характерных объектов поверхности. Для работы основной интерес представляют трава и деревья, поэтому данное изображение предполагалось подвергнуть анализу с целью определения площадей типов растительности по районам Санкт-Петербурга.

Для дальнейшего анализа информации классы «вода», «городская застройка», «открытый грунт» были объединены в один класс, который можно назвать как «нерастительность». Классы «травянистая растительность», «древесно-кустарничковая растительность» сохранены. Из тематического изображения, представляющего собой классифицированное изображение территории города, были извлечены





Таблица 2. Площадь зеленого фонда по спутниковым и наземным данным

Район	Площадь зеленого фонда по спутниковым данным			Общая площадь зеленого фонда по наземным данным
	Травянистая растительность	Древесно-кустарничковая	Суммарная площадь	
Адмиралтейский	84,4	130,6	215,0	212,5
Василеостровский	168,0	259,0	427,0	411,8
Выборгский	340,8	1047,2	1388,0	2525,7
Калининский	603,9	1158,1	1762,1	1945,2
Кировский	419,6	830,2	1249,9	1175,7
Красногвардейский	668,7	1736,9	2405,6	1574,3
Красносельский	1871,4	2213,8	4085,2	2364,8
Московский	1127,9	1495,5	2623,4	1754
Невский	610,2	1129,0	1739,2	1498,4
Петроградский	85,0	399,0	484,0	654,7
Приморский	1282,8	3788,6	5071,4	2753,1
Фрунзенский	534,4	827,2	1361,6	1384,1
Центральный	151,1	213,9	365,0	298,9
Сумма	7948,2	15229,3	23177,5	18553,2

Таблица 3. Анализ расхождений площади зеленого фонда по спутниковым и наземным данным

Район	Площадь зеленых насаждений по данным дистанционного зондирования, га	Площадь зеленых насаждений по наземным данным (на 1.01.1999), га	Разность, га (%)	Возможное объяснение расхождений
Адмиралтейский	215,0	212,5	2,5 (1,2)	Совпадение
Василеостровский	427,0	411,8	15,2 (3,6)	Совпадение
Выборгский	1388,0	2525,7	-1137,7 (-82)	Учтены Парголово и Левашово?
Калининский	1762,1	1945,2	-183,1 (-10,4)	Неясно
Кировский	1249,9	1175,7	74,2 (5,9)	Растительность в порту
Красногвардейский	2405,6	1574,3	831,3 (34,6)	С/х поля в Ручьях
Красносельский	4085,2	2364,8	1720,4 (42,1)	С/х поля в Старопаново и аэродром в Горелово, садовые участки
Московский	2623,4	1754	869,4 (33,1)	С/х поля, садовые участки и аэродром в Пулково
Невский	1739,2	1498,4	240,8 (13,8)	Неясно, учтены ли площади всех кладбищ?
Петроградский	484,0	654,7	-170,7 (-35,3)	Неясно
Приморский	5071,4	2753,1	2318,3 (45,7)	С/х поля в Каменке, Ольгино
Фрунзенский	1361,6	1384,1	-22,5	Совпадение
Центральный	365,0	298,9	66,1 (-1,7)	Неясно, Александров-Невская лавра?
Сумма	23177,5	18553,2	4624,3 (20)	

Зеленый фонд	Площадь, га	Площадь на одного жителя, м <sup>2</sup>
Суммарный	484	35
Общего пользования	182,2	13,2

	Городская застройка
	Древесная и кустарничковая растительность
	Травянистая растительность
	Водная поверхность

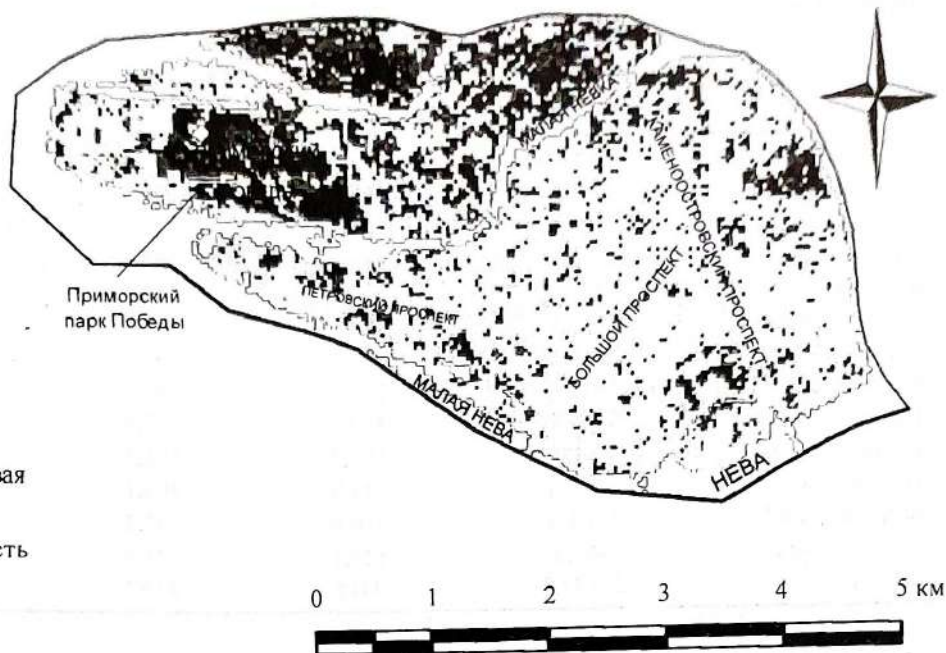


Рис. 3. Тематическое изображение Петроградского района с выделенной растительностью.

фрагменты районов Санкт-Петербурга и определены площади классов травянистой и древесно-кустарничковой растительности. В качестве примера на рис. 3 приведено одно из изображений.

Результаты измерения площадей зеленого фонда города по районам были сведены в таблицу, к которой добавлен столбец с информацией о суммарной площади зеленого фонда по наземным данным Управления садово-паркового хозяйства города (табл. 2). Анализ расхождений спутниковых и наземных данных приведен в табл. 3.

Анализ таблиц показывает, что полученные значения близки к значениям наземных измерений для внутренних районов города (это районы, граничащие только с другими районами города), а для районов, соприкасающихся с пригородами, наблюдаются большие расхождения. Положительные расхождения возникают из-за того, что по спутниковым данным учитываются сельскохозяйственные и другие угодья, не относящиеся к ведению Управления садово-паркового хозяйства. Значительные отрицательные расхождения в случае Выборгского района вызваны тем, что в наземных данных, по-видимому, учтены Парголово и Левашово. Неясно расхождение по площадям в Калининском и Петроградском районах.

Проведено сопоставление спутниковых данных с площадью зеленого фонда общего пользования (табл. 4), расчет площади зеленых насаждений на одного жителя района. Результаты расчетов приведены в табл. 5.

Анализируя данные по удельной площади зеленого фонда на одного жителя, можно увидеть, что

минимум приходится на жителей центральных районов. Для некоторых районов велики различия между суммарной площадью зеленых насаждений (по данным космической съемки) и площадью зеленых насаждений общего пользования. Так, в Приморском районе на каждого жителя приходится 137,4 га всех видов растительности, тогда как насаждений общего пользования – всего 5,8 га. В Красносельском районе ситуация значительно лучше: 134,5 и 20,2 га соответственно.

Дополнительно было рассчитано соотношение площади, занимаемой зеленым фондом, к общей площади районов города. Данные приведены в табл. 6. Анализ данных показывает, что наименьшие соот-

Таблица 4. Сравнение спутниковых и наземных данных

Район	Суммарная площадь зеленого фонда по спутниковым данным, га	Площадь зеленого фонда общего пользования, га
Адмиралтейский	215,0	80,8
Василеостровский	427,0	118,6
Выборгский	1388,0	354,3
Калининский	1762,1	573,1
Кировский	1249,9	414,9
Красногвардейский	2405,6	360
Красносельский	4085,2	614,1
Московский	2623,4	539,6
Невский	1739,2	423,8
Петроградский	484,0	182,2
Приморский	5071,4	213,9
Фрунзенский	1361,6	416,6
Центральный	365,0	123,1
Сумма	23177,5	4415

Таблица 5. Площадь зеленого фонда на одного жителя

Район	Суммарная площадь зеленого фонда, га	Площадь зеленого фонда общего пользования, га	Число жителей на 1.02.2000, тыс.	Общая площадь на жителя, кв. м	Площадь общего пользования на жителя, кв. м
Адмиралтейский	215,0	80,8	191,2	11,2	4,2
Василеостровский	427,0	118,6	197,4	21,6	6,0
Выборгский	1388,0	354,3	419,6	33,1	8,4
Калининский	1762,1	573,1	462,7	38,1	12,4
Кировский	1249,9	414,9	344,9	36,2	12,0
Красногвардейский	2405,6	360	315,4	76,3	11,4
Красносельский	4085,2	614,1	303,8	134,5	20,2
Московский	2623,4	539,6	295,1	88,9	18,3
Невский	1739,2	423,8	453,9	38,3	9,3
Петроградский	484,0	182,2	138,2	35,0	13,2
Приморский	5071,4	213,9	369,1	137,4	5,8
Фрунзенский	1361,6	416,6	392,3	34,7	10,6
Центральный	365,0	123,1	273,4	13,3	4,5
Сумма	23177,5	4415	4157	55,8	10,6

Таблица 6. Соотношение площади зеленого фонда к общей площади районов города

Район	Суммарная площадь зеленого фонда по спутниковым данным, га	Площадь административных районов города по карте, га	Площадь зеленого фонда по отношению к площади района
Адмиралтейский	215,0	1392,8	0,15
Василеостровский	427,0	1911,9	0,22
Выборгский	1388,0	3911,0	0,35
Калининский	1762,1	3800,3	0,46
Кировский	1249,9	4389,2	0,28
Красногвардейский	2405,6	6377,4	0,38
Красносельский	4085,2	9674,5	0,42
Московский	2623,4	7369,8	0,36
Невский	1739,2	6506,8	0,27
Петроградский	484,0	2077,2	0,23
Приморский	5071,4	9647,7	0,53
Фрунзенский	1361,6	3577,2	0,38
Центральный	365,0	1773,4	0,21
Сумма	23177,5	62409,2	0,37

ношения также приходится на центральные районы, причем в наихудшем состоянии находится Адмиралтейский район.

### Заключение

Цифровые многоспектральные данные сканера ASTER были успешно использованы для выделения растительности в условиях городской агломерации Санкт-Петербурга. В результате исследований показана возможность составления по спутниковым данным цифровых картосхем зеленого фонда Санкт-Петербурга в масштабе 1:50 000.

При составлении карты вся городская растительность разделена на два класса: травянистая и древесно-кустарничковая растительность. В дальнейшем целесообразно провести исследования по разделе-

нию различных видов растительности: хвойные, лиственные, кустарники, травы.

ASTER установлен на спутнике Terra и предназначен для наблюдения в первую очередь за суши. Однако наличие тепловых каналов высокого разрешения делает его столь же полезным для изучения акваторий, как и Landsat. Высокая температурная чувствительность, широкий динамический диапазон, а также доступность данных позволяют использовать данные ASTER для исследований водоемов.

В настоящее время существуют технические возможности составления картосхем зеленого фонда города по спутниковым данным в масштабе 1:10000.

На наш взгляд, было бы актуально также провести сравнение карт растительности Санкт-Петербурга в различные годы, например, сравнить 1996 г. с

2002 г., а затем организовать ежегодный мониторинг растительности города.

Представляется целесообразным апробировать разработанную методику и на других крупных городах.

Работа выполнена при частичной поддержке ФЦП "Интегрция", проект Б 0034.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *McGinnis D.F. Jr. and Tarpley J.D.* Vegetation cover mapping from NOAA/AVHRR // *Advanced space research*. 1985. V. 5. № 6. P. 359–369.
2. *Idso S.B., Jackson R.D., Reginato R.J.* Remote sensing of crop yields // *Science*. 1977. V. 196. P. 19–25.
3. *Природа Земли из космоса*. Л.: Гидрометеоздат, 1984. 151 с.
4. *Earth Observation Handbook*: CEOS, 2003. 167 p.
5. *Документация на спутник ASTER*. <http://asterweb.jpl.nasa.gov/default.htm>
6. *Чанурский Л.И.* Отражательные свойства природных объектов в диапазоне 400–2500 нм. М.: Изд. МО СССР, 1986. 160 с.
7. *Спектральная библиотека спутника ASTER*. <http://speclib.jpl.nasa.gov/>