

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ ПРИРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ПО ИХ МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫМ КОСМИЧЕСКИМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ

В.В.Козодеров*, В.В.Борзяк*, Е.В.Дмитриев, Ю.А.Думлер***,
В.Д.Егоров**, А.С.Черепанов***, В.М.Шахпаронов***

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

*****Институт вычислительной математики Российской академии наук***

******ЗАО «Совзонд»***

План доклада

- **Исходные данные и выходная информационная продукция реализации инновационной технологии обработки многоспектральных космических изображений (данные аппаратуры MODIS/Moderate Imaging Spectroradiometer и ASTER/Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer спутника Terra, данные аппаратуры ETM+/Enhanced Thematic Mapper спутника Landsat-7)**
- **Примеры приложений разработанного алгоритмического и программного обеспечения для территории Тверской области и окружающих ее территорий других областей при использовании абсолютно калиброванных дистанционного космического зондирования для решения задач распознавания образов природных объектов по их многоспектральным изображениям и получения количественных оценок состояния почвенно-растительного покрова вместо общепринятых качественных оценок**

Исходные положения

- **Традиционные подходы к использованию данных аппаратуры MODIS и других типов спутниковой аппаратуры предполагают использование достаточно стандартного программного обеспечения, поставляемого зарубежными фирмами, для анализа пространственного распределения относительных градаций регистрируемых многоспектральных яркостей или их комбинаций типа «вегетационных индексов»**
- **Имеется необходимость разработки специализированного программного обеспечения, аналогичного известным кодам LOWTRAN, MODTRAN, HIGHTRAN расчета переноса излучения в системе «земная поверхность – атмосфера», но при уточненных условиях формирования спектральной интенсивности уходящего излучения от растительного полога разной плотности и разных типов растительности (лесной: лиственные, хвойные, смешанные породы; болотно-луговой, сельскохозяйственной)**
- **Вследствие огромных объемов исходных данных разрабатываемое программное обеспечение обработки многоспектральных аэрокосмических изображений должно решать задачи распознавания образов наблюдаемых объектов и оценки их состояния при использовании высокопроизводительных многопроцессорных вычислительных систем**

Основы реализации разработанной инновационной технологии инвентаризации природных ресурсов и оценки экологического состояния регионов изложены на сайте

<http://slides.novalink.ru>

В.В.Козодеров. Методы дистанционного зондирования Земли.

Технология основана на решении прямой и обратной задачи дистанционного зондирования объектов природно-техногенной сферы из космоса.

Прямая задача – это построение модели формирования полей уходящего солнечного излучения в видимой и ближней инфракрасной областях спектра в применении к конкретным типам аппаратуры дистанционного космического зондирования для множества возможных состояний лесных, сельскохозяйственных, водных и других экосистем при разных условиях их освещения Солнцем и замутнения атмосферы в момент съемки.

Обратная задача – это компьютерный поиск наилучшего соответствия между результатами модельных расчетов и измерений используемой аппаратуры дистанционного космического зондирования с целью классификации объектов природно-техногенной сферы на обрабатываемых многоспектральных изображениях и количественной оценки экологического состояния класса «растительность» для каждого элемента соответствующих изображений.

Дистанционно измеряемый функционал L_{jk} яркости неоднородного по пространству растительного покрова в пределах области s_0 равен:

$$\begin{aligned}
 L_{jk}(\lambda, i, n, r, \theta, \varphi, M(C_n, A_{кр}), h_0) = \\
 = (\pi^{-2}/2) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \{ U_S(\lambda, n, h_0) [(1 - C_n - \delta_1) \rho_1(\lambda, r, \theta, \varphi, \theta', \varphi') + \\
 + (C_n - C_n A_{кр} - \delta_2) \rho_2(\lambda, i, \theta, \varphi, \theta', \varphi') + C_n A_{кр} \rho_3(\lambda, r)] + \\
 + H_S(\lambda, n, h_0) [\delta_1 \rho_1(\lambda, r, \theta, \varphi, \theta', \varphi') + \delta_2 \rho_2(\lambda, i, \theta, \varphi, \theta', \varphi')] \} \times \\
 \times R_{jk}(\lambda, \Omega) \cos \theta' d\lambda d\theta' d\varphi',
 \end{aligned}$$

где j - номер канала приемной аппаратуры k -го типа с полем зрения s_0 и функцией чувствительности $R_{jk}(\lambda, \Omega)$; λ - длина волны с нижним (λ_1) и верхним (λ_2) пределами; Ω - телесный угол зрения аппаратуры; n - параметр типа атмосферных условий (прозрачности атмосферы); i - параметр типа (породы) лесной растительности; r - параметр типа межкроновой травянистой/кустарниковой растительности; M - плотность зеленой (листовой/хвойной) биомассы лесных насаждений или других типов растительности; h_0 - высота Солнца; (θ, φ) - зенитный и азимутальный углы наблюдения соответственно; $C_n = s_2/s_0$ - сомкнутость лесного полога; $A_{кр} = s_2^*/s_2$ - ажурность (сквозистость) крон; $\delta_1 = s'_1/s_0$, $\delta_2 = s'_2/s_0$ - доли теней в межкроновых областях и на кронах деревьев соответственно; s_1, s_2 - межкроновая и кроновая площади в поле зрения s_0 ($s_1 + s_2 = s_0$) соответственно; s'_1, s'_2 - части межкроновой и кроновой площадей, покрытые тенью; s_2^* - площадь внутри крон, не занятая элементами кроны - межкроновые просветы, внутри которых прямое и рассеянное излучение Солнца испытывает многократное рассеяние; ρ_1, ρ_2, ρ_3 - спектральные коэффициенты отражения (в общем случае - индикатрисы рассеяния) межкроновой травянистой/кустарниковой области, кроновой области и многократного рассеяния внутрикроновых просветов; (θ', φ') - зенитный и азимутальный углы для падающего прямого (U_s) и рассеянного (приходящего со всех участков небесной сферы) (H_s) солнечного излучения.

Искажающее влияние атмосферы на величину яркости L_{jk} на пути от земной поверхности до измерительной аппаратуры учитывается с помощью простой модели

$$L_{jk}^* (\dots) = L_{jk} (\dots) P_j (n, \theta, \varphi) + D_j (n, \theta, \varphi),$$

где многоточием обозначен весь набор записанных выше параметров и величин, от которых зависит функционал; L_{jk}^* - измеренная со спутника яркость соответствующего элемента изображения; L_{jk} - яркость этого элемента на уровне земной поверхности; $P_j (n, \theta, \varphi)$, $D_j (n, \theta, \varphi)$ - соответственно прозрачность атмосферы (параметр экспоненциального ослабления фотонов солнечного излучения на соответствующей трассе их прохождения от земной поверхности до уровня спутника) и яркость атмосферной дымки (характеристика многократного рассеяния фотонов по всей толщине атмосферы) в j -м канале аппаратуры k -го типа.

Примеры отображения результатов модельных расчетов в виде «книги» из отдельных «листов» в координатах $(C_{\Pi}, A_{кр})$

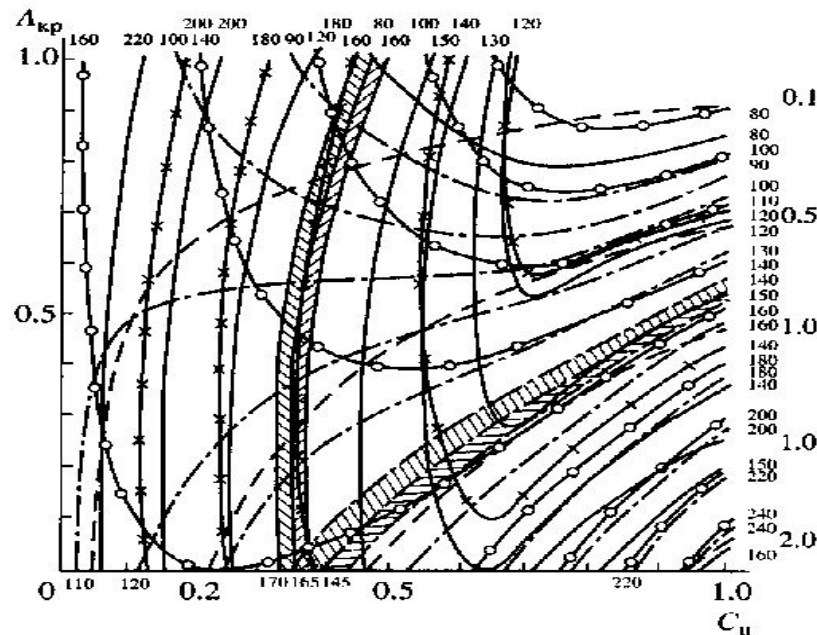


Рис. 1. Изолинии значений плотности зеленой фитомассы березы M , кг/м^2 (5) и яркости березового леса J_{λ} (град.) как функций ажурности крон $A_{кр}$ и сомкнутости полога $C_{п}$ для четырех каналов аппаратуры АТМ в видимом (1 – канал 1, 2 – канал 3) и БИКР (3 – канал 4, 4 – канал 6) участках спектра. Штрихованные полосы – пример полос-изолиний шириной $2\Delta_{п}$ ($\Delta_{п} = 5$ град.) на каналах 1 и 6, их пересечение дает область, по которой необходимо провести осреднение для нахождения 2-канального решения.

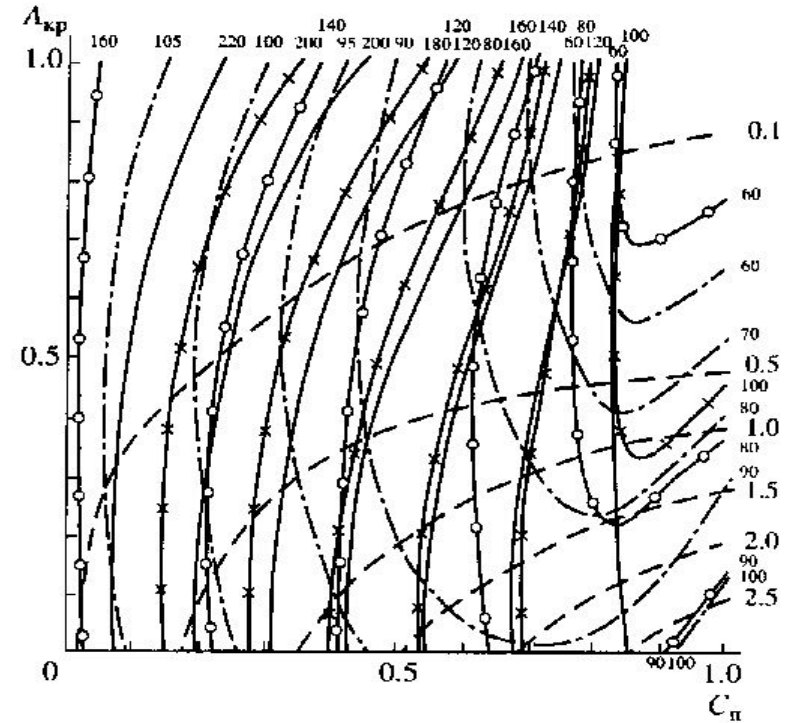


Рис. 2. Изолинии значений плотности зеленой фитомассы M , кг/м^2 (пунктир) и яркости слового леса J_{λ_i} (градации) как функций ажурности крон $A_{\text{кр}}$ и сомкнутости полога $S_{\text{п}}$ для четырех каналов аппаратуры АТМ в видимом и БИКР участках спектра (см. обозначения на рис. 1).

Решение обратной задачи восстановления биомассы лесной растительности для каждого элемента многоспектрального изображения – это поиск наилучшего соответствия между текущими значениями яркостей и полученных в результате модельных расчетов (поиск «правильного листа книги»)

Минимальное число листов «книги» - расчетных значений функционала в координатах «плотность лесного полога – ажурность крон деревьев»: высота Солнца – 3 (весна, лето, осень); число моделей затенения фитоэлементов (связаны с высотой Солнца) – 3; дискретные значения отражательной способности межкроновой растительности – 10, кроновой области – 10; многократного рассеяния внутрикроновых просветов – 10; породный состав леса (от полностью лиственной до полностью хвойной растительности через каждые 10% смешанного леса) – 11; прозрачность атмосферы – 4; типы межкроновой растительности – 6 (яркая трава, более темная трава, заросшее травой болото, более темное болото, темная трава (мох), чистая вода). Получается около 2 млн. вариантов.

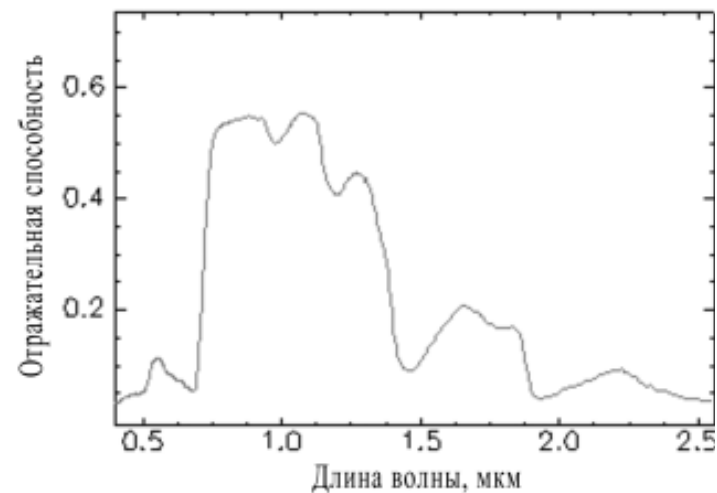
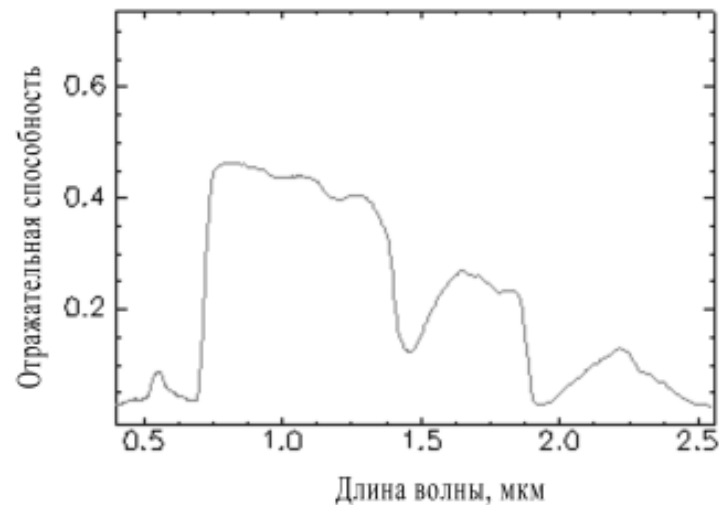
В реальности это число вариантов надо умножить на соответствующие «листы книги», характеризующие 7 спектральных каналов и 3 типа спутниковой аппаратуры (MODIS, ETM+, ASTER), а для аппаратуры MODIS на 40 x 40 дискретных углов визирования (влево и вправо от надира через 1 градус до 40 градусов) и, по крайней мере, 4 азимутальных угла (разности азимутов визирования и Солнца). В итоге получается еще около 200 тыс. вариантов.

Спектральные каналы аппаратуры MODIS, ETM+ и ASTER (1-я, 2-я, и 3-я строки соответственно) с точки зрения оценки состояния, разных типов растительности

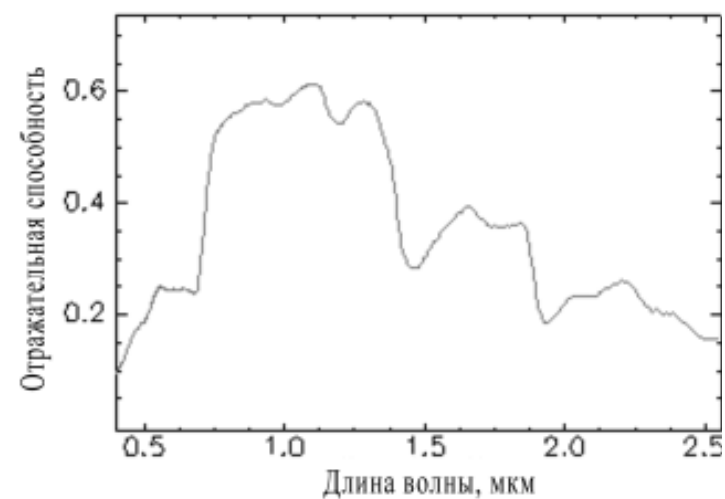
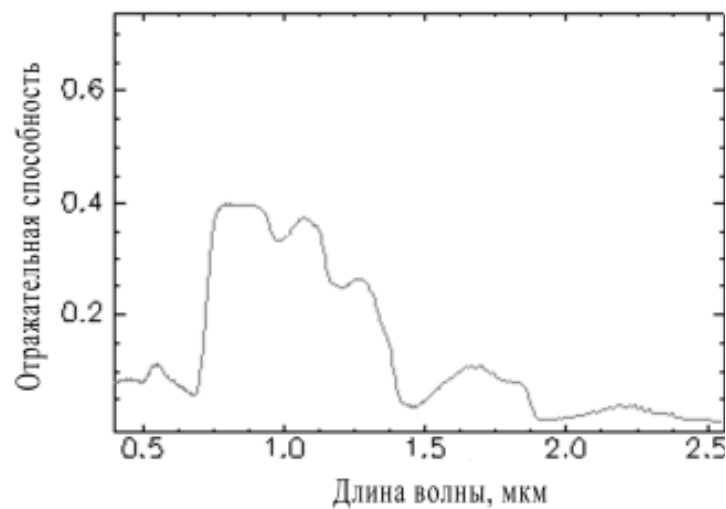
№ каналов	Ширина спектральных каналов	Примечания
1	0.459-0.479 мкм 0.45-0.52 мкм отсутствует	Самый коротковолновый канал
2	0.545-0.565 мкм 0.53-0.61 мкм 0.55-0.60 мкм	Соответствует максимуму энергии спектра падающего солнечного излучения
3	0.62-0.67 мкм 0.63-0.69 мкм 0.63-0.69 мкм	Максимум поглощения излучения в полосе хлорофилла
4	0.841-0.876 мкм 0.78-0.90 мкм 0.78-0.86 мкм	Главный максимум отражательной способности живого листа
5	1.23-1.25 мкм отсутствует отсутствует	Относительный минимум спектральной отражательной способности живого листа
6	1.628-1.652 мкм 1.55-1.75 мкм 1.60-1.70 мкм	Канал выбран как компромиссное решение между максимумом отражательной способности живого листа и относительным окном прозрачности атмосферы
7	2.105-2.155 мкм 2.09-2.35 мкм 2.145-2.185 мкм	Относительный максимум отражательной способности живого листа при наличии минимума отражения при более коротких длинах волн

ИЗЛУЧЕНИЕ ЗЕМЛЯ-СОЛНЦЕ





**Спектральное распределение отражательной способности:
листьев осины (слева), хвои ели (справа).**



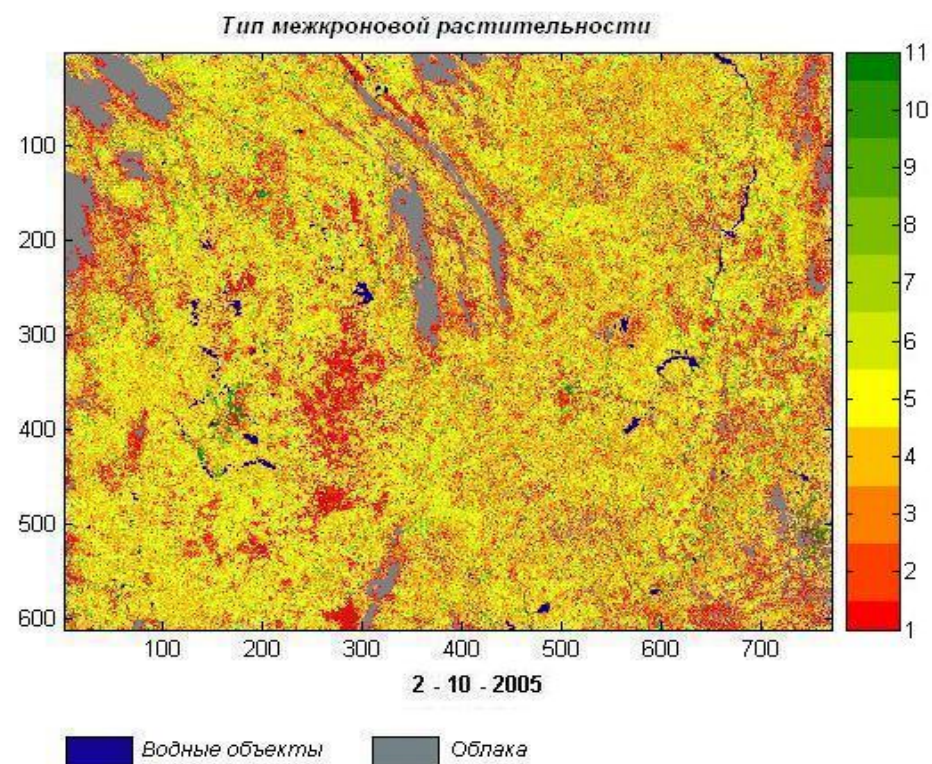
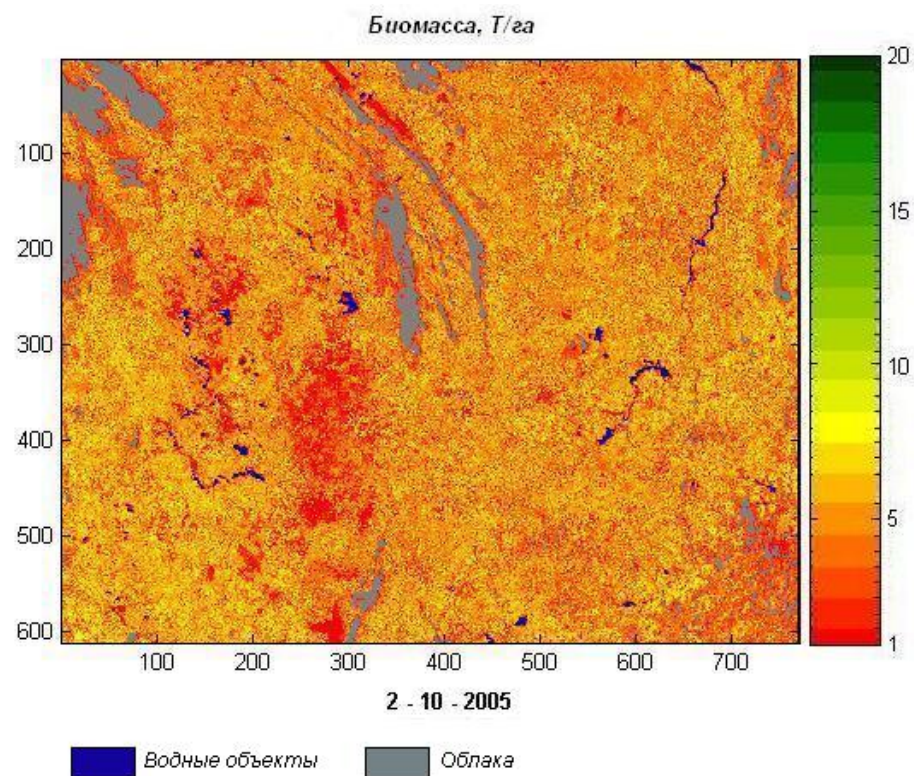
**Спектральное распределение отражательной способности:
хвои сосны (слева), кустарниковой растительности (справа).**

Выходная продукция обработки каждого элемента многоспектрального изображения:

- тип объекта (1 – растительность, 2 – вода, 3 – облачность, 4 – почвогрунты; класс «растительность» в процессе расчета может быть программным образом разбит на подклассы: лесная, болотная, луговая, сельскохозяйственная и другая растительность);
- прозрачность атмосферы (по крайней мере, 4 типа от прозрачной до сильно замутненной атмосферы; этим целям определения состояния атмосферы в момент съемки служит самый коротковолновый канал аппаратуры MODIS и ETM+);
- объем зеленой фитомассы растительности (типичные значения от нуля до приблизительно 30 т/га; имеются эмпирические связи для перехода от этой величины к общей биомассе древесной и другой растительности);
- среднеквадратические отклонения значений зеленой фитомассы растительности (соответствуют точности решения обратной задачи восстановления этой величины);

- тип растительности (для лесной растительности выделяется 11 классов породного состава: 1 – полностью лиственные породы, 11 – полностью хвойные породы; между ними – смешанные породы через каждые 10% преобладающих пород; для остальной растительности – болотно-луговая, сельскохозяйственные поля и др., также восстанавливаются соответствующие значения объема фитомассы и их среднеквадратические отклонения);
- тип межкроновой лесной растительности (выделяется несколько классов в соответствии с исходными данными модельных представлений о спектральных образах: яркая трава; более темная трава; болотная растительность: более темная и более светлая; мох; отсутствие растительности; кустарники; преобладание открытой водной поверхности между кронами деревьев);
- сомкнутость полога (от нуля до единицы: 0 – отсутствие фитомассы; 1 – полное покрытие лесного полога или полога иной растительности);
- ажурность верхней границы полога (то же, что и сомкнутость, но на уровне одного дерева или другого элемента, рассеивающего падающее излучение).

Значения биомассы растительности (слева) и состава растительности (справа) на дату съемки аппаратуры MODIS 02.10.05



Два примера обработки данных аппаратуры ASTER (объем фитомассы растительности и определение породного состава леса)

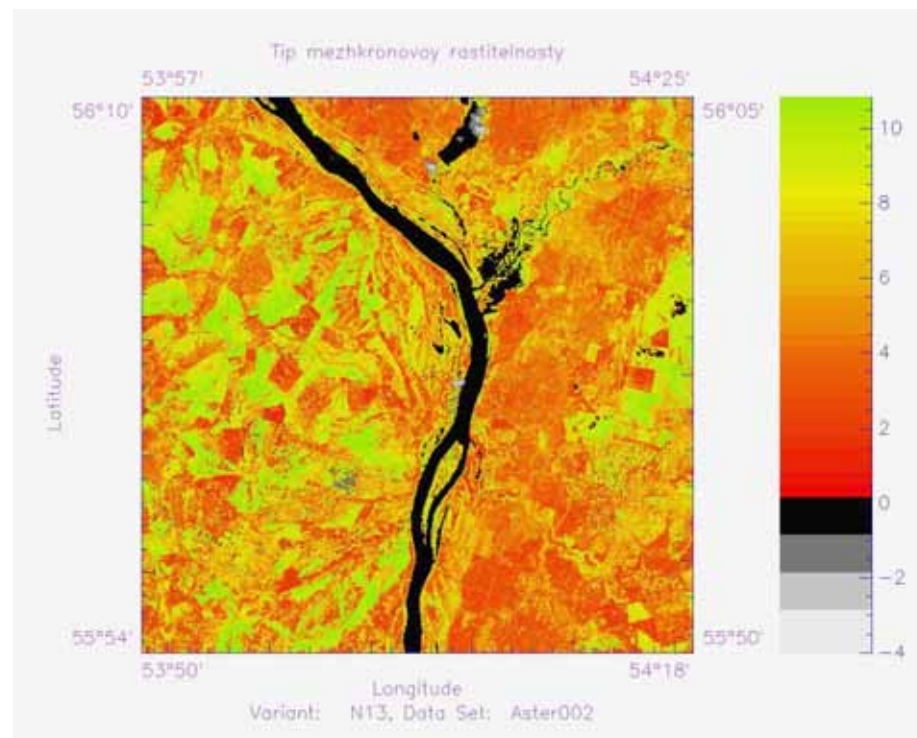
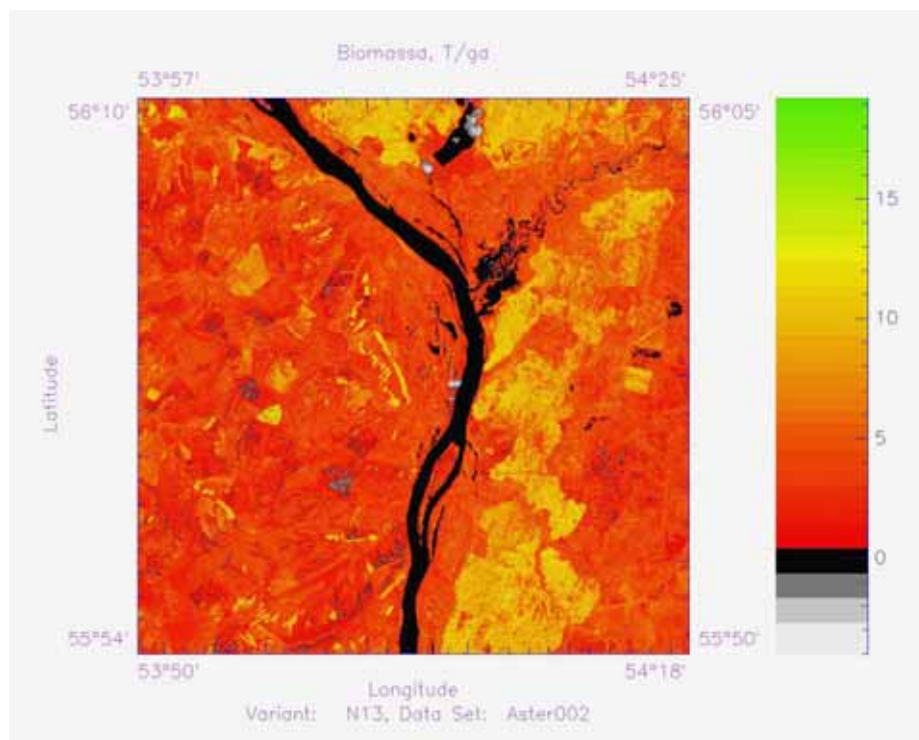
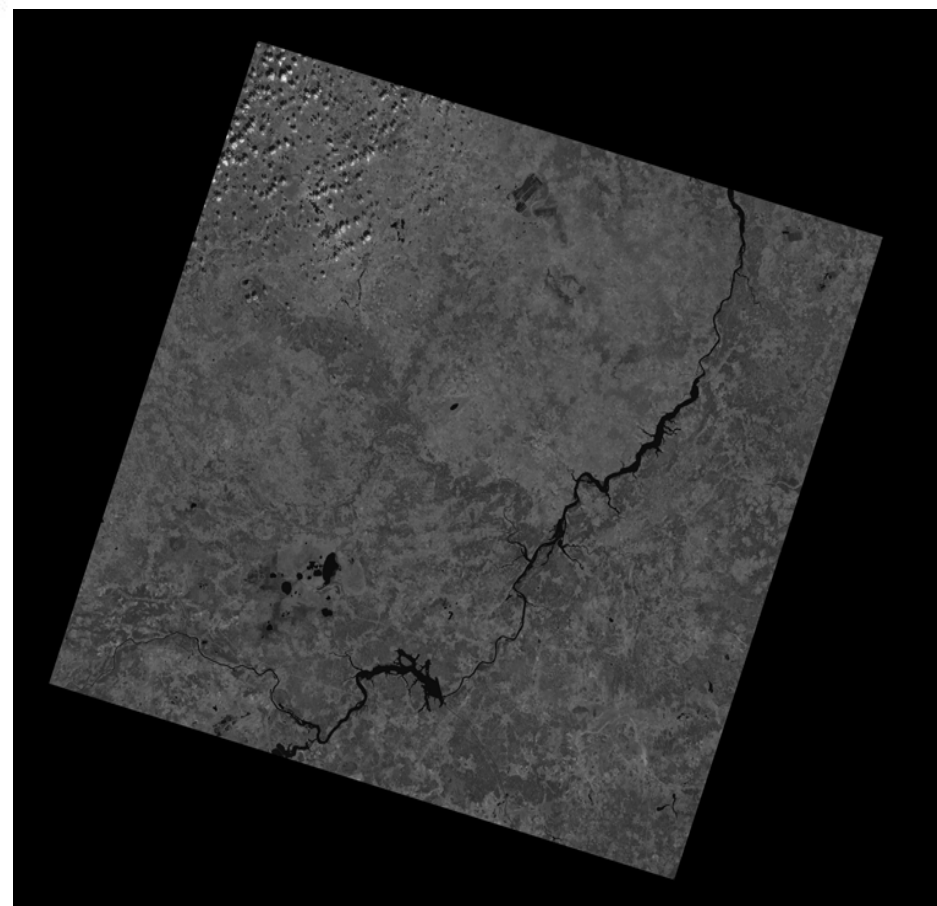
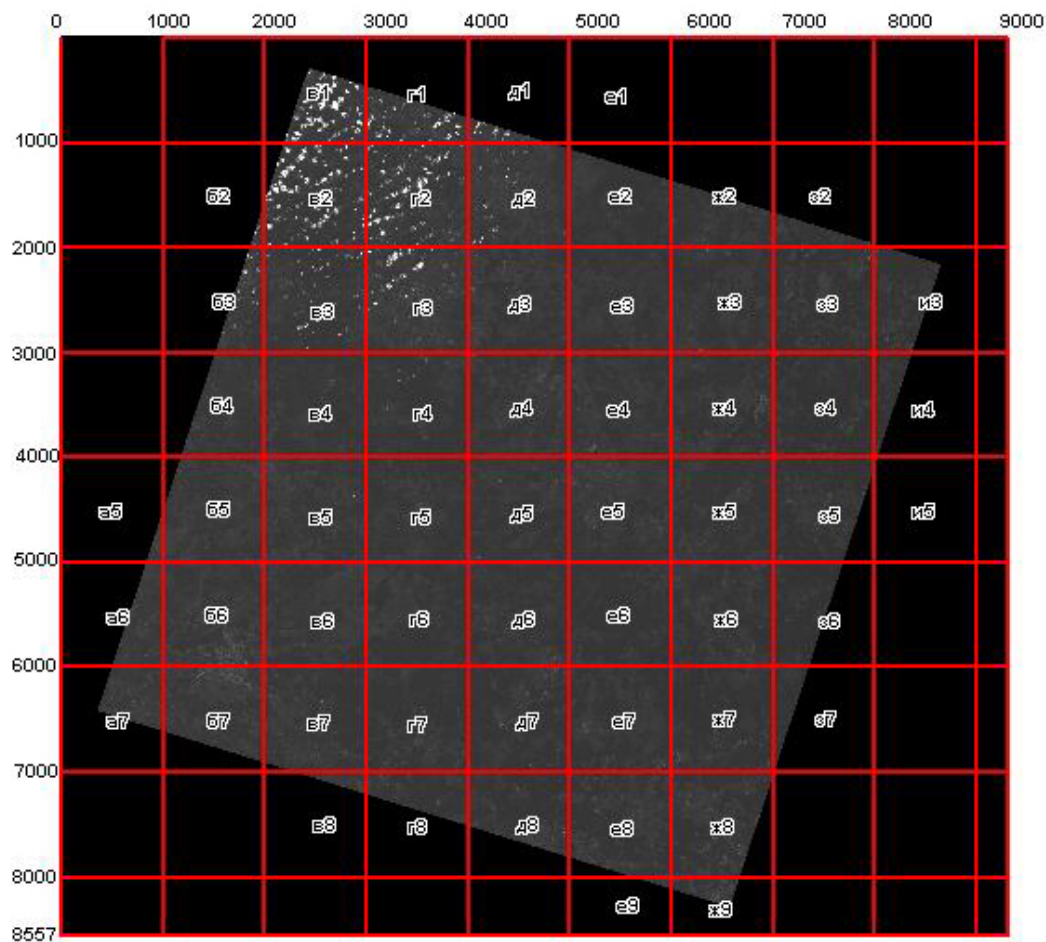
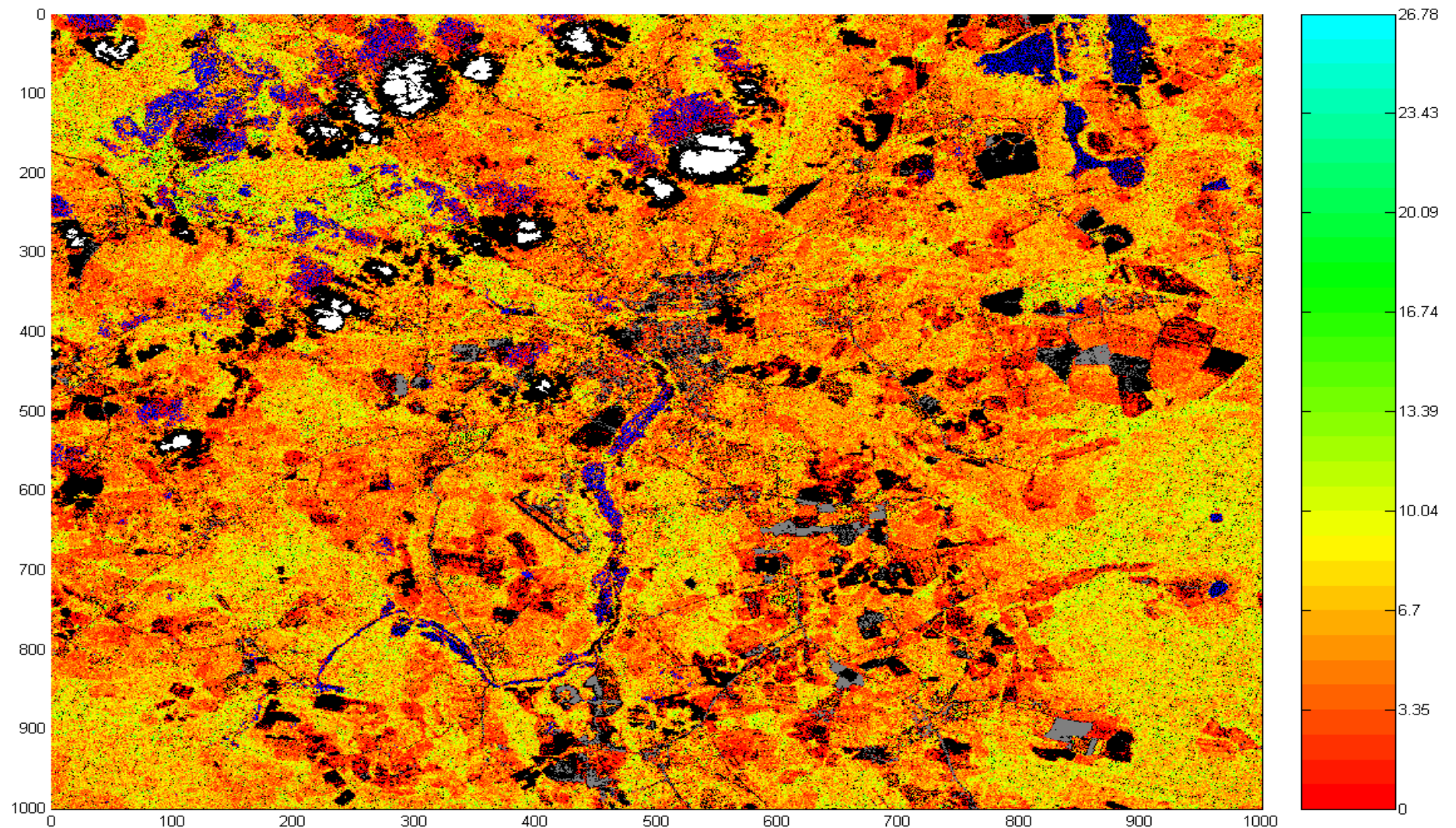


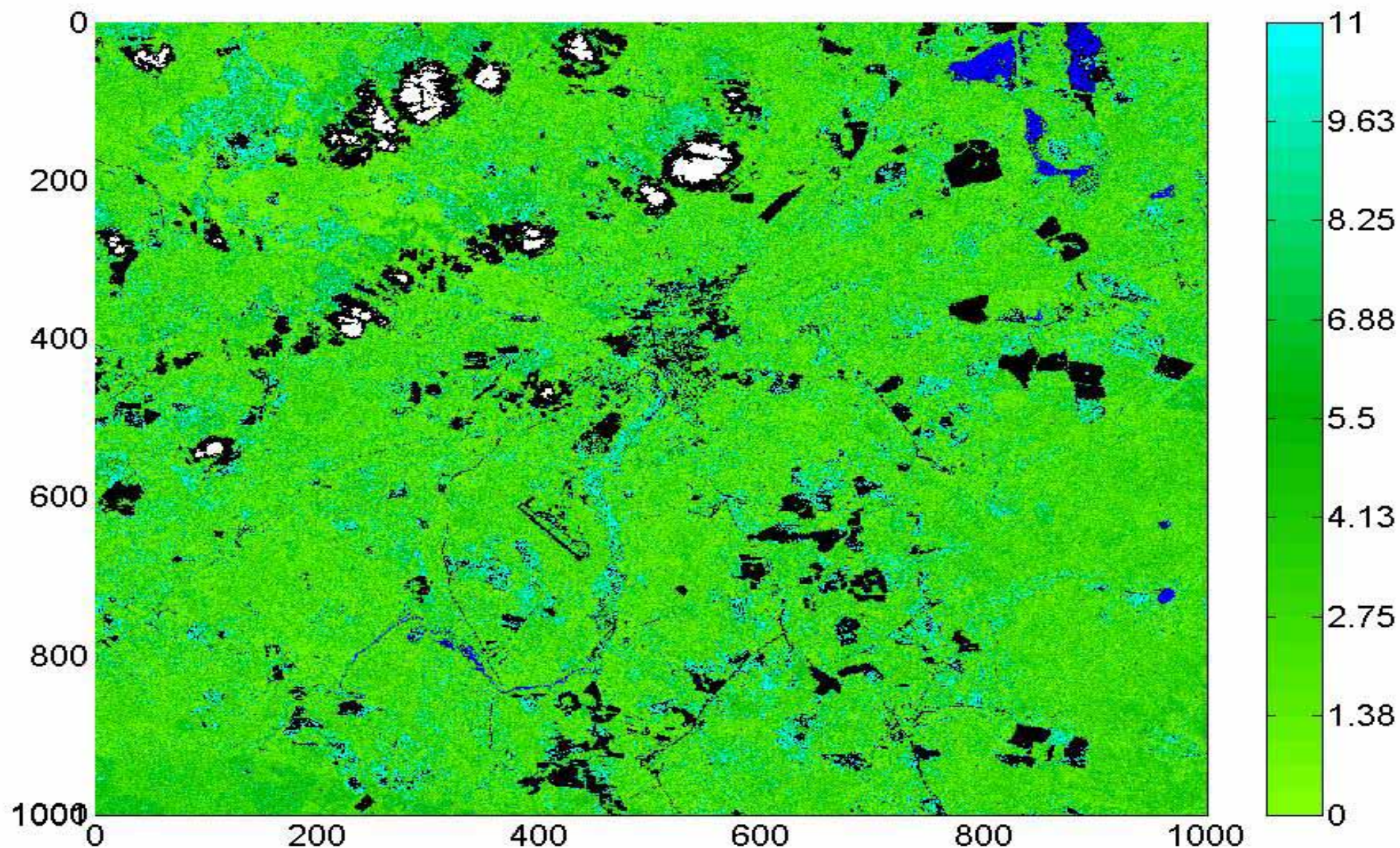
Схема разбиения исходного витка аппаратуры ETM+ спутника Landsat-7 на дату съемки 30.07.01 (слева) и само исходное изображение в 4-м канале (справа)



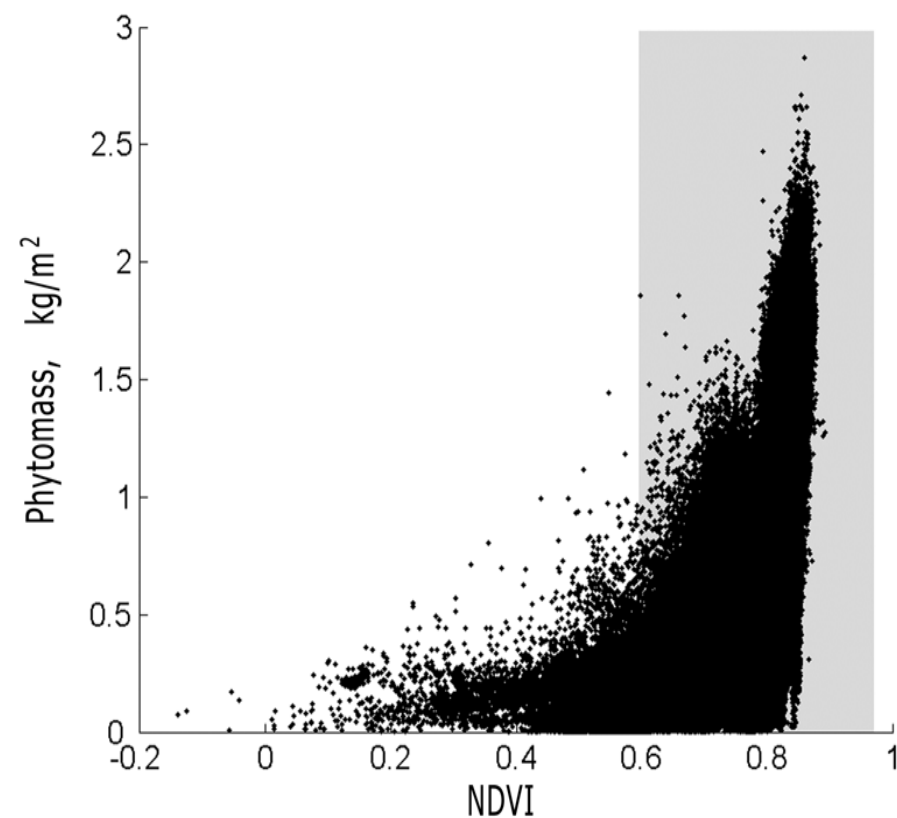
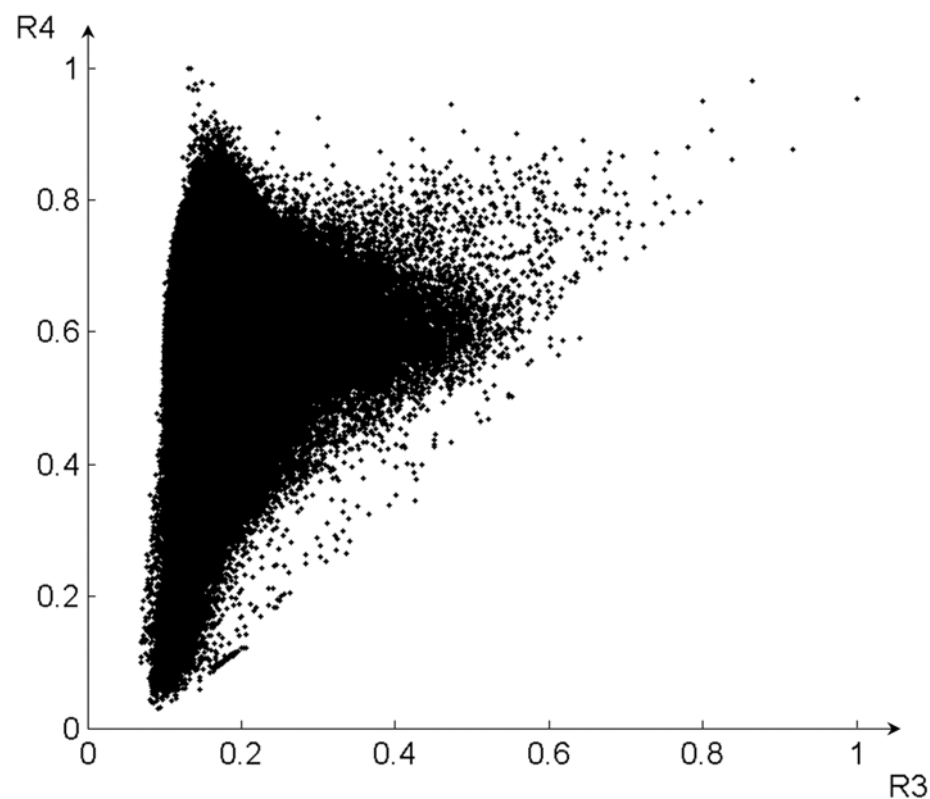
Обработанный фрагмент «гЗ» 1000 x 1000 элементов с цветовой шкалой значений биомассы для класса «растительность»

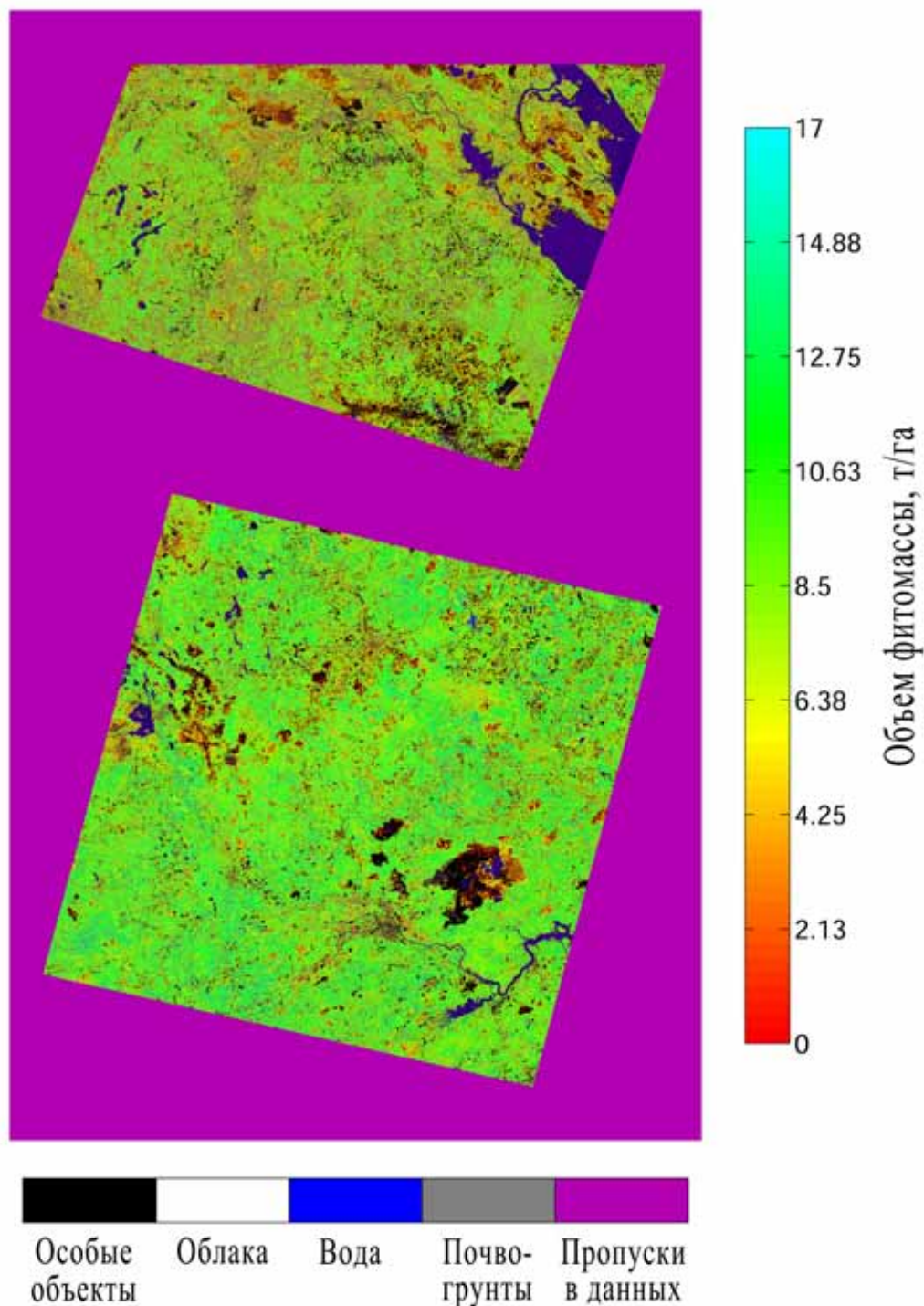


Распознавание растительности (травянисто-кустарниковая растительность – вблизи 0; чисто лиственный лес – 1; чисто хвойный – 11; смешанный лес – между 1 и 11)

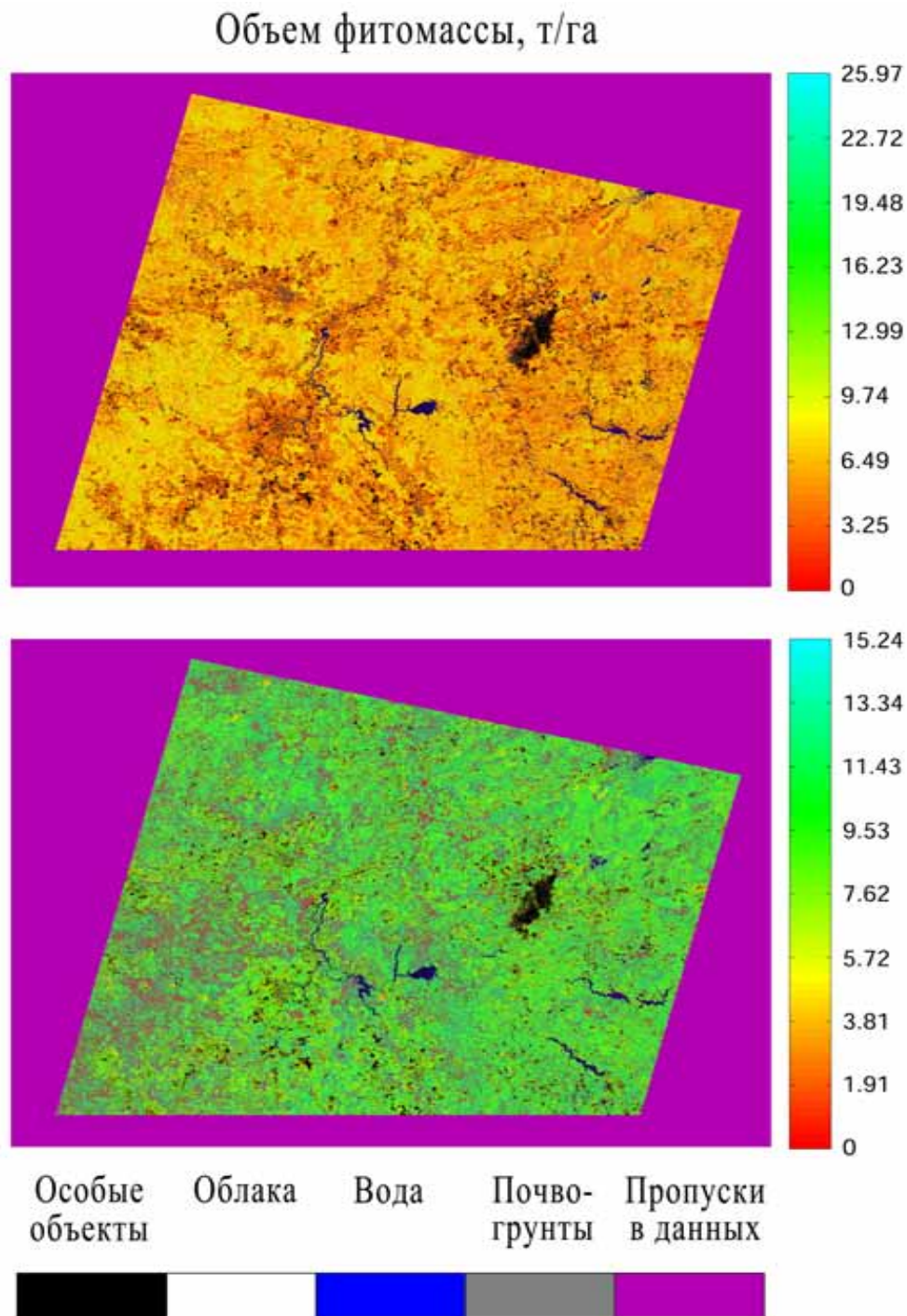


Распределение элементов разрешения в каналах 3 и 4 (видна «линия почв») (слева) и доказательство преимуществ предлагаемой технологии восстановления биомассы растительности вместо вегетационных индексов NDVI (справа)



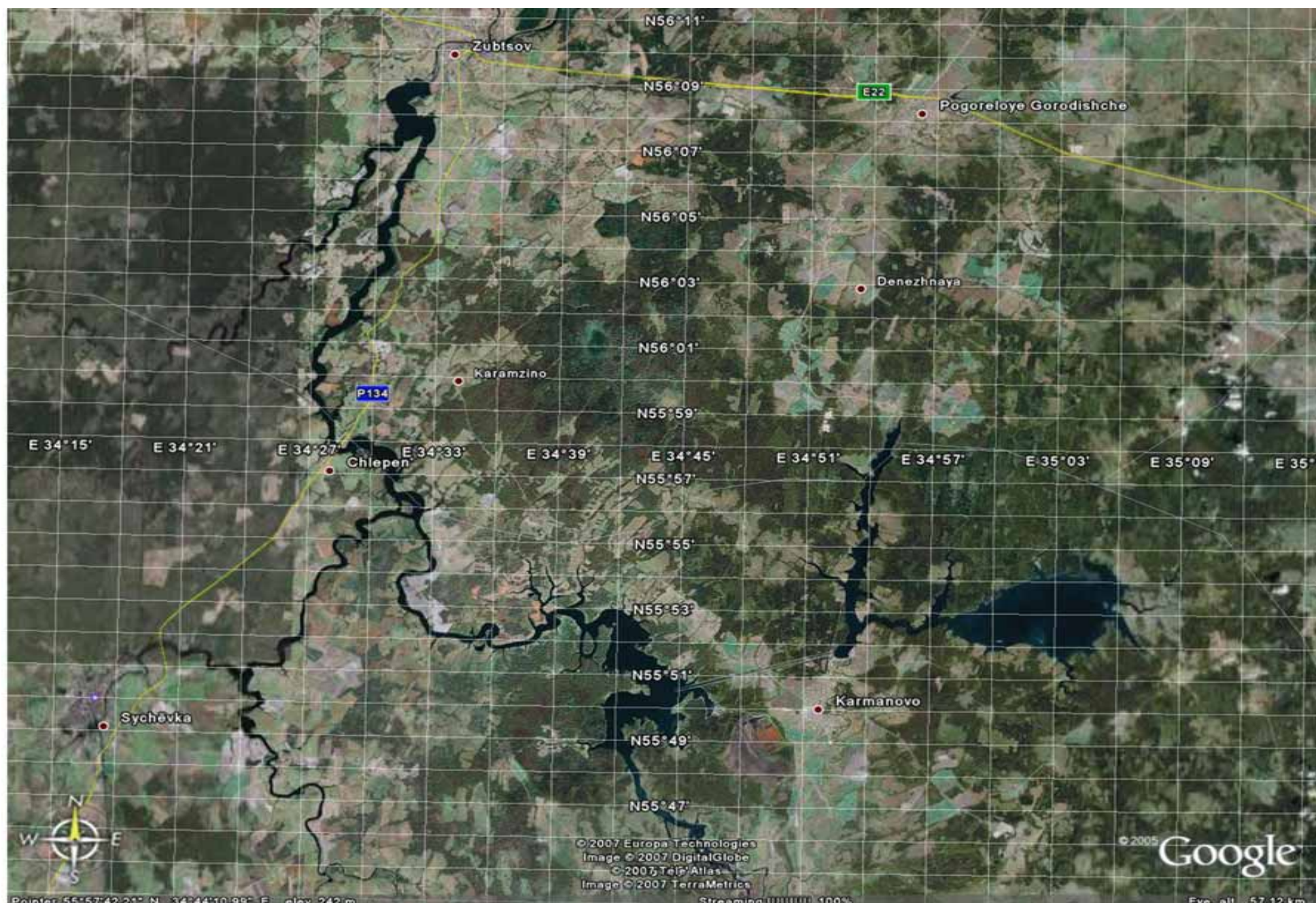


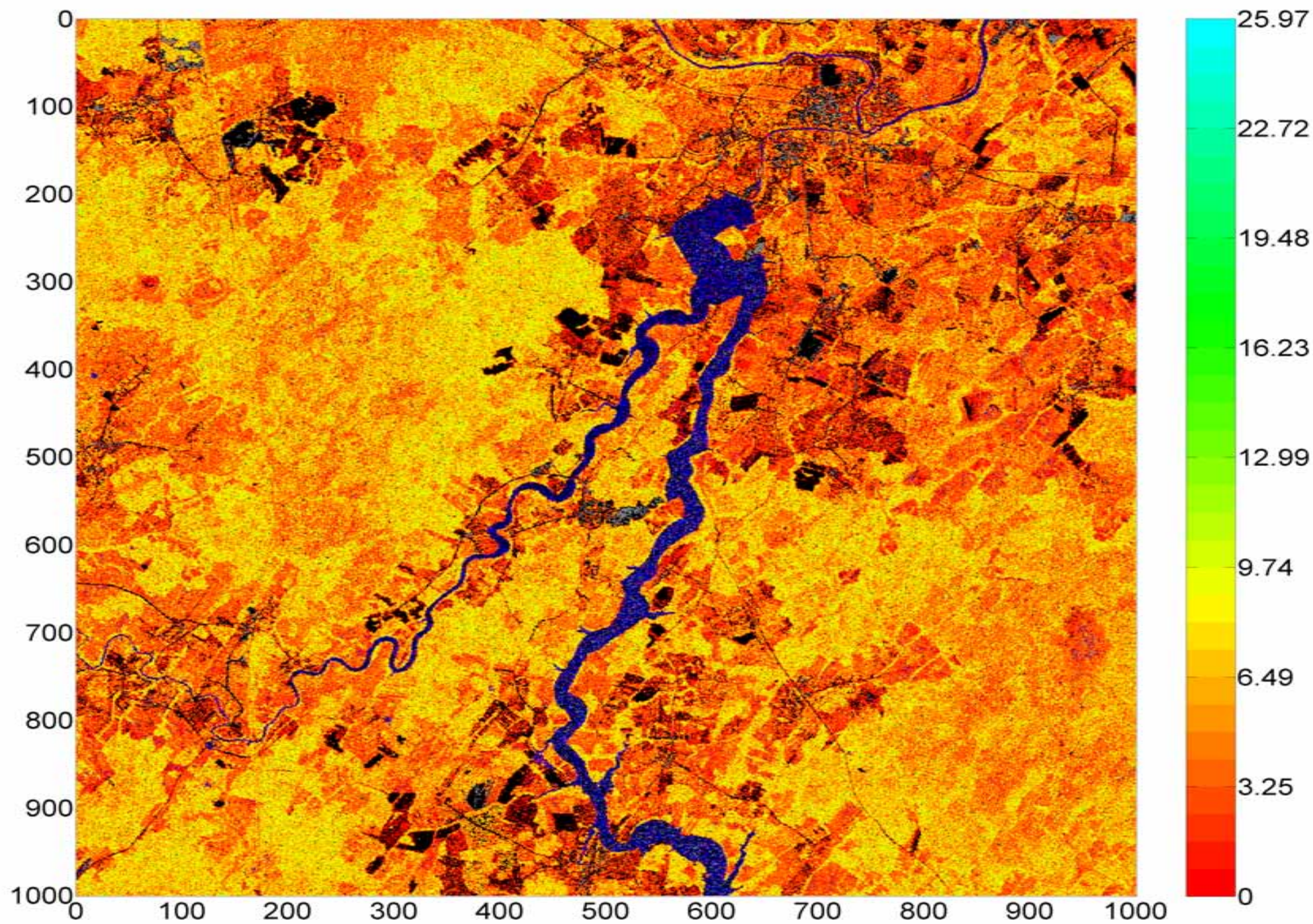
**Результаты
распознавания
образов объектов
природно-
техногенной сферы
(нижняя цветовая
шкала) и
восстановления
объема фитомассы
растительности
(шкала справа) для
двух изображений
аппаратуры ЕТМ+
(20.09.2000 – вверху,
02.09.1999 - внизу)**

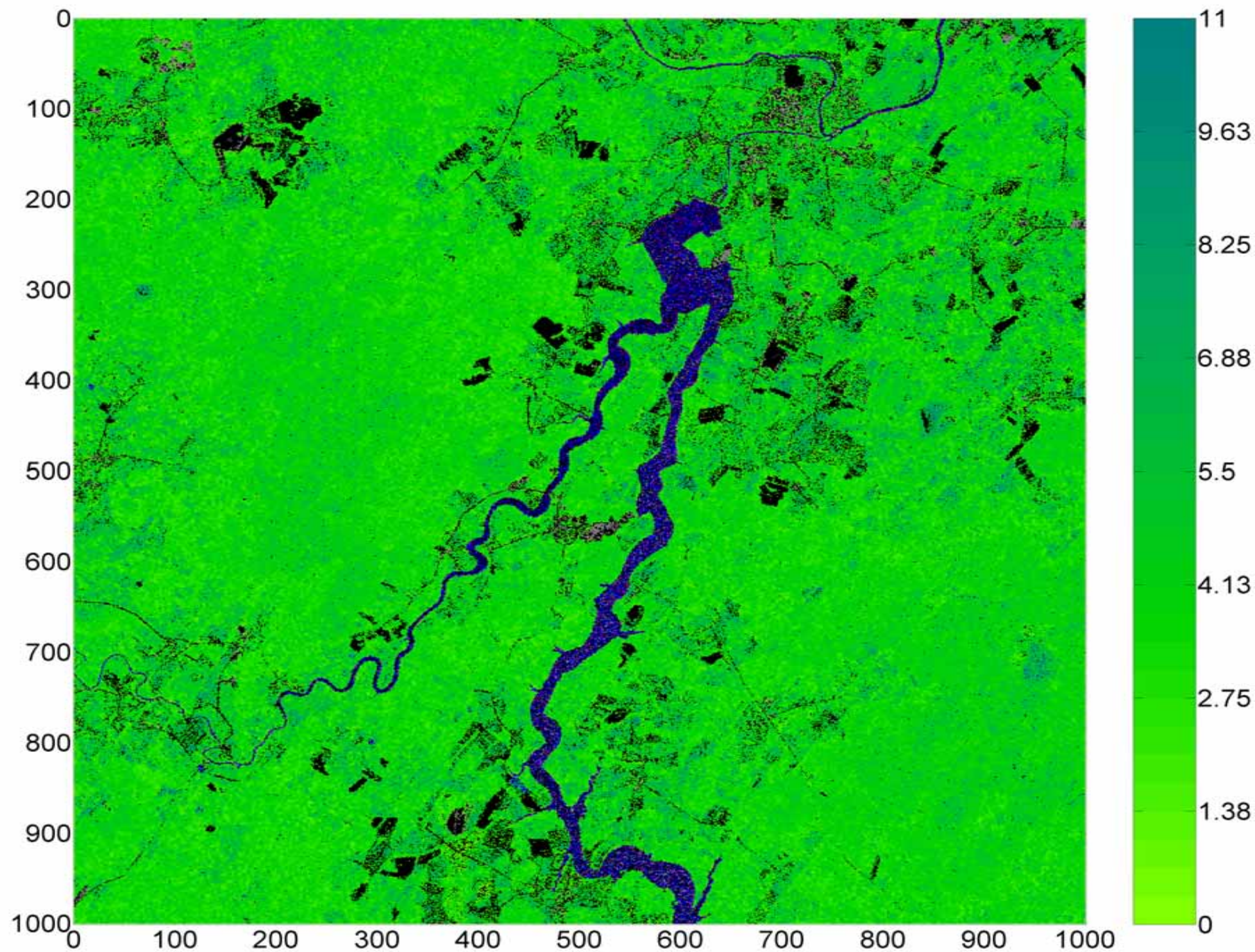


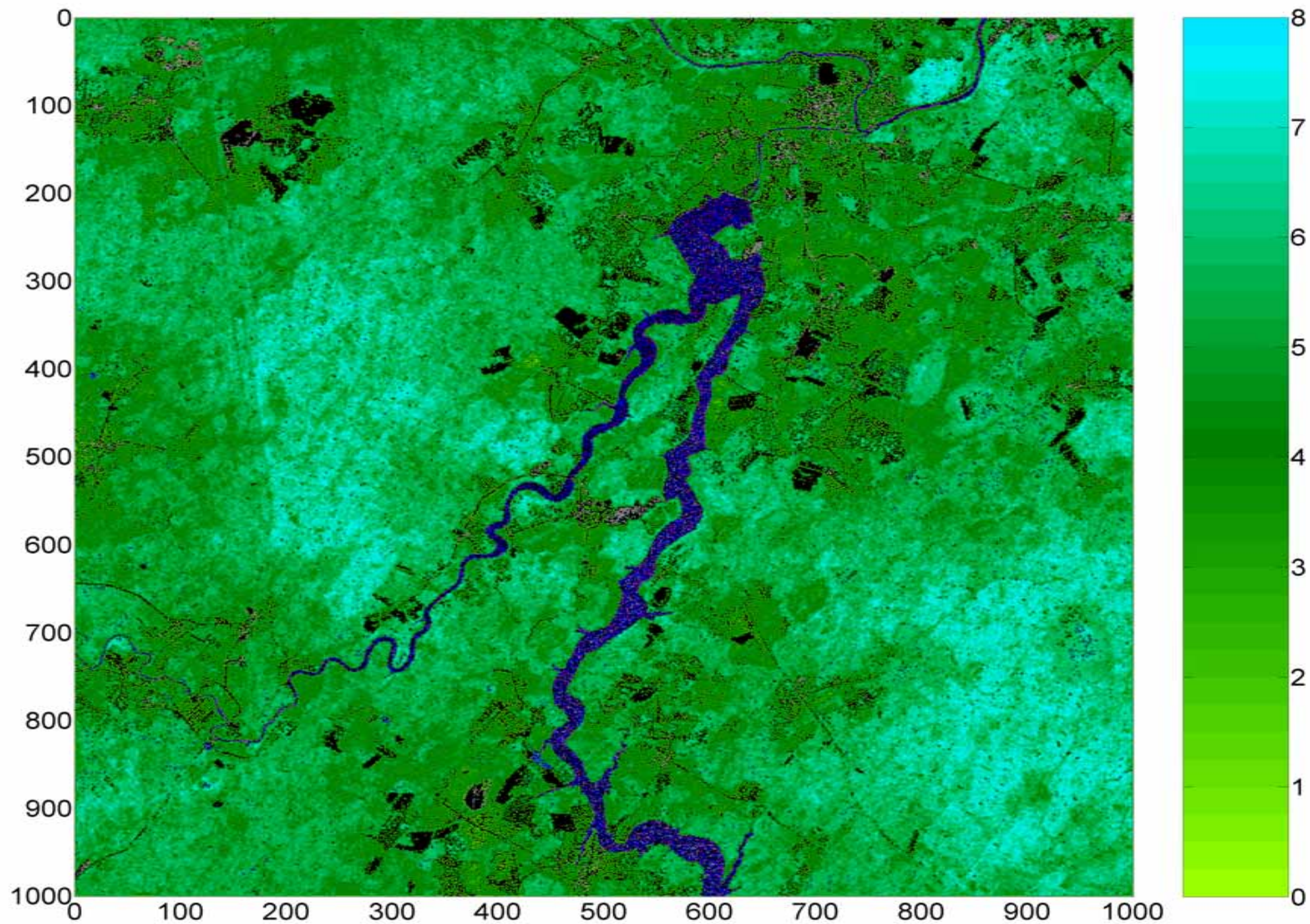
**Поэлементно
обработанное
изображение
аппаратуры ЕТМ+ на
дату съемки
21.07.2001 (вверху) и
то же изображение,
на котором
проведена
фильтрация данных
по фитомассе
растительности
путем осреднения
соседних элементов
разрешения в
пределах «окна» 3 x 3
элемента (внизу)**

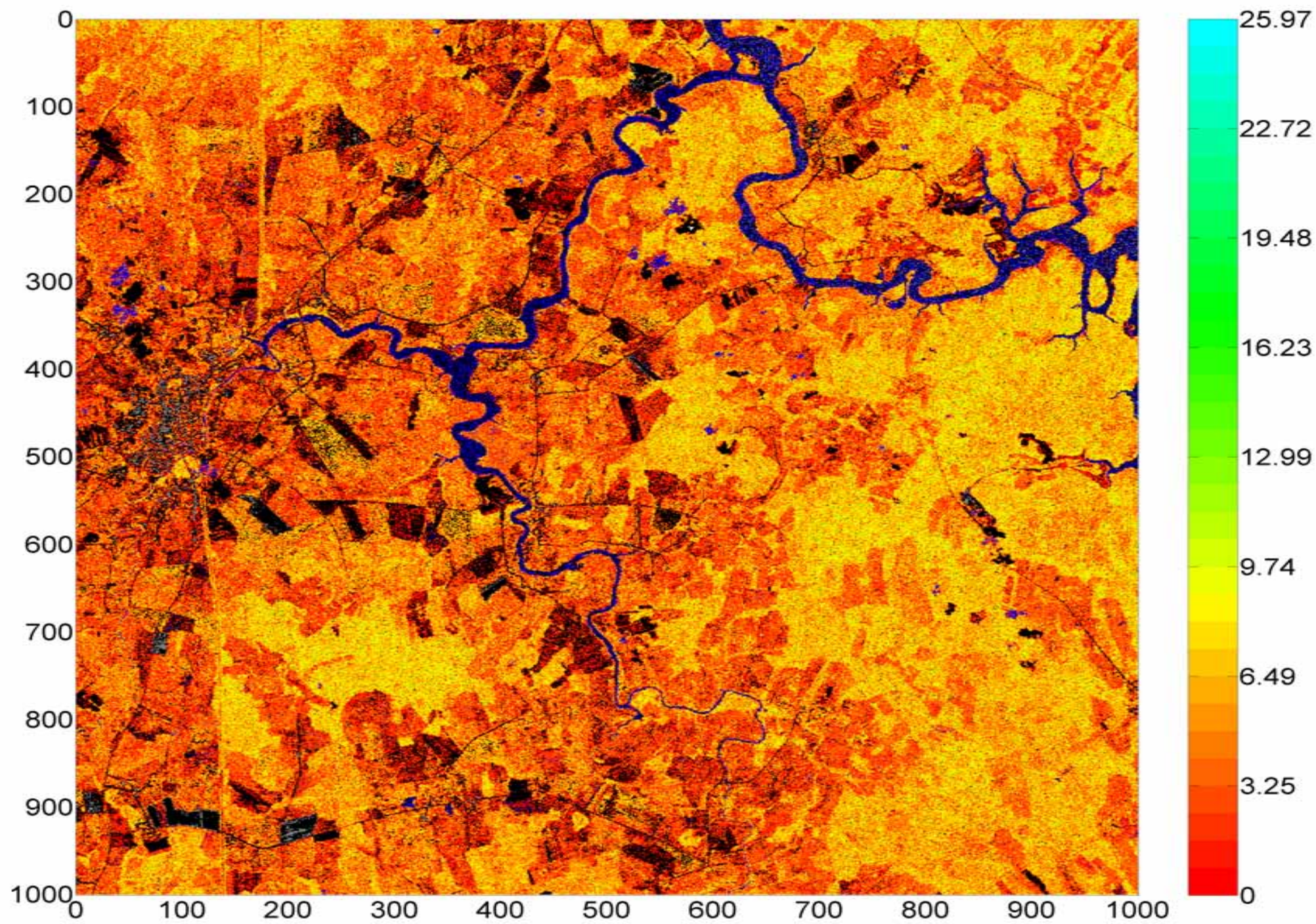
Территория на границе Тверской, Смоленской и Московской областей (Вазузское и Яузское водохранилища) в поисковой системе Google

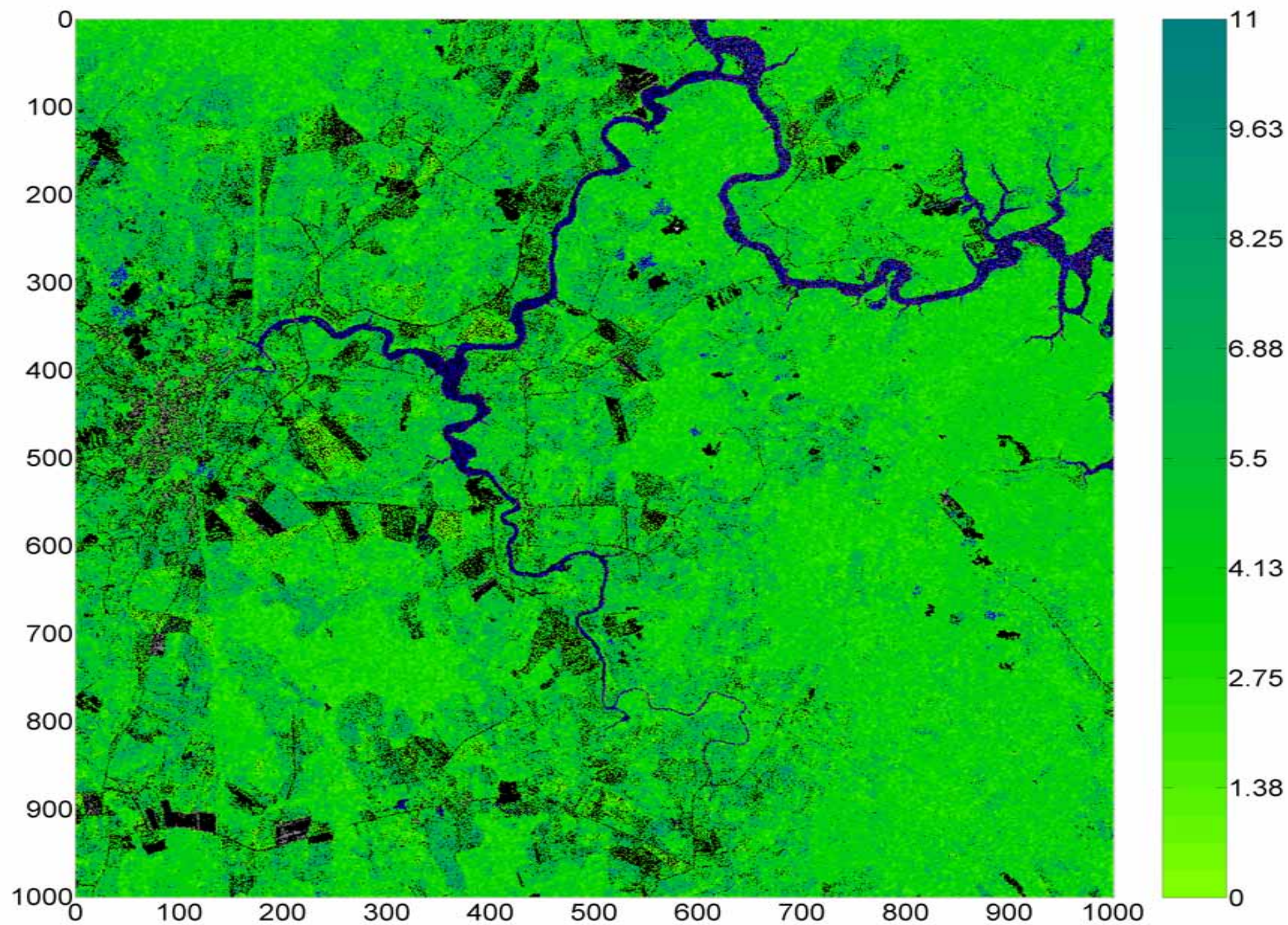


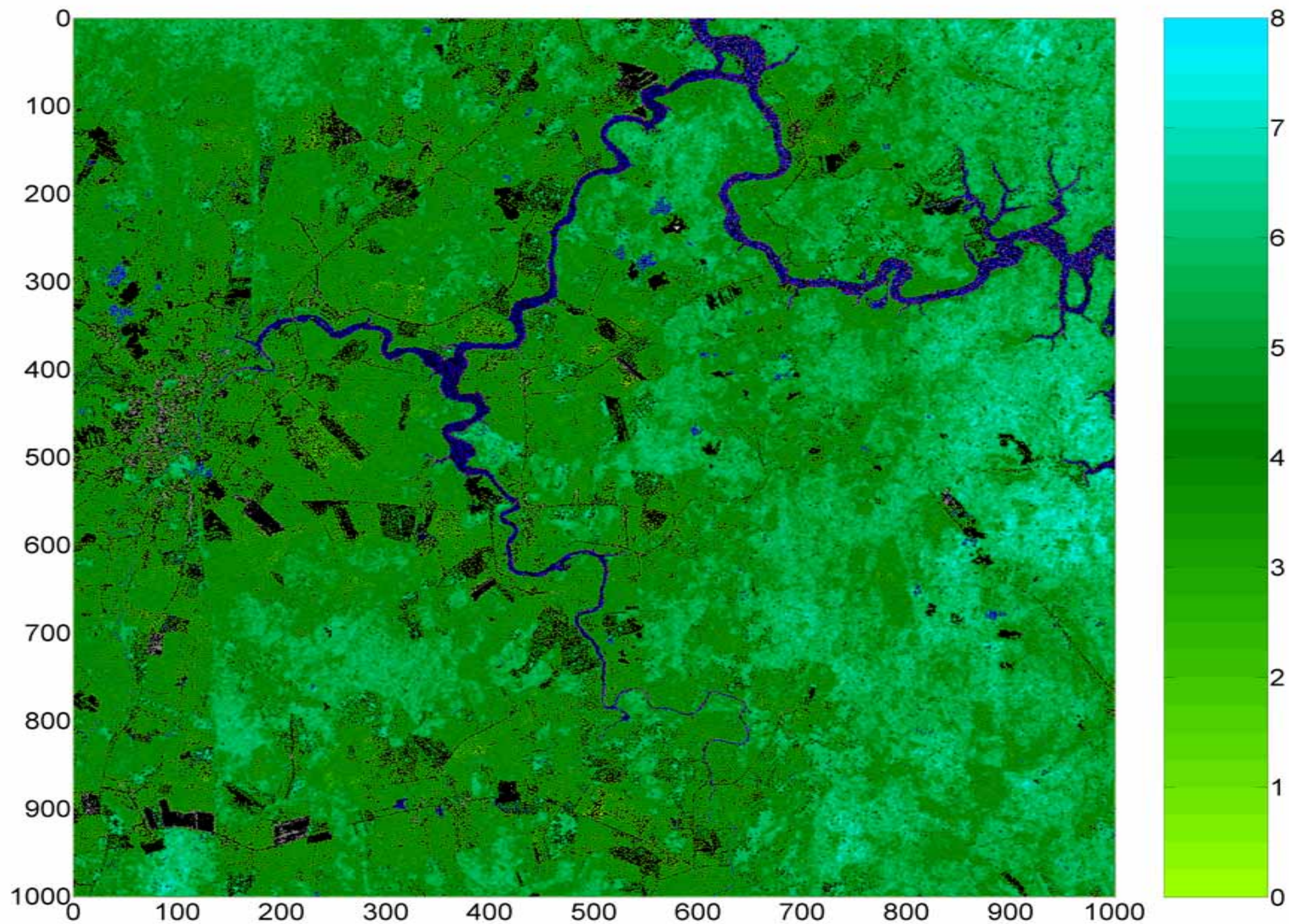


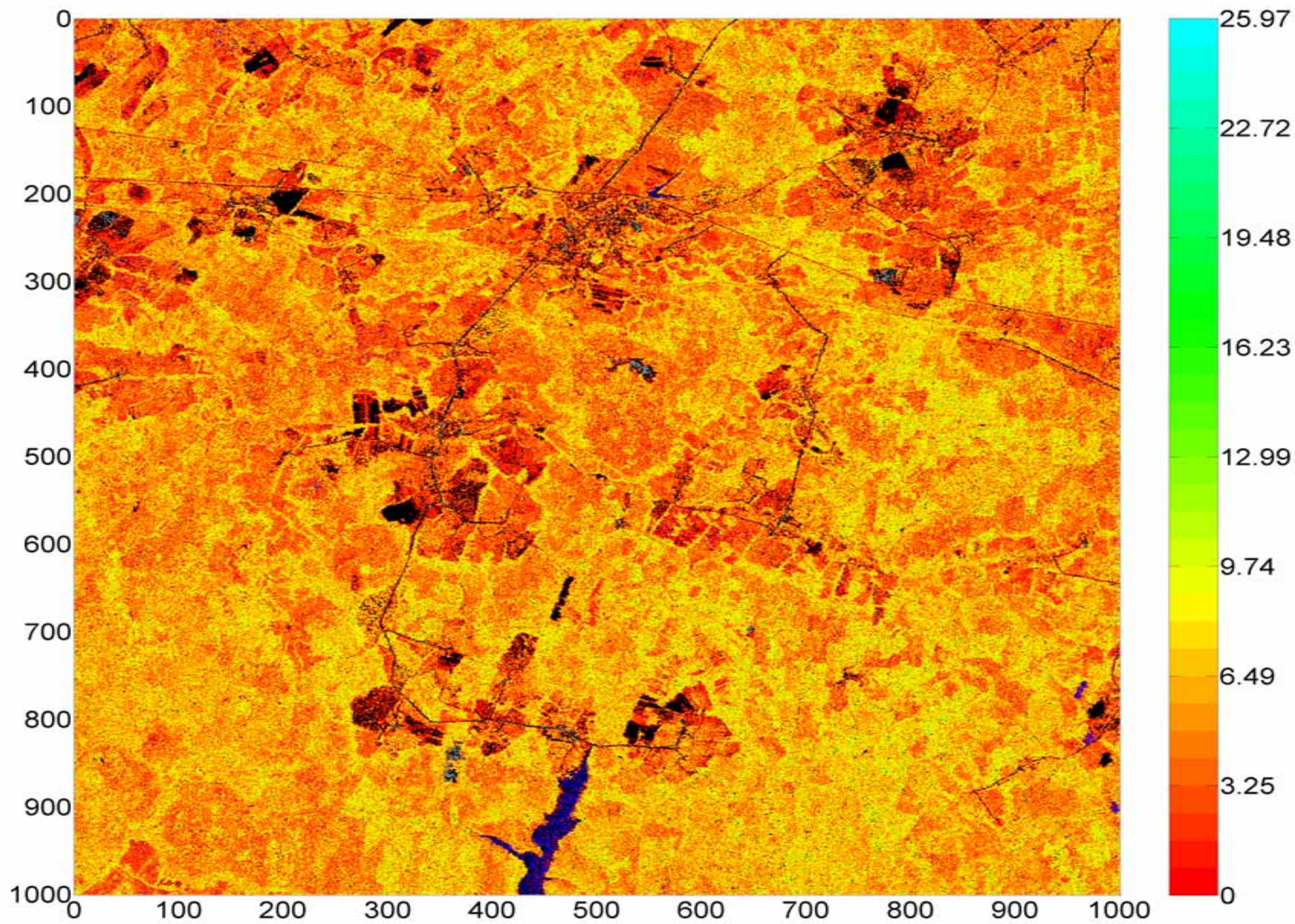


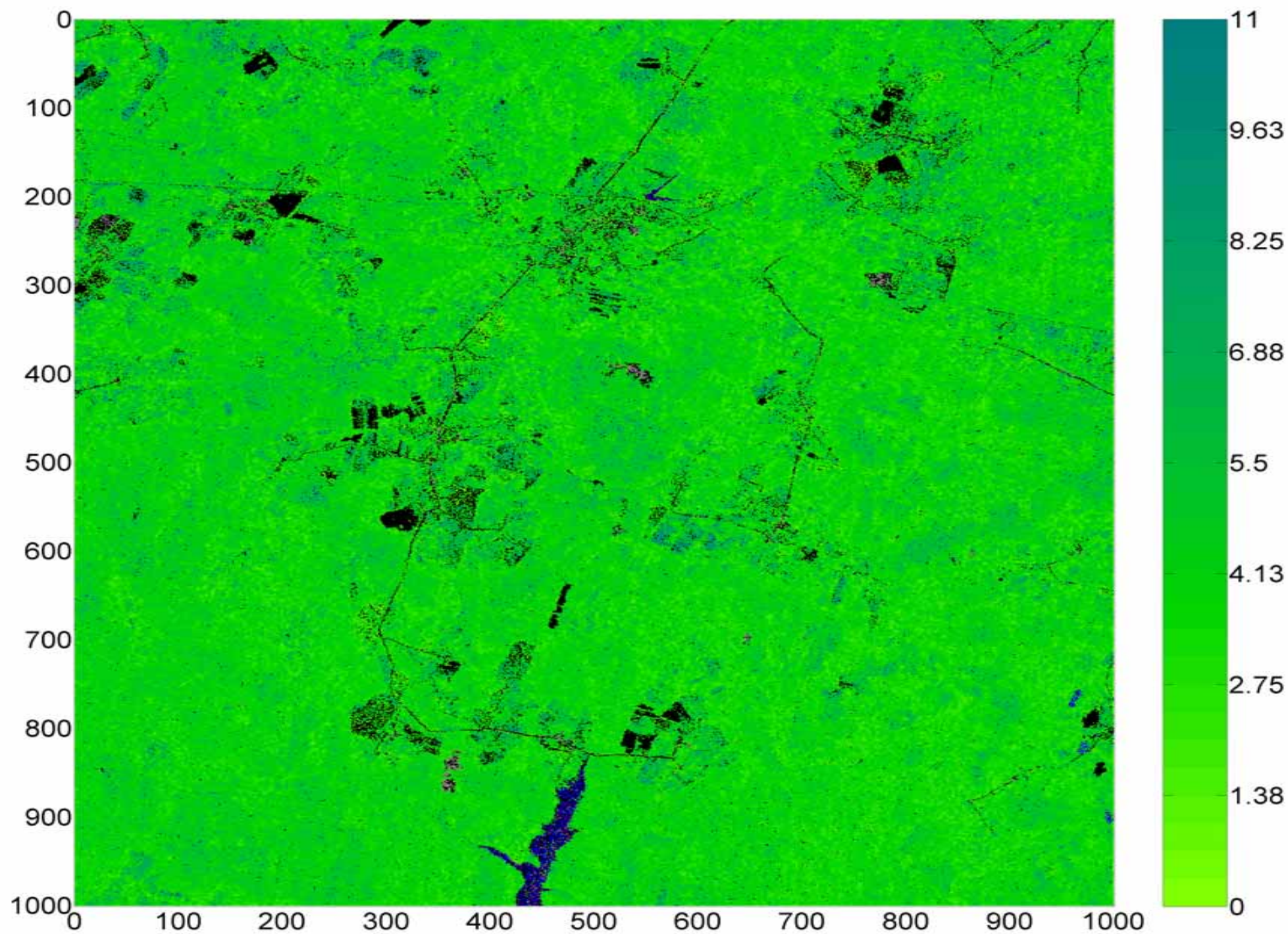


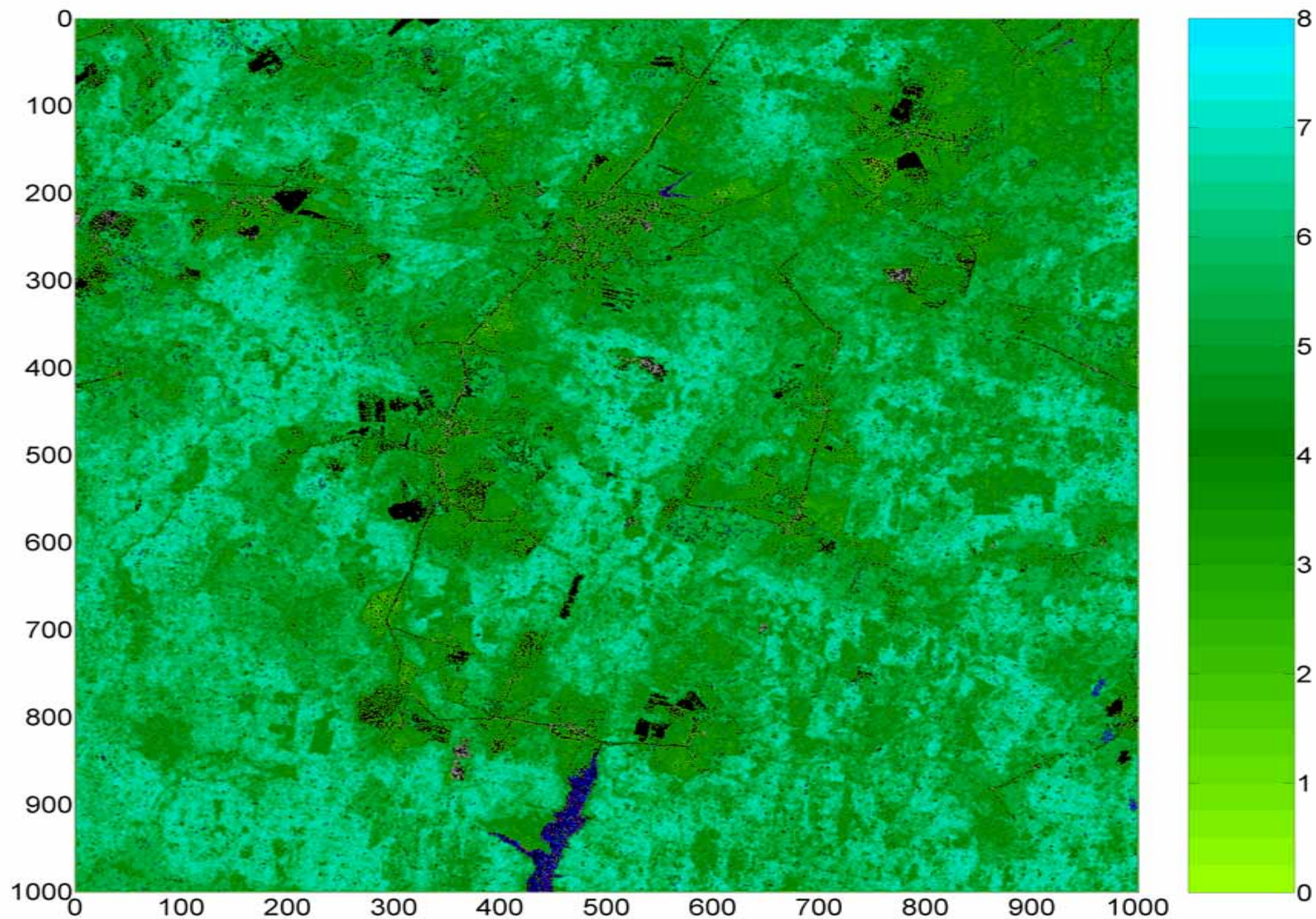


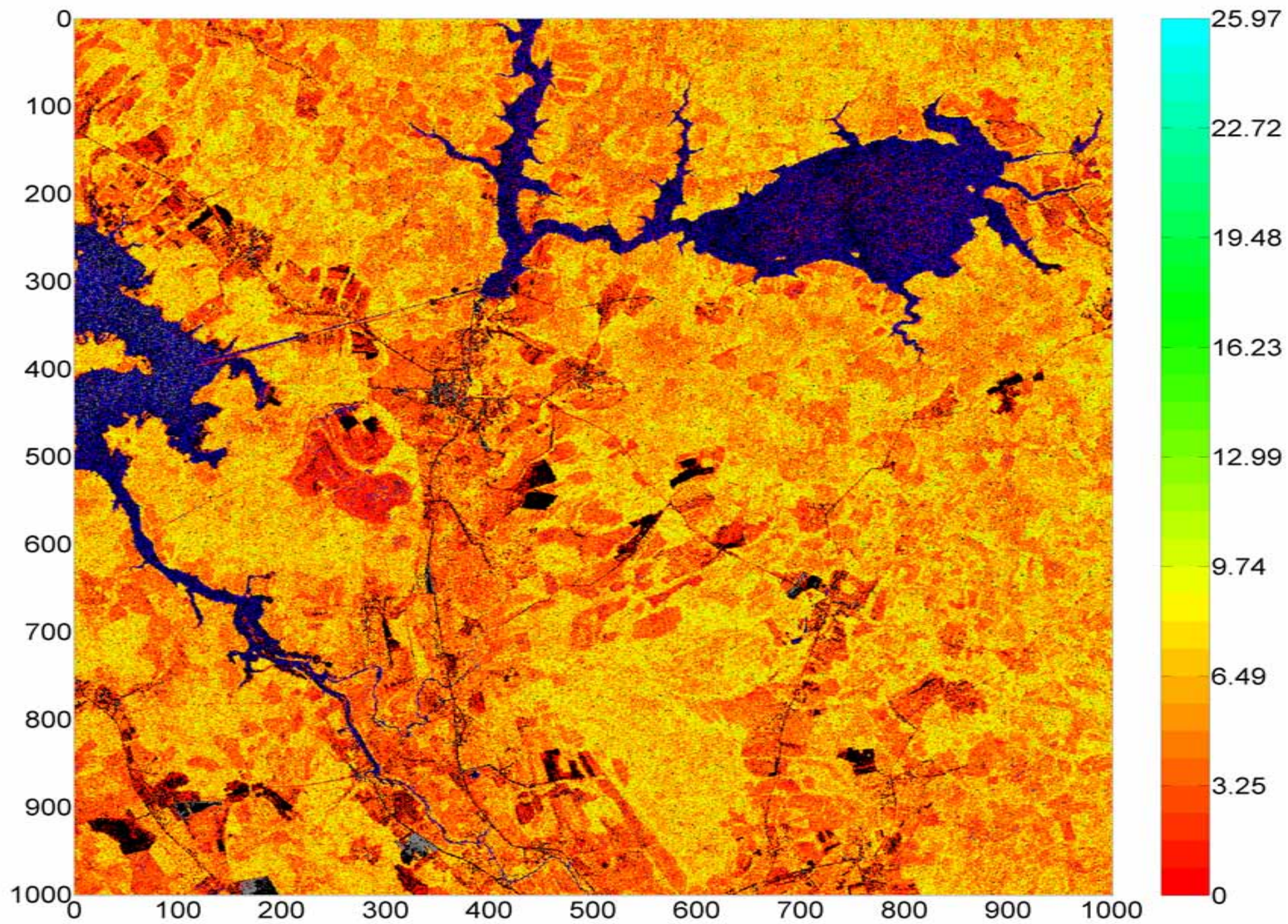


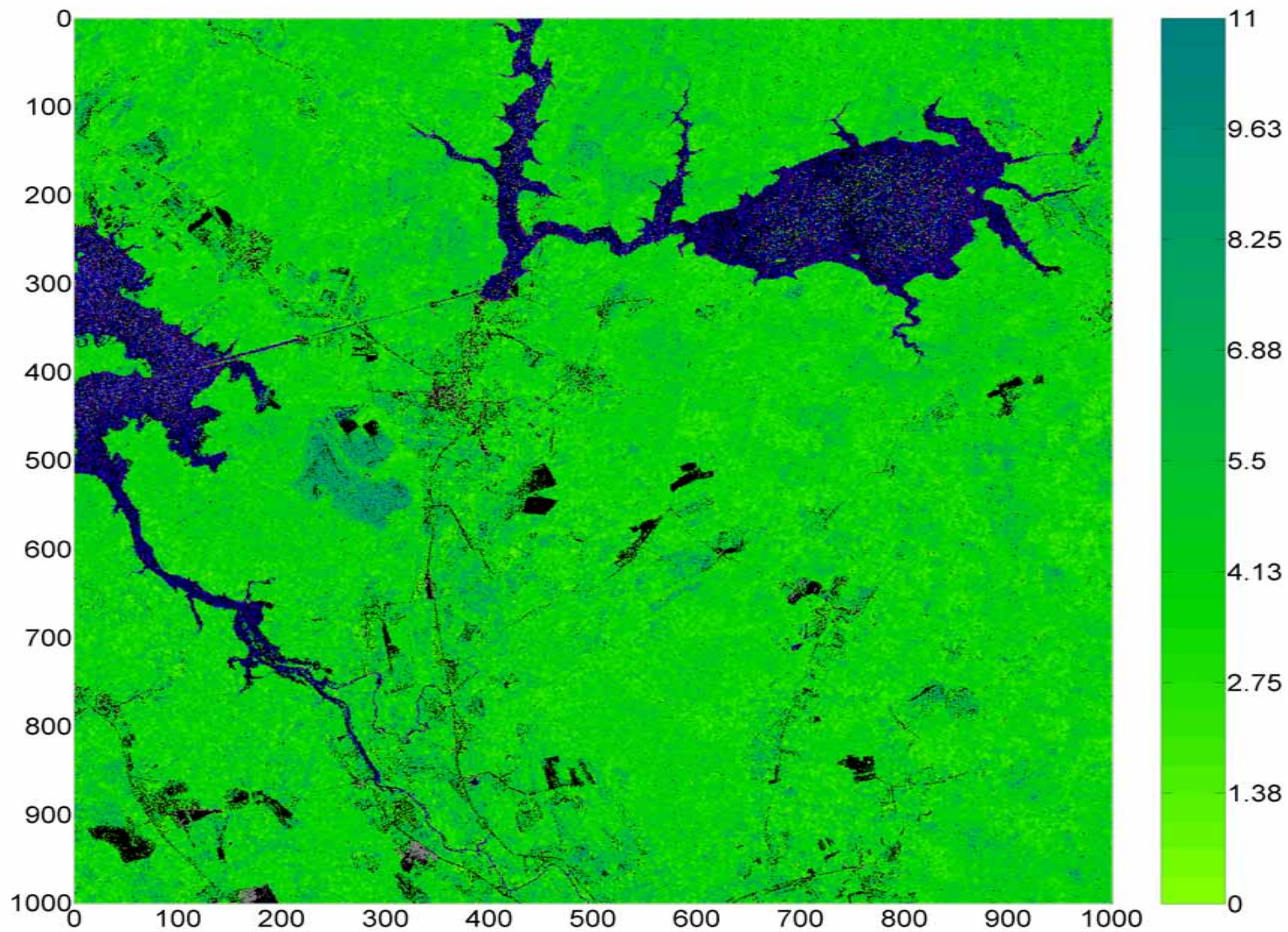


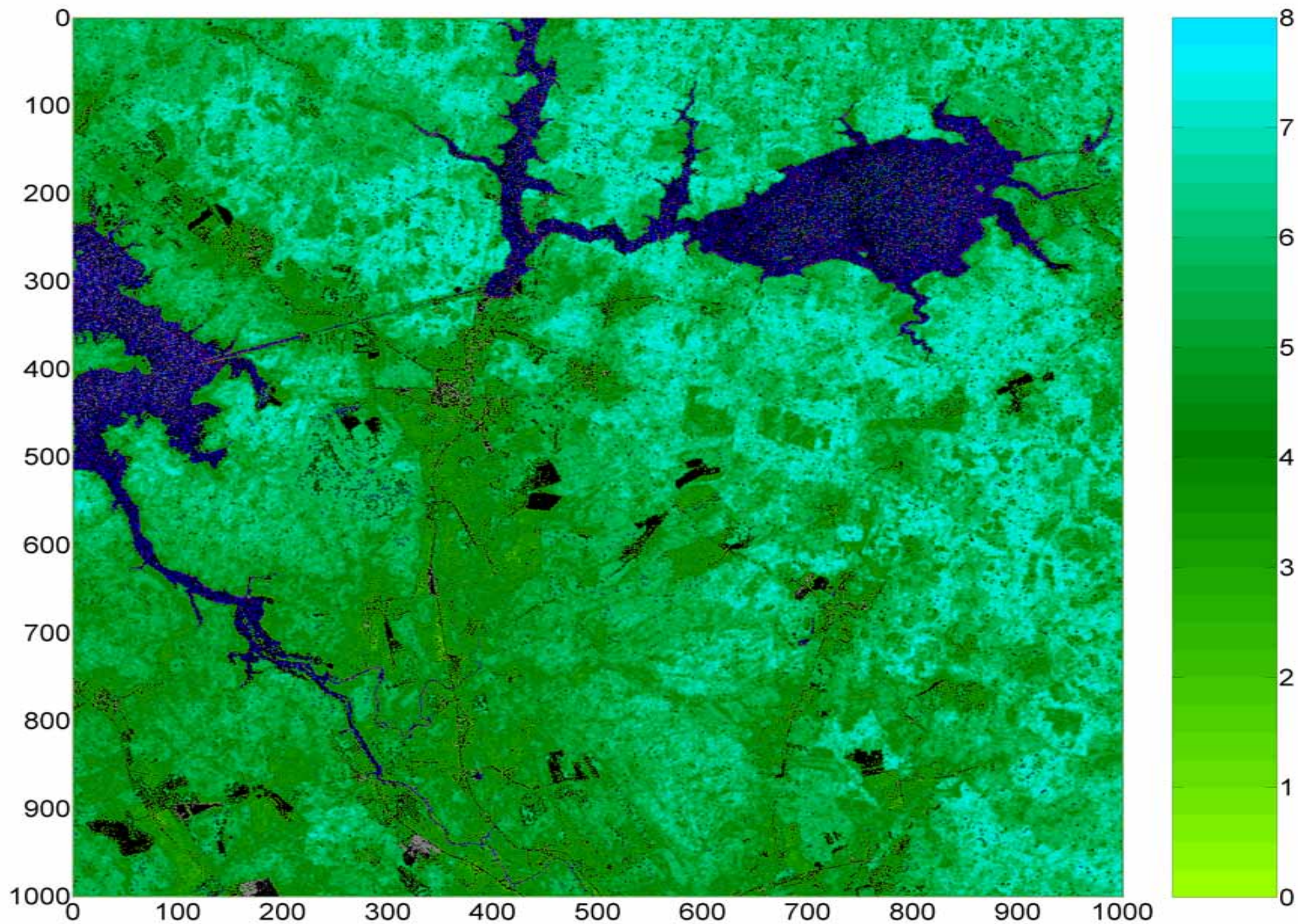


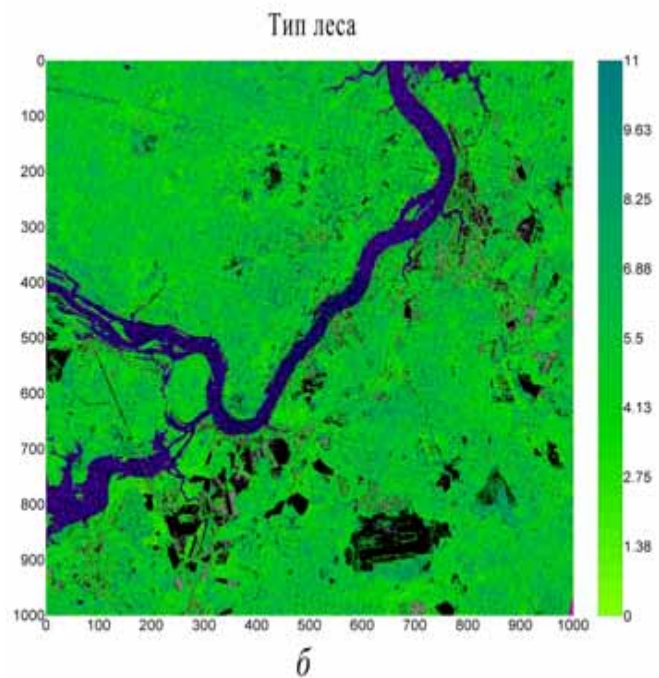
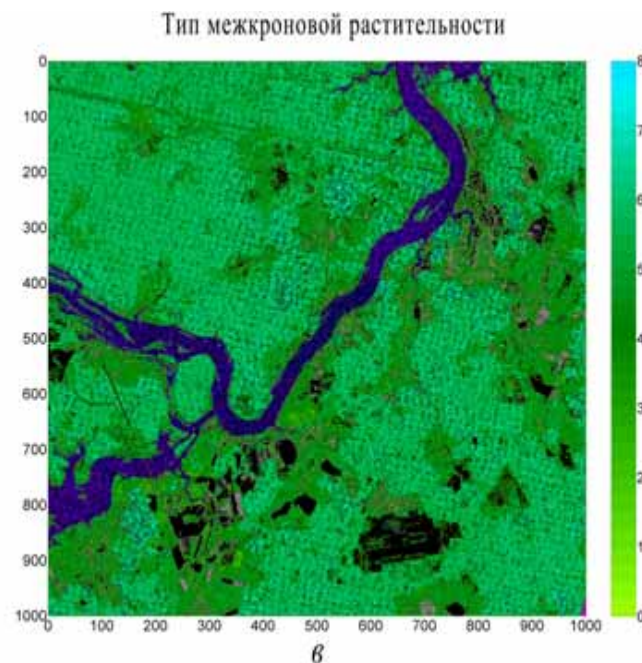
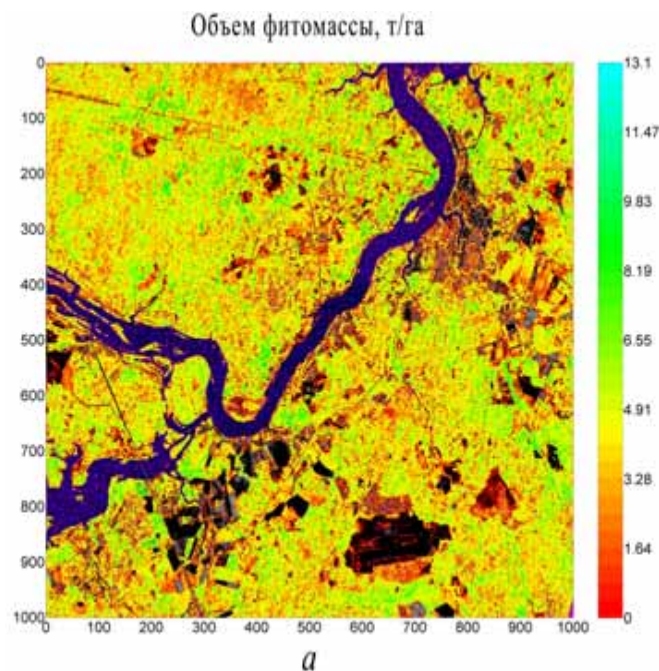






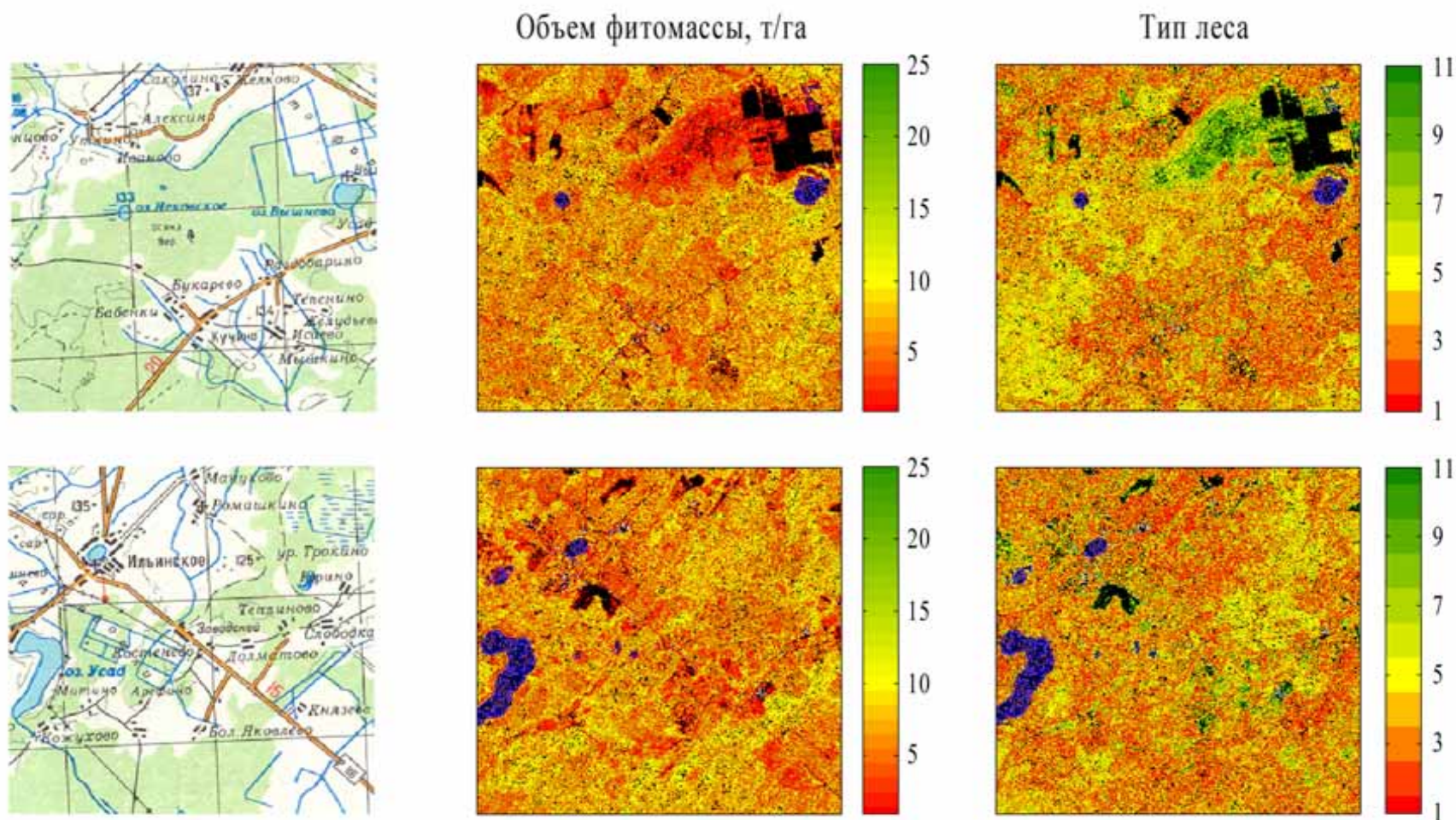




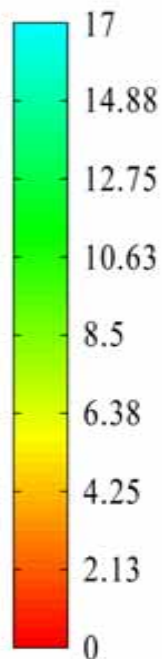
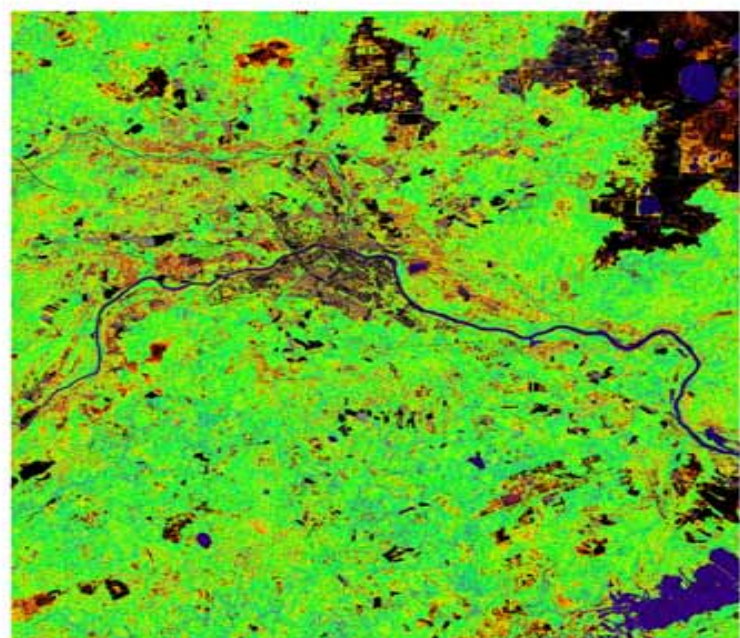
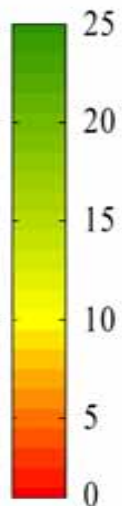
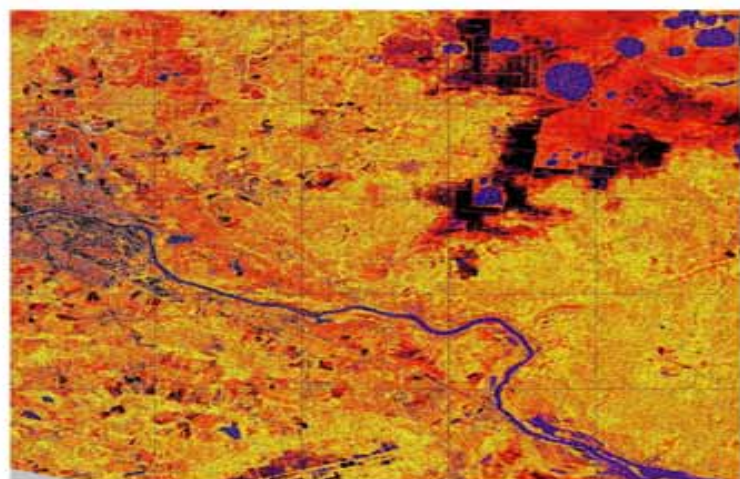


Отображение
одного из
фрагментов нижней
части изображения
в терминах объема
фитомассы
растительности (а),
типов лесной
растительности (б),
типов межкроновой
растительности (в)
и выбранная форма
представления
наблюдаемой
территории в
поисковой системе
Google (z)

Фрагменты топографической карты (слева) тех частей территории Тверской области, результаты обработки данных аппаратуры ЕТМ+ для которых представлены в центре (значения объема фитомассы растительности) и справа (породный состав лесной растительности)



Объем фитомассы, т/га



Особые
объекты

Облака

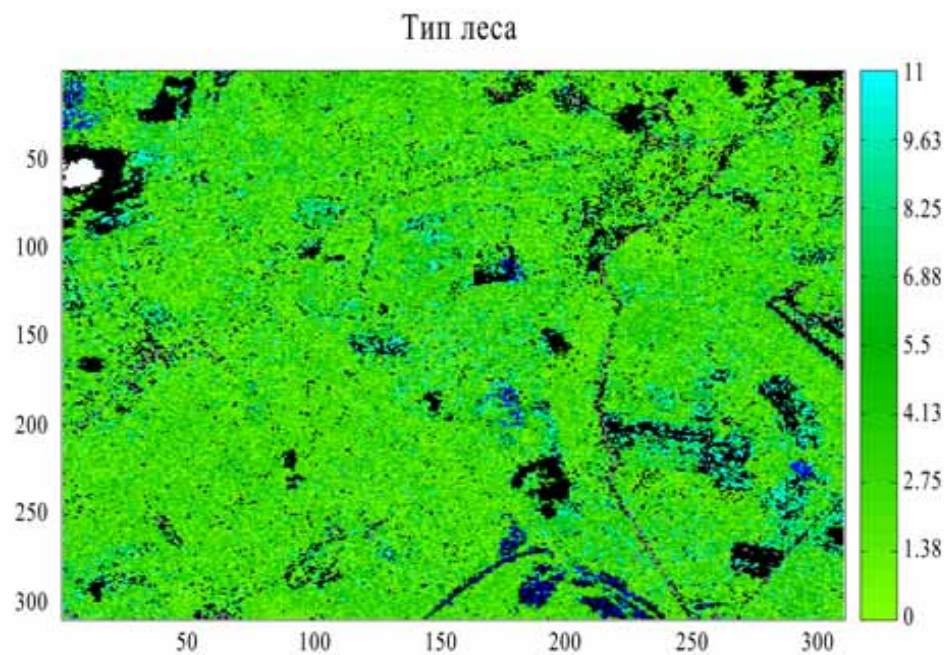
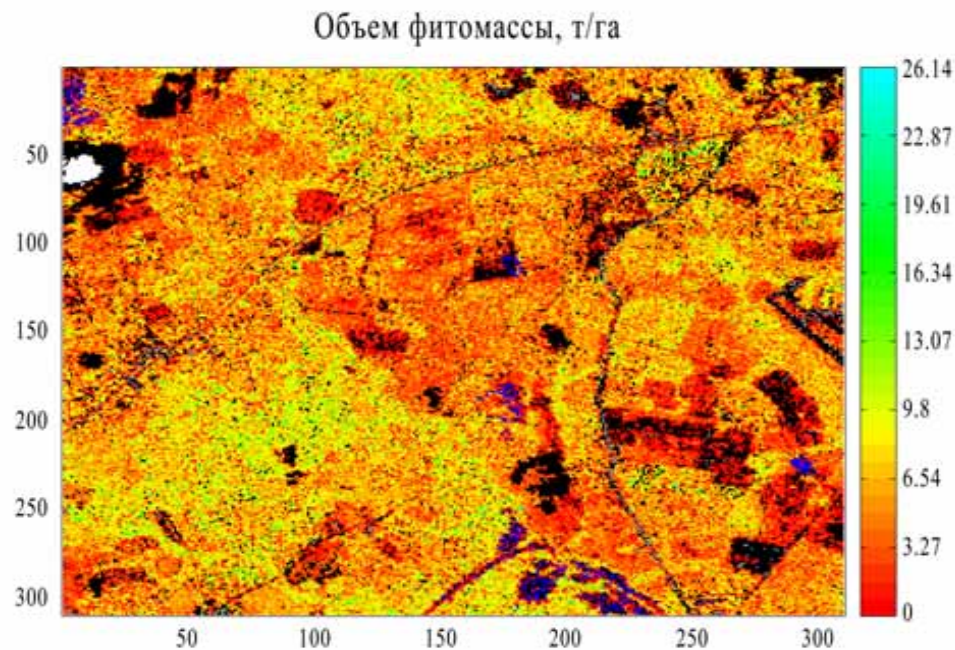
Вода

Почво-
грунты

Пропуски
в данных



**Результаты
восстановления
объема фитомассы
растительности для
одной и той части
территории Тверской
области для двух дат
съемки: 30.07.2001 –
вверху и 02.09.1999 –
внизу**



Особые объекты	Облака	Вода	Почво- грунты	Пропуски в данных
-------------------	--------	------	------------------	----------------------

**Результаты
классификации 6-
канального
изображения
аппаратуры ЕТМ+
размерностью 310 x 310
элементов разрешения
и оценки состояния
растительного покрова
выбранной
территории,
покрывающей часть
квадрата «ГЗ»**

Заключение

- Разработано алгоритмическое и программное обеспечение обработки данных аэрокосмических съемок, которое включает решение задач распознавания объектов природно-техногенной сферы и количественной оценки состояния различных типов растительности (лесной, болотно-луговой, сельскохозяйственной и др.)
- Программное обеспечение предназначено для обработки абсолютно калиброванных данных дистанционного аэрокосмического зондирования и ориентировано на использование высокопроизводительных многопроцессорных вычислительных систем
- Перспективы – в адаптации разработанного программного обеспечения для обработки данных гиперспектральных аэрокосмических измерений