

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗЛИЧНЫХ КАТЕГОРИЙ ЛЕСНЫХ ЗЕМЕЛЬ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЛЕСОВ

The spectral brightness dependences on wavelength from remote sensing for various wood grounds categories are submitted in this article. The spectral brightness correlation connections on a structure, age and completeness of stands are adduced also.

Дистанционные методы исследований основываются на измерении рассеянного и отраженного поверхностью Земли излучения в разных диапазонах электромагнитного спектра. Прежде чем использовать данные об излучении земных объектов, полученные из космоса, необходимо представить, каковы спектральные характеристики исследуемых объектов непосредственно у земной поверхности. Эти характеристики – важнейшие количественные показатели объектов, составляющие основной компонент в физических основах дистанционного зондирования.

Для каждого объекта земной поверхности характерна своя особая спектральная отражательная способность, что и обуславливает различия в их изображении на многозональных снимках, а количественное выражение яркости изображения объекта в различных спектральных зонах – спектральный образ объекта – может служить его дешифровочным признаком. Современные машинные алгоритмы обработки космических снимков основываются именно на использовании спектральных признаков.

Различия в спектральной яркости присущи не только разным типам растительности, но и растительности, в различной степени поврежденной неблагоприятными факторами окружающей среды. И если эти признаки будут известны, это должно дать ключ к распознаванию степени повреждения экосистем по космическим снимкам и обоснованию алгоритмов такого распознавания.

На основании изменения спектральных яркостей объектов в различных диапазонах электромагнитного излучения данные ДДЗ использовались при установлении связи между спектральными отражательными свойствами насаждений и их таксационной характеристикой.

Отражательные свойства природных и искусственных объектов можно достаточно полно описать с помощью коэффициентов спектральной яркости – КСЯ и их дешифровочных аналогов (КСП) – средних значений гистограмм распределения оптических плотностей изображений в определенных спектральных диапазонах. «КСЯ – это фотометрическая функция, характеризующая структуру отраженного поверхностью (объектом) излучения как по длинам волн  $\lambda$ , так и по условиям наблюдения и освещения». Условия наблюдения определяются надирным углом сканирования ( $\Theta$ ) и азимутальным углом между вертикалями сканирования и Солнца ( $\varphi_{\text{с}}$ ), который отсчитывается от направления на источник. Условия освещения определяются углом высоты Солнца и спектральной освещенностью объекта  $E_{\lambda}$  [1].

Для любого объекта, количество энергии, пропускаемой, поглощаемой или отражаемой, изменяется в зависимости от длины волны. Это важное свойство делает возможным идентификацию и классификацию различных объектов по их спектральным кривым. Примеры некоторых спектральных кривых приведены на рис. 1.

Например, на определенной длине волны почва отражает больше энергии, чем зеленая растительность, тогда как на другом участке спектра почва поглощает больше, чем растительность. Практически, это позволяет распознавать и классифицировать различные объекты на поверхности по их отличиям в отражательной способности в разных спектральных зонах.

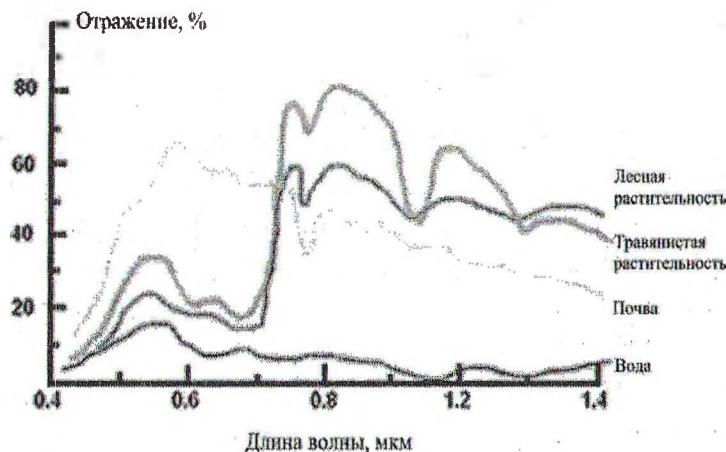


Рис. 1. Спектральные кривые

Разность отражательной способности объектов в различных спектральных диапазонах имеет неодинаковые оттенки цвета изображения на снимке. Анализ изображения показал, что одни объекты имеют в одном спектре более яркий контрастный цвет, а в другом менее насыщенный цвет.

Цвет также является наиболее информативным признаком дешифрирования спектрально-зональных космических снимков, передающий различия в спектральных яркостях лесных объектов. Если при дешифрировании аэроснимков его значение как признака для распознавания растительности возрастает с уменьшением их масштаба, то для спектрально-зональных космических снимков он является основным и предоставляет более 50% информации о лесной растительности. Очевидно, что дешифрирование породного состава лесов по материалам космической съемки возможно только на основе оценки различий в спектральных яркостях лесной растительности, а для этих целей используются спектрально-зональные или многозональные космические снимки.

С учетом спектрально-отражательных особенностей лесных объектов для выделенных классов были рассчитаны коэффициенты спектральной яркости в каждом спектральном диапазоне и коэффициент вегетационного индекса по космическим снимкам Meteor-3M, Landsat 7 ETM<sup>+</sup>, Terra (Aster).

Как показывает анализ спектральных кривых, наибольшие различия значений спектральной яркости лесных объектов наблюдаются в инфракрасной зоне. Значения уровня яркости выделяемых классов вырубок и пашни практически во всех спектральных каналах на порядок выше, чем у лесной растительности, что дает возможность без труда выделить их на снимке и отделить от лесных массивов.

По спектральным кривым, полученным по снимку Aster (рис. 2, а) для всех выделяемых классов хорошо виден красный минимум во втором канале (среднее значение длины волны 0,660 мкм). Для категорий лесных насаждений в среднем ИК диапазоне можно также наблюдать несколько минимумов в каналах 4 (1,65 мкм), 6 (2,205 мкм), 8 (2,33 мкм), и максимумы в каналах 5 (2,165 мкм) и 7 (2,26 мкм). Характерный максимум для лесной растительности представлен в ближнем ИК диапазоне (3 канал — 0,82 мкм). Для категорий вырубок и пашни данные максимумы и минимумы уровня яркости отсутствуют или слабо выражены.

По спектральным кривым, полученным по снимку Landsat (рис. 3, б), из-за меньшего числа спектральных каналов, для всех выделяемых классов можно наблюдать только два минимума уровня яркости в красной зоне (3 — 0,66 мкм) и в среднем ИК диапазоне (7 — 2,22 мкм), а также хорошо выражен максимум в ближнем ИК диапазоне (4 — 0,825 мкм).

Эти различия в спектральной яркости характеризуются различной поглощающей и отражающей способностью разных объектов.

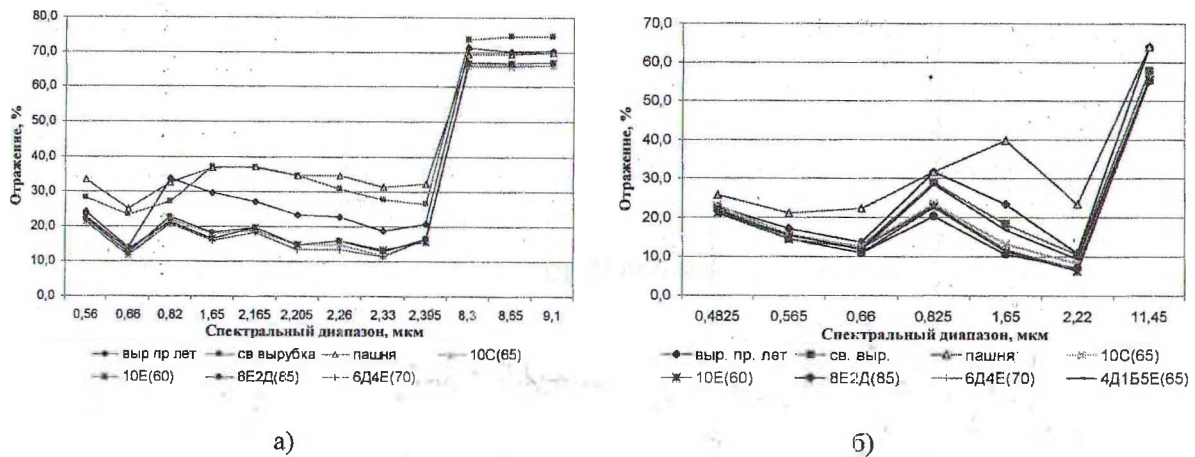


Рис. 2. Спектральные кривые различных категорий земель и насаждений по снимкам а) Aster, май 2002 г.; б) Landsat 7 ETM<sup>+</sup>, сентябрь 1999 г.

Для установления зависимостей спектрально-отражательных свойств лесной растительности от таксационных показателей насаждений были рассчитаны коэффициенты спектральной яркости, определенные для каждого канала по снимкам Метеор, Landsat и Aster.

По данным, полученным по снимку Метеор-3М от 3 июня 2002 года (рис. 3), видно, что наибольшие значения спектральной яркости в диапазоне 0,5–0,6 мкм наблюдаются для пашни – 0,604, немного ниже данный показатель для вырубок и несомкнувшихся лесных культур, который составляет 0,486–0,533, для насаждений в данном диапазоне коэффициент равен почти 0,4 и немного выше для категории болото – 0,428. Примерно такая же тенденция наблюдается в спектральном диапазоне 0,6–0,7 мкм. Но значения яркости в этом диапазоне ниже примерно на 0,15 для всех выделяемых классов. Наибольшие отличия в спектральных яркостях категорий лесных земель представлены в ИК диапазоне 0,8–0,9 мкм. Максимальные значения данного показателя соответственно 0,941 и 0,863 отмечаются для классов несомкнувшиеся лесные культуры и вырубки прошлых лет. Это, прежде всего, объясняется влиянием возобновления лиственной растительности и напочвенного покрова на вырубках и посадках, так как значения яркости для травянистой растительности немного выше, чем лесной. Ниже показатели яркости для классов березовые насаждения и болото и составляют соответственно 0,742 и 0,746. Самый низкий показатель яркости отмечается для чистых сосновых насаждений – 0,564.

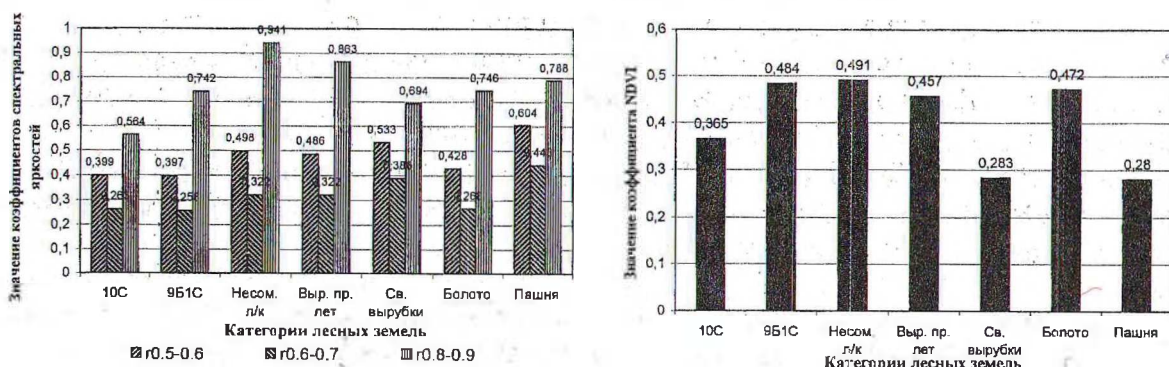


Рис. 3. Изменение спектральной яркости и NDVI в различных спектральных диапазонах по снимку Метеор-3М, 3 июня 2002 г.

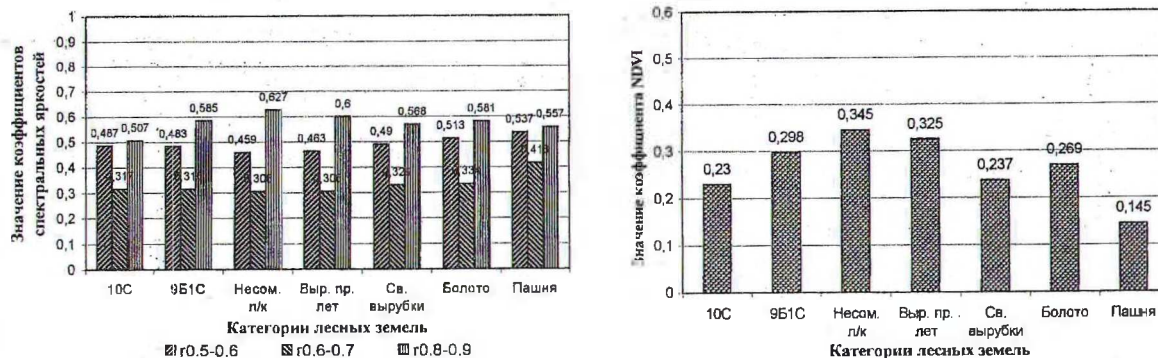


Рис. 4. Изменение спектральной яркости и NDVI в различных спектральных диапазонах по снимку Метеор-3М, 19 августа 2002 г.

Анализ данных, полученных по снимку Метеор-3М за 19 августа 2002 года (рис. 4), показывает значительные изменения спектральной яркости выделяемых классов в разных спектральных зонах. Так, для категорий чистых сосновых и березовых насаждений значение яркости в диапазоне 0,5–0,6 мкм возросло до 0,487 и 0,483 соответственно, для категорий несомкнувшиеся лесные культуры и вырубки значение яркости уменьшилось, для категории болото показатель увеличился с 0,428 до 0,513, а для категории пашня – уменьшился с 0,604 до 0,527.

Подобная закономерность отмечается и в диапазоне 0,6–0,7 мкм. Большие отличия в значениях спектральной яркости наблюдаются в ближнем ИК диапазоне (0,8–0,9 мкм). Для всех выделяемых классов уровень яркости в этом диапазоне на снимке за 19 августа 2002 года ниже, чем на снимке от 3 июня 2002 года. Минимальные отличия в яркости отмечаются для класса чистые сосновые насаждения, где показатель уменьшился с 0,564 до 0,507. Наибольшие отличия – для класса несомкнувшиеся лесные культуры, с 0,941 до 0,627. Для других классов показатель яркости на разновременных снимках отличается примерно на 0,13–0,26.

По значениям спектральной яркости в красном и ближнем инфракрасном диапазоне для каждого выделяемого класса были рассчитаны коэффициенты вегетационного индекса, представленные на рис. 3, 4. Как видно на рис. 4, наименьшие значения вегетационного индекса (NDVI) представлены для классов свежие вырубки и пашня (0,283 и 0,28). Для классов березовые насаждения, несомкнувшиеся лесные культуры, вырубки прошлых лет и болото значение NDVI колеблется от 0,457 до 0,491, для класса чистые сосновые насаждения оно равно 0,365. Как видно на рис. 4, можно представить ряд, в котором значения NDVI будут расположены в последовательном возрастании, – это пашня (0,145), чистые сосновые насаждения (0,23), свежие вырубки (0,237), болото (0,269), березовые насаждения (0,298), вырубки прошлых лет (0,325) и несомкнувшиеся лесные культуры (0,345). Отметим также, что значения индекса, полученные на снимке за 19 августа, ниже, чем на снимке за 3 июня 2002 года.

Для установления зависимостей изменения уровня спектральной яркости от таксационных показателей (состав, возраст, полнота) на снимках Метеор был определен уровень яркости для каждого канала.

Как видно на рис. 5, уровень яркости с изменением состава насаждения от чистых сосновых древостоев до чистых березовых в диапазоне 0,5–0,6 мкм практически не меняется и составляет на снимке Метеор от 3 июня 2002 года примерно 0,4. Также не меняется уровень яркости в диапазоне 0,6–0,7 мкм и составляет около 0,26. И только в ближнем инфракрасном диапазоне с увеличением в составе древостоев лиственных пород наблюдается линейная зависимость увеличения уровня спектральной яркости, показатель которой изменяется от 0,56 в чистых сосновых насаждениях до 0,64 при наличии в составе соснового насаждения 4 единиц березы, и увеличивается до 0,77 в чистых березовых (черноольховых) древостоев.

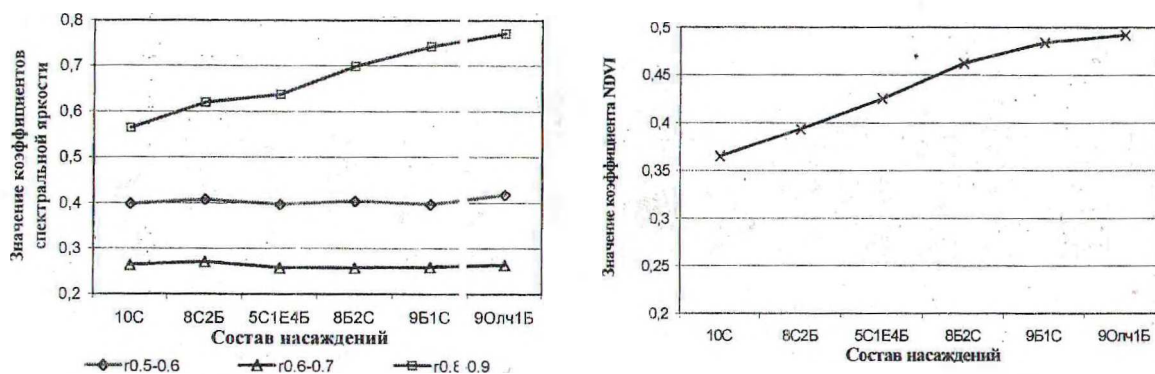


Рис. 5. Зависимость изменения спектральной яркости и NDVI от состава насаждения по снимку Метер-3М, 3 июня 2002 г.

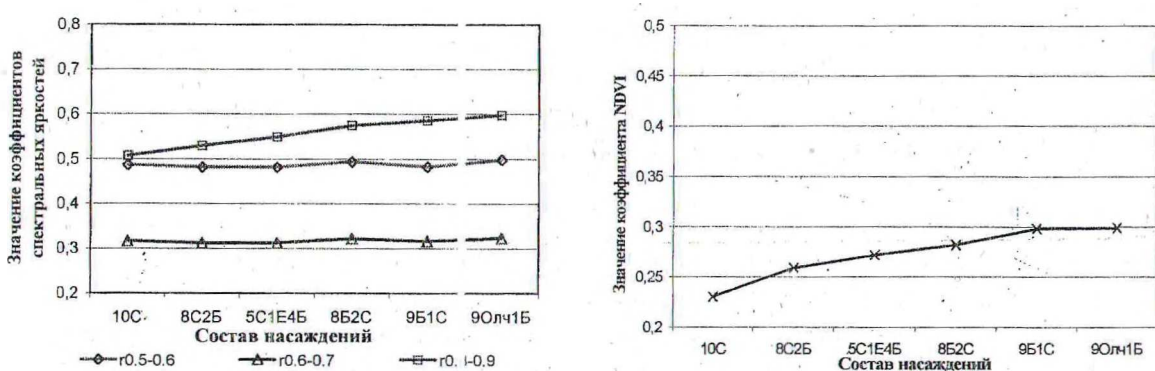


Рис. 6. Зависимость изменения спектральной яркости и NDVI от состава насаждения по снимку Метер-3М, 19 августа 2002 г.

Можно наблюдать, что на августовском снимке Метеор-3М значение спектральной яркости с изменением состава насаждений также остается неизменным в диапазонах 0,5–0,6 и 0,6–0,7 мкм (рис. 6), но отметим, что уровень яркости увеличился и составил 0,49 и 0,32 соответственно. Как и на июньском снимке, в ближнем ИК диапазоне можно заметить закономерность увеличения уровня спектральной яркости с увеличением в составе лиственных пород. Так, для чистых сосновых насаждений (10С) показатель яркости составлял 0,5 и постепенно возрастал до 0,6 для березовых и черноольховых древостоев (9Б1С и 90лч1Б).

Характерные зависимости с изменением состава насаждения наблюдаются также по коэффициентам вегетационного индекса (рис. 5, 6). На июньском снимке коэффициент NDVI растет с 0,36 до 0,49, а на августовском – с 0,23 до 0,30 при увеличении в составе лиственных пород.

Для установления связи изменения спектральной яркости с возрастом были выбраны участки соснового древостоя I–II класса бонитета мшистого типа леса с полнотой 0,7–0,8, но различного возраста.

Как видно из рис. 7, в диапазоне 0,8–0,9 мкм с увеличением возраста насаждения увеличивается уровень яркости (на снимке, полученном в начале июня месяца). На снимке, полученном в конце августа, подобная зависимость в этом диапазоне не наблюдается, разве только можно отметить, что уровень яркости немного выше в средневозрастных древостоях, чем в молодняках и приспевающих (рис. 9). Нужно заметить, что для диапазонов 0,5–0,6 и 0,6–0,7 мкм уровень яркости практически не меняется с возрастом, но уровень яркости увеличен на августовском снимке и составляет 0,50 и 0,32 по сравнению с июньским 0,40 и 0,27 для соответствующего канала.

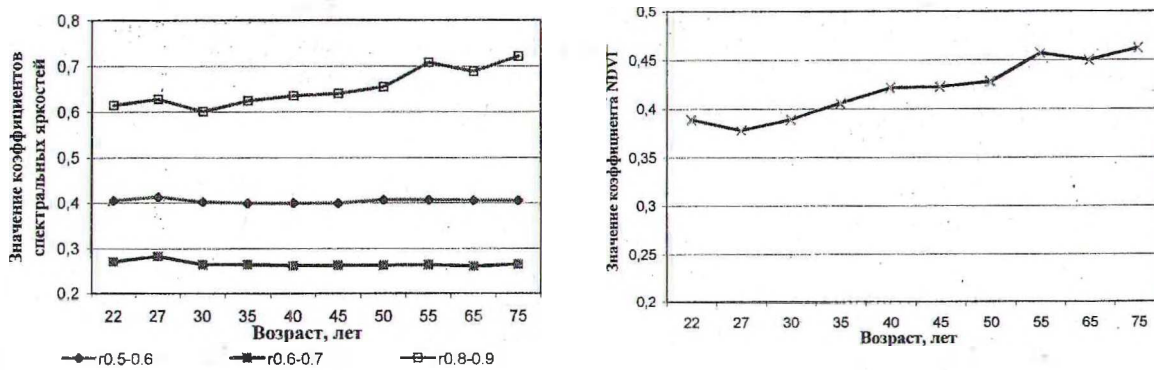


Рис. 7. Зависимость изменения спектральной яркости и NDVI от возраста древостоя по снимку Метер-3М, 3 июня 2002 г.

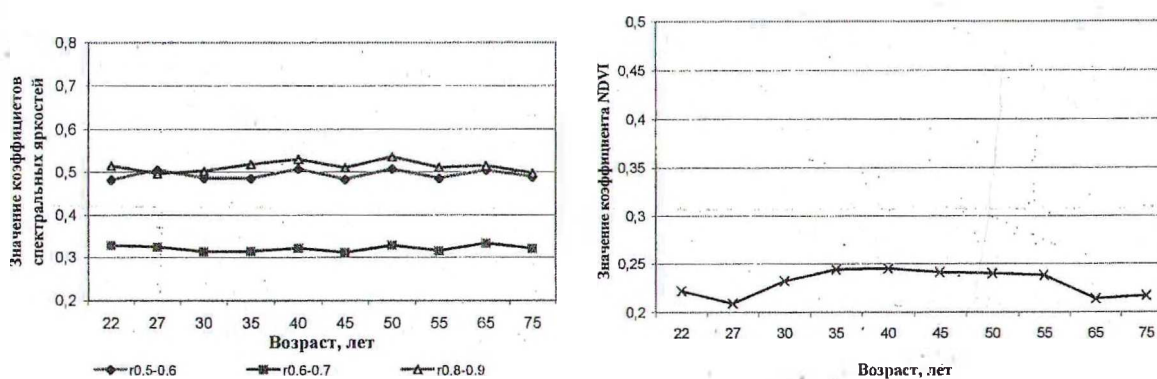


Рис. 8. Зависимость изменения спектральной яркости и NDVI от возраста древостоя по снимку Метер-3М, 19 августа 2002 г.

Анализируя данные по значениям коэффициентов вегетационного индекса с изменением возраста (рис. 7, 8), видим, что данный показатель характеризуется той же линейной закономерностью, что и изменение значений спектральной яркости в инфракрасном диапазоне.

Полученные результаты изменения спектральной яркости от полноты насаждения показали слабую корреляционную зависимость. Но отметим, что наблюдается значительные изменения яркости от полноты на одновременных снимках. Видно, что если спектральная яркость на снимке, полученном в июне, имеет значение в диапазоне 0,5–0,6 мкм примерно 0,4, а в диапазоне 0,8–0,9 мкм изменяется от 0,6 до 0,65, то на снимке, полученном в августе в этих двух диапазонах яркость практически одинакова и имеет значение 0,50–0,52. Для зависимости коэффициентов NDVI с изменением полноты необходимо отметить, что они снижаются с 0,38–0,43 по данным, полученным на снимке Метер-3М от 3 июня, до 0,20–0,23 по данным, полученным на снимке от 19 августа 2002 года.

Выявлено, что спектральные характеристики многих растений изменяются в течение периода вегетации. Немаловажно и то, что различия спектральных характеристик определенных растений в одни сезоны года более четкие, чем в другие. В целом изменения спектральных характеристик у хвойных деревьев в вегетационный период выражены менее четко, чем у лиственных.

По данным Landsat и Terra (Aster) получена аналогичная зависимость между коэффициентами спектральной яркости и коэффициентом вегетационного индекса с таксаци-

онными характеристиками лесных насаждений.

Все это объясняется различной поглощающей и отражающей способностью лесных объектов. Подобные результаты были получены многими исследователями при определении зависимостей спектрально-отражательных характеристик лесной растительности [2], которые отмечают важность использования уровней спектральных яркостей при тематической классификации лесных объектов.

По анализу коэффициентов спектральных яркостей различных классов объекта можно установить характерные различия в спектральных зонах из снимков, полученных в разный вегетационный период. Спектры отражения совокупностей крон деревьев различных пород формируются объектами отражения, поглощения и рассеяния лучистой энергии, заполняющими полог и, отчасти, подпологовые ярусы.

Результаты данного исследования показывают, что разные виды древесной растительности имеют сходные кривые КСП и отличаются только уровнями и максимальными значениями коэффициентов в зеленой и БИК зонах. В условиях нормальной и наибольшей сомкнутости крон КСП лиственных пород существенно выше, чем хвойных.

Отметим, что традиционные методы классификации, дешифрирования и интерпретации космоснимков не в состоянии решить все проблемы информационного обеспечения устройства и инвентаризации лесов. Использование коэффициентов спектральной оптической плотности несколько повышает дешифрируемость космоизображений, но определение многих таксационных показателей насаждений остается за пределами возможности метода.

Основная сложность с распознаванием и оценкой насаждений по космоизображениям состоит в том, что одинаковые изменения спектральной яркости древостоев могут вызываться разными причинами. Опыт аналитического и компьютерного дешифрирования космических снимков показывает, что основными факторами, определяющими особенности изображения, являются не столько таксационные показатели древостоев, сколько биофизические параметры ландшафтов – крутизна и экспозиция склонов, состав напочвенного покрова, характеристика и влажность почв и т. п. [1].

Практическим выходом из данного положения является использование не характеристик спектральной яркости насаждений, а спектральных индексов растительности. Использованию спектральных индексов растительного покрова способствует простота их вычисления и применения. Более того, их можно эмпирически связать с таксационными показателями дешифрируемых древостоев и значительно уменьшить ошибки дешифрирования, возникающие при использовании коэффициентов спектральной яркости и спектральной оптической плотности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Любимов А. В., Ксенофонтов Н. И., Колесников Ю. Е. Геоинформационные системы в отраслях лесного комплекса и охране природы. Дешифрирование и интерпретация материалов аэрокосмических съемок для совершенствования инвентаризации особо охраняемых лесов. – СПб.: ЛТА, 2001. – 179 с.
2. Экология Севера: дистанционные методы изучения нарушенных экосистем (на примере Кольского полуострова) / Коллект. монография под ред. А.П. Капицы и У.Г. Риса. – М.: Научный мир, 2003. – 248 с.