



МЕТОДИЧЕСКОЕ
ПОСОБИЕ

RUS

2011

Supported by:



Federal Ministry for the
Environment, Nature Conservation
and Nuclear Safety

based on a decision of the Parliament
of the Federal Republic of Germany



GERMANY'S
CLIMATE
INITIATIVE



Лабутина И.А., Балдина Е.А.

Использование данных дистанционного зондирования для мониторинга экосистем ООПТ

Методическое пособие



Проект ПРООН / ГЭФ / МКИ
СОХРАНЕНИЕ БИОРАЗНООБРАЗИЯ В РОССИЙСКОЙ ЧАСТИ
АЛТАЕ-САЯНСКОГО ЭКОРЕГИОНА

Лабутина И.А., Балдина Е.А.

Использование данных дистанционного зондирования для мониторинга экосистем ООПТ

Методическое пособие

WWF России

Москва • 2011

Авторы: *Лабутина И.А., Балдина Е.А.*

Рецензенты: *Е.Б. Цыбикова, И.В. Глушков, Е.С. Есипова*
(Некоммерческое партнерство «Прозрачный мир»)

**Использование данных дистанционного зондирования
для мониторинга экосистем ООПТ.**

Методическое пособие / Лабутина И.А., Балдина Е.А.;

Всемирный фонд дикой природы (WWF России). Проект ПРООН/ГЭФ/МКИ
«Сохранение биоразнообразия в российской части Алтае-Саянского
экорегiona» – М., 2011. – 88 с.

В методическом пособии кратко охарактеризовано современное состояние космических съемок, применимых для мониторинга на локальном уровне наблюдений; рассмотрены вопросы формирования базового аэрокосмического блока как начального уровня отсчета наблюдений на основе общедоступного программного обеспечения. Особое внимание уделено факторам, влияющим на формирование аэрокосмического изображения, дешифровочным признакам, особенностям визуального и компьютерного дешифрирования, вопросам использования разновременных снимков при изучении динамики природных объектов. Приведены примеры использования данных дистанционного зондирования для целей мониторинга в разных типах экосистем, имеющих преимущественное распространение в Алтае-Саянском регионе.

Пособие предназначено для специалистов-природоведов, применяющих в своих исследованиях космические снимки.

Авторы благодарят *Д.Л. Луговую* (WWF России) и *Т.В. Яшину* (Катунский государственный заповедник) за активную поддержку в подготовке данного издания.

Редактор: *Е.А. Воронкова*

Дизайн, верстка: *А.Ю. Филиппов*

Фотография на 1 стр. обложки: © *Hartmuth Jungius* / WWF-Canon

Фотография на 4 стр. обложки: © *Леонид Круглов* / WWF России

Издание осуществлено при финансовой поддержке проекта ПРООН/ГЭФ/МКИ «Сохранение биоразнообразия в российской части Алтае-Саянского экорегiona».

Программа развития Организации Объединенных Наций (ПРООН) является глобальной сетью ООН в области развития, выступающей за позитивные изменения в жизни людей путем предоставления доступа к источникам знаний, опыта и ресурсов.

Мнение авторов публикации не обязательно отражает точку зрения, заявляемую в ПРООН, в учреждениях системы ООН и организациях, сотрудниками которых являются авторы.

Издание является некоммерческим и распространяется бесплатно.

© UNDP 2011

© WWF 2011

Все права защищены

Содержание

Введение	4
1. Современное состояние космических съемок, применимых для мониторинга на локальном уровне наблюдений	5
2. Создание аэрокосмического блока системы наблюдений	8
2.1. Выбор материалов космических съемок	8
2.2. Выбор системы координат	13
2.3. Выбор программных пакетов	14
2.4. Формирование базовых данных как уровня отсчета наблюдений	21
3. Методы обработки космических снимков	24
3.1. Визуальное дешифрирование	25
3.2. Автоматизированное (компьютерное) дешифрирование	32
3.3. Геометрические преобразования цифровых снимков	37
4. Методика выявления изменений по снимкам	40
Изображения (рис. 1-16)	45
5. Примеры использования ДДЗ для целей мониторинга в разных типах экосистем	57
Заключение	73
Рекомендуемая учебная литература	74
Интернет-сайты	75
Используемая литература	76
Приложение 1. Основные характеристики доступных в настоящее время данных дистанционного зондирования из космоса	79
Приложение 2. Примерная стоимость некоторых снимков высокого пространственного разрешения	84
Приложение 3. Интернет-каталоги космических снимков	85

Введение

Мониторинг окружающей среды — это комплексная система наблюдений за состоянием окружающей среды, оценки и прогноза изменений ее состояния под воздействием природных и антропогенных факторов. Мониторинг предполагает процесс систематического или непрерывного сбора информации о параметрах окружающей среды для определения тенденций их изменения. Мониторинг можно проводить с помощью сети стационарных пунктов, однако наблюдения на отдельных точках или профилях не всегда отражают пространственные изменения. Поэтому использование аэро- и космических снимков (данных дистанционного зондирования Земли – ДДЗ) является необходимым условием проведения регулярных наблюдений за современным состоянием экосистем. Сравнение их с результатами съемок, выполненных в прошлые десятилетия, позволяет точно зафиксировать произошедшие изменения.

Давно и неоднократно было показано, что использование оперативной глобальной космической информации позволяет успешно осуществлять мониторинг как быстро протекающих (пожары, наводнения и т. п.), так и протекающих достаточно медленно процессов (зарастание вырубок и гарей, пересыхание водоемов и т. п.), охватывающих большие территории. Географические исследования локального уровня, в первую очередь на особо охраняемых природных территориях (ООПТ), где они имеют целью выявление и оценку происходящих изменений, также опираются на ДДЗ.

Успех использования разновременных, разнотипных, с разной степенью детальности съемочных данных, а также всех доступных картографических материалов, зависит от привлечения современных геоинформационных технологий. Целесообразно создавать геоинформационные системы локального уровня, которые могут объединить подробные тематические и общегеографические данные, материалы аэро- и космических съемок разных лет, результаты стационарных наблюдений на тестовых площадках и другие дополнительные данные, имеющиеся на изучаемом участке ООПТ.

1 Современное состояние космических съемок, применимых для мониторинга на локальном уровне наблюдений

Фонд космических съемок в настоящее время обширный и включает материалы, полученные съемочными системами разных типов – сканерными (многозональными, панхроматическими), радиолокационными (на разных длинах волн, при разной поляризации сигнала) и фотографическими (черно-белыми, цветными, спектрозональными и многозональными) в разных участках электромагнитного спектра (табл. 1), с разным пространственным (от 0,4 м до нескольких километров) и радиометрическим разрешением (8,11,12,16 бит/пиксел).

Таблица 1

Участки спектра электромагнитных колебаний, в которых ведется съемка

Участок спектра	Интервал длин волн	Регистрируемое излучение
Видимый	0,40–0,69 мкм	Отраженное солнечное излучение
Ближний инфракрасный	0,70–1,3 мкм	
Средний инфракрасный	1,4–3,0 мкм	
Тепловой инфракрасный	3,0–1000 мкм	Тепловое излучение земной поверхности
Радио	1мм–десятки метров	Излучение земной поверхности Искусственное излучение (радиолокация)

В настоящее время съемку Земли из космоса ведут более 50 оптико-электронных и радарных космических аппаратов, принадлежащих двум десяткам стран, в том числе спутники новейшего поколения. По сравнению с архивными материалами параметры съемочных данных существенно изменились. Во-первых, достижения в области волоконной оптики сделали возможным значительное улучшение пространственного разрешения оптико-электронных съемочных систем, что повлекло за собой широкое распространение материалов метрового и субметрового разрешения в видимом и ближнем ИК участках спектра. Сейчас на рынке широко распространены снимки с пространственным разрешением 0,4–2,5 м в панхроматическом ва-

рианте и 1,5–4 м – в многозональном, а в ближайшие годы появляются съемочные системы с разрешением 0,25 м. При этом неизбежно малый угол захвата компенсируется наклоном камеры. Во-вторых, изменилось спектральное разрешение: вместо 3–4 каналов современные многозональные системы ведут съемку в 8, 14, 36 каналах, а современные спектрометры выполняют гиперспектральную съемку в 200 и более каналах. В-третьих, произошло увеличение радиометрического разрешения: весь интервал яркостей при съемке разбивается не на 256 ступеней (8 бит/пиксел), а, например, на 2048 (11 бит/пиксел), что существенно повышает качество снимков, особенно панхроматических, т.е. черно-белых. Тенденция последних лет – обеспечение съемки в стереорежиме, которую реализуют разными способами: с разных витков, с одного витка двумя съемочными системами или изменением наклона одной, с двух спутников в тандеме, снимающих почти синхронно. Наиболее полный список, позволяющий получить сравнительную характеристику основных параметров действующих в настоящее время систем получения данных о земной поверхности из космоса, приведен в Приложении 1 и на сайте <http://www.scanex.ru/ru/data/comparsion.asp>.

Снимки с пространственным разрешением 10 и менее метров распространяются по достаточно высоким ценам, по данным 2010 г. в среднем примерно 15–30 у.е. за 1 км², при минимальной площади заказа 25 км². Точная стоимость материалов съемки определяется фирмой-поставщиком данных на момент заказа (Приложение 2).

Геопорталы (Google Earth, Yandex, Космоснимки и другие) не так давно появившиеся, но получившие исключительно широкую известность, обеспечивают пользователей космической информацией с разрешением 0,6–30 м, обновляемой не реже, чем через 2–3 года. Технологии геопорталов получают распространение при отображении оперативной информации, особенно мониторинга пожароопасности: например, портал Минприроды и экологии РФ по оперативному выявлению возгораний на ООПТ федерального значения России (<http://fires.rfimnr.ru/api/index.html>), пожарный сервис, организованный фирмой СканЭкс (SFMS http://www.scanex.ru/ru/news/News_Preview.asp?id=n23810191), пожарный сервис Иркутского центра приема оперативной информации (FIRMS <http://msk.eostation.ru/index.html> и <http://eostation.irk.ru/>) и др. Геопорталы используются и поставщиками данных дистанционного зондирования в качестве про-

пространственной основы для поиска и заказа космической информации, например Космоснимки (<http://kosmosnimki.ru/>), портал СканЭкс, (<http://geoportal.ntsomz.ru/>), геопортал Роскосмоса.

В последние годы оригинальные снимки (включающие все съемочные каналы) высокого (15–30 м) Landsat, ASTER и др., а также низкого разрешения с пространственной привязкой по орбитальным данным стали доступны через Интернет – <http://earthexplorer.usgs.gov> (или более новый портал обращения к той же базе, использующий технологию Java – <http://glovis.usgs.gov>, откуда доступны также снимки радиометра ASTER). Для доступа на любой из этих порталов необходима регистрация. Адреса других каталогов разнообразных типов снимков различного разрешения (по О.В. Тутубалиной, 2009, ссылки актуализированы на 2011) приведены в Приложении 3.

2 Создание аэрокосмического блока системы наблюдений

Проведению мониторинговых наблюдений предшествует предварительный этап, он включает выбор материалов космических съемок, системы координат, программных пакетов, формирование базовых данных.

2.1. Выбор материалов космических съемок

Основными характеристиками материалов дистанционного зондирования являются масштаб, или пространственное разрешение снимков, т.е. детальность изображения, их тип (черно-белые, цветные, многозональные, в видимом, инфракрасном или радио диапазонах спектра электромагнитных колебаний), сезон и время съемки. Выбор снимков с определенными характеристиками зависит в решающей степени от цели исследований и свойств территории, которую предстоит изучать.

Пространственное разрешение. Часто пользователи стремятся выбрать снимки с максимальной детальностью, хотя это не всегда оправданно. Выбор детальности снимков зависит от цели исследований и географических особенностей объекта наблюдений. Важно иметь в виду по крайней мере три обстоятельства. Первое – это минимальный размер объектов, которые предполагается дешифровать и/или отобразить на карте в соответствии с масштабом, в котором она будет составляться. В большинстве случаев приходится ориентироваться не только на размер объектов, являющихся предметом наблюдений, но и на более мелкие объекты, поскольку они могут дать дополнительную информацию при распознавании. Второе – выраженность, четкость границ дешифрируемых объектов: чем более четкие границы имеют объекты, тем более детальное изображение можно использовать. В то же время нет смысла использовать очень детальные снимки для дешифрирования объектов с плохо выраженными, в виде переходной полосы, границами. Известно, что такие границы становятся более четкими по мере уменьшения масштаба. Например, не имеет смысла дешифровать границу снежного покрова или поверхностных морен на леднике по снимкам сверхвысокого разрешения (менее 2 м), поскольку они не имеют четкой границы.

Третье – интервал повторных наблюдений. В общем случае для выявления сезонных изменений нужны снимки более высокого разрешения, чем для выявления долговременных изменений.

При выборе пространственного разрешения снимков горной территории важно учитывать точность и детальность цифровой модели рельефа (ЦМР). На таких снимках, независимо от технологии съемки, возникают существенные геометрические смещения, так называемые искажения за рельеф, поэтому необходимо выполнять ортотрансформирование. Ортопреобразование материалов съемки выполняется с использованием ЦМР, размер пиксела и точность по высоте которой нужно учитывать при выборе пространственного разрешения снимка. Если ЦМР имеет детальность регулярной сетки (пиксела) 90 м и относительную точность по высоте 10 м, то для наблюдений за изменениями в положении конца ледника целесообразно использовать космические снимки с размером пиксела от 1–5 м, а если ЦМР построена по топографической карте с сечением рельефа горизонталями через 100 м, то с более низким разрешением.

Участок спектра электромагнитных колебаний. Как правило, основной объем информации при проведении мониторинговых наблюдений дают снимки в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра, а материалы съемок в инфракрасном тепловом и радиодиапазонах могут предоставить дополнительные данные. Вследствие различий в спектральных свойствах объекты земной поверхности за редким исключением лучше распознаются на многозональных снимках – цветном синтезированном или отдельных зональных. Принцип многозональной съемки, т.е. одновременной съемки в нескольких каналах, фиксирующих излучение в разных участках спектра, основывается на различиях в спектральной яркости объектов.

Спектральные свойства объектов земной поверхности чрезвычайно многообразны, но при этом оказалось, что некоторые их типичные особенности связаны с определенными классами объектов. По виду кривой спектральной яркости выделяют классы: горные породы и почвы, растительность, водные объекты, снег и облака.

Горные породы и почвы отличаются постепенным увеличением яркости с возрастанием длины волны солнечного излучения. Спектральная яркость *горных пород* зависит прежде всего от оптических свойств входящих в их состав минералов и химических элементов, а также от их дисперсности и влажности.

Отличительная особенность *почв* – существенные различия в интегральной яркости. Наименьшей способностью отражать солнечное излучение обладают черноземы, наибольшей – сильнооподзоленные суглинистые почвы. На отражение солнечного света почвами влияют три основные группы веществ: 1) светло окрашенные соединения (карбиды, соединения кремния и алюминия), отражающие излучение равномерно, но значительно, 2) темные гумусовые вещества, отражающие свет слабо и равномерно и 3) соединения железа, которые обуславливают селективность (неравномерное отражение) почвами солнечного излучения. Очень существенно яркость почв зависит от влажности. В видимом участке спектра яркость почвы в состоянии полной полевой влагоемкости в 2 раза ниже, чем при воздушно-сухом состоянии, а в ближнем и среднем инфракрасном участке (0,7–2,5 мкм) даже иногда в 3 раза. Помимо этого оптические характеристики почв зависят от гранулометрического состава поверхности: с уменьшением размера частиц коэффициент яркости возрастает экспоненциально.

Растительность обладает наибольшей спектральной селективностью, по сравнению с другими объектами земной поверхности. Отражательные свойства растительного покрова в основном зависят от четырех факторов: 1) оптических свойств зеленых листьев; 2) геометрии растений, особенно индекса листовой поверхности, и углового распределения листьев; 3) отражательной способности поверхности почвы, если растения не образуют сплошного покрова; 4) структуры растительного покрова, т.е. характера пространственного распределения растений.

При всем многообразии кривые спектральной яркости зеленых растений имеют одну общую закономерность: в оптическом диапазоне спектра у них два минимума – в синем (0,45–0,47 мкм) и красном (0,68–0,69 мкм) участках спектра и два максимума – в зеленом (0,54–0,58 мкм) и ближнем инфракрасном (0,7–1,3 мкм) участках. Большая доля (70–90%) солнечных лучей синего и красного участков спектра поглощается пигментами листьев растений, прежде всего хлорофиллом, и преобразуется в энергию, необходимую для процесса фотосинтеза. К зеленой зоне приурочен максимум отражения поверхностью листьев, именно поэтому мы воспринимаем зеленый цвет листьев. Наиболее высокое отражение – в ближней инфракрасной области спектра, оно связано с внутренней структурой листа. По мере роста и вызревания листьев их отражательная способность меняется.

Соотношение четырех отражательных компонентов в растительном покрове – освещенных растений и почвы, затененных растений и почвы – меняется в зависимости от угла освещения и угла наблюдения. Вследствие этого варьирует коэффициент отражения покрова в целом, даже если оптические свойства составляющих его растений, морфология, а также характеристики почвы остаются постоянными.

Из особенностей спектральных свойств растительности следует, что ее дешифрирование и изучение дает наилучшие результаты при использовании материалов съемки в нескольких спектральных зонах видимого и ближнего инфракрасного участков спектра, т.е. многозональной съемки.

Водные объекты также обладают специфическими свойствами – их спектральная яркость падает с возрастанием длины волны солнечного излучения, что объясняется их высокой поглощательной способностью. Лучи ближнего ИК участка спектра практически полностью поглощаются тонкой пленкой воды, поэтому на снимках, сделанных в этой съемочной зоне, можно дешифрировать только границы и поверхность водных объектов. Информация о водной толще, а также об объектах, находящихся внутри нее или на дне, может быть получена в видимом участке спектра от 0,4 до 0,7 мкм.

Солнечное излучение не только отражается поверхностью воды, но и проникает на глубину, где частично поглощается молекулами воды и растворенными органическими веществами. Проникновение света на глубину спектрально селективно: сине-зеленого света значительно больше, чем красного. При наличии в воде минеральных взвешенных частиц типичный вид кривой спектральной яркости изменяется: возрастает яркость в желто-зеленом участке спектра. Содержащийся в воде фитопланктон вызывает понижение яркости в синей (около 0,4 мкм) и красной (0,64–0,69 мкм) частях спектра, т.е. в полосах поглощения хлорофилла.

Серия зональных снимков представляет спектральный образ объектов и может быть использована для выявления их сущности. Дешифрирование одного из зональных снимков возможно, если какая-либо из съемочных зон в наибольшей степени удовлетворяет поставленной задаче. Так, за счет практически полного поглощения излучения ближней инфракрасной области спектра объекты гидрографической сети изображаются самыми темными, что облегчает их распознавание. Контраст между водными объектами и окружающим фоном при-

водит к тому, что водотоки изображаются на снимках, размер пиксела которых в 2–3 раза больше, чем ширина водотоков. Однако в этом случае нельзя судить о реальной ширине русла.

Изменчивость геосистем во времени, смена состояний природно-территориальных комплексов – одна из особенностей территории, которые необходимо иметь в виду при выборе аэрокосмических снимков. Объекты земной поверхности существуют не только в пространстве, но и во времени, т.е. постоянно изменяются. Масштабы происходящих изменений различны: суточные, сезонные, многолетние, вековые. Со временем меняются физиономические свойства объектов, их внешний облик, а значит, в момент съемки каждый из географических объектов фиксируется в некотором определенном состоянии. От того, насколько хорошо выражены в этом состоянии важные для исследования характеристики, зависят результаты дешифрирования. Сезонные изменения могут служить дополнительным дешифровочным признаком, например растительности, поскольку смена фаз вегетативного развития у растений разных видов наступает в разное время. Если предполагается изучать по снимкам многолетнюю динамику природных объектов, то выявление различий в сезонных состояниях становится обязательным, так как в противном случае можно получить искаженные данные. Учет состояния объекта наблюдения – обязательное условие проведения мониторинга.

Суточная динамика большинства объектов земной поверхности связана с высотой Солнца и метеорологическими условиями и, как правило, в большей мере сказывается на результатах дешифрирования снимков высокого пространственного разрешения. Учет положения Солнца важен при сопоставлении одновременных снимков, так как направленные в разные стороны тени ухудшают визуальное восприятие изображения, а при компьютерном дешифрировании приводят к появлению фиктивных изменений. Существенно влияют на достоверность результатов и метеорологические условия. Например, граница лугов низкого и среднего уровня может быть неправильно определена после сильных дождей.

Знание закономерностей изменений, происходящих в географических ландшафтах, существенно повышает качество результатов дешифрирования при выявлении по снимкам динамики объектов и явлений.

2.2. Выбор системы координат

Система координат – это способ задания положения точек в пространстве. Главное свойство всех систем координат – положение любой точки однозначно определяется ее координатами. Использование снимков для мониторинга, т.е. для сопоставления и выявления изменений, в обязательном порядке предполагает их геометрическое соответствие, т.е. привязку к пространственной системе координат. Мониторинг на локальном или региональном уровне ведется в крупных и средних масштабах топографических карт, т.е. не мельче 1:500 000. В этом случае возможен выбор одной из трех систем пространственных координат: географической (широта–долгота) или двух прямоугольных (СК-42 и WGS-84), наиболее часто используемых в настоящее время (табл. 2).

Таблица 2

Наиболее распространенные геодезические системы координат

Геодезическая система координат	Проекция	Эллипсоид
СК-42 (Пулково)	Гаусса–Крюгера	Красовского
WGS-84	UTM (поперечно-цилиндрическая Меркатора)	WGS-84

При работе с данными в растровом формате можно использовать и географическую, и геодезические системы, если же планируется составление карт в векторном формате, то лучше выбрать прямоугольные геодезические системы.

Геодезические системы координат фиксируют положение точек или объектов в метрической системе, чаще в метрах. Каждая система координат имеет два параметра (сложных математических выражения): по одному из них выполняется переход от «неправильной» фигуры Земли к строгой математической форме – эллипсоиду, а второй – проекция – задает правило развертки эллипсоида в плоскость (карты). До недавнего времени большинство развитых стран с обширной территорией имели собственные системы координат. Появление съемочных космических систем и систем спутникового определения координат (GPS) привело к необходимости иметь общую, всемирную систему координат (World Global System). Космические цифровые

снимки поставляются зарубежными фирмами-распространителями уже преобразованными в систему координат WGS-84, в то время как отечественные топографические карты составлялись в государственной системе координат СК-42. Отсчет координат в обеих системах ведется от экватора (в СК-42 это ось координат x , а в WGS-84 ось y) и от осевого меридиана зоны (соответственно y – в СК-42 и x – в WGS-84). В координатных системах для удобства отсчета координат поверхность эллипсоида делится на 60 6-градусных зон, счет которых ведется в нашей системе от Гринвичского меридиана, а в WGS-84 – от 180° в. д. Разница в значениях координат точки в этих двух системах на территории нашей страны может достигать по оси y в системе WGS-84 (x в системе СК-42) до 2 км, а по другой оси – нескольких сотен метров.

Для совместного использования снимков и отечественных карт необходимо привести их в единую систему. Выполнять геометрические преобразования приходится и в некоторых других случаях. Первичная привязка космических снимков выполняется по орбитальным данным, точность ее у разных съемочных систем неодинаковая. Например, высокой точностью привязки отличаются съемочные системы спутников Landsat, а космические снимки системы Cartosat со спутника IRS-P5, наоборот, привязаны по орбитальным данным неточно. В программных пакетах высокого уровня пересчет координат из системы WGS-84 в СК-42 выполняется автоматически соответствующей программой. Если такой программы нет, переход к другой системе координат выполняется по опорным точкам.

Согласование систем координат необходимо также при использовании в процессе обработки снимков точек наземных наблюдений, координаты которых определены приемником спутникового позиционирования (GPS, ГЛОНАСС). Во многих современных GPS-приемниках предусмотрен переход от WGS-84 к СК-42 (Пулково). При отсутствии в установках приемника координатной системы СК-42 создают пользовательскую систему путем ввода общепринятых коэффициентов пересчета координат, которые можно найти в Интернете или учебной литературе.

2.3. Выбор программных пакетов

Выбор программных средств зависит от решаемых задач, объемов данных, предполагаемых к обработке, и квалификации исполнителей. В настоящее время обработка ДДЗ ведется преимущественно

средствами программных пакетов, специально предназначенных для этого. Часто такие программы обеспечивают не только извлечение информации из снимков, но и отображение ее на картографической основе, а также интеграцию с данными ГИС. Мониторинг и изучение динамики объектов наиболее эффективно может быть осуществлен на основе применения ГИС-технологий.

Программные продукты для обработки снимков довольно многочисленны и различны по сложности. Среди пакетов высокого уровня (дорогостоящих, лицензионных) наибольшее распространение у нас в стране получили ENVI, ERDAS Imagine, PCI Geomatica. Эти программные продукты обеспечивают полный комплекс обработки всех существующих в настоящее время видов съемки, для овладения программами такого уровня требуется высокая квалификация исполнителей. Обзоры программных средств для обработки материалов дистанционного зондирования можно найти в Интернете, например на сайте <http://loi.sccc.ru/gis/RS/chapter108.html>.

В свободном доступе также существуют программные комплексы, обеспечивающие выполнение основных операций, необходимых для картографирования и мониторинга изменений природных территорий локального уровня на основе ДДЗ. Как правило, для работы с ними не требуется высокий уровень квалификации, поэтому их могут использовать и специалисты-природоведы, только начинающие обрабатывать снимки.

Остановимся несколько подробнее на двух бесплатных программных продуктах.

Программа **MultiSpec** (<http://dynamo.ecn.purdue.edu/~biehl/MultiSpec/>), разработанная в американском университете Пердью, хорошо известна среди специалистов по обработке снимков. Система позволяет открывать, просматривать и обрабатывать многозональные, а также гиперспектральные снимки (получаемые, например, сканерами AVIRIS с самолетных носителей и MODIS со спутников Terra и Aqua), а также снимки с радиометрическим разрешением больше 8 бит/пиксел (например, QuickBird, GeoEye – 11 битов). Этот комплекс широко применяется в школьном и университетском эколого-географическом образовании и в других областях. Программа занимает мало места на диске, может использоваться на большинстве компьютеров, что немаловажно для пользователей, обла-

дающих ограниченными техническими возможностями. MultiSpec постоянно совершенствуется.

Основные функции программы MultiSpec:

- импорт данных в бинарном или ASCII формате с заголовком или без него;
- вывод многозональных снимков на экран в различных палитрах;
- построение гистограмм распределения яркости;
- изменение формата данных (добавление стандартного заголовка, перевод из одного бинарного формата в другой, комбинация нескольких файлов в один, монтаж пространственно соседствующих снимков и др.);
- создание новых слоев данных;
- кластеризация снимка с использованием одношагового либо итеративного (ISODATA) алгоритма;
- определение характеристик классов путем задания на снимке прямоугольных и полигональных участков, вычисления статистики по выборке и по классу, определения тестовых участков для количественной оценки классификации;
- определение наилучших спектральных зон для использования в данной классификации;
- классификация выбранного снимка или его части с использованием шести алгоритмов;
- вывод результатов классификации в табличной форме по обучающим и тестовым выборкам, с разделением по выборкам, по классам или по группам классов;
- вывод графиков спектральных яркостей для текущего пиксела или среднего для выбранного участка;
- поддержка координатных систем (предоставленных (записанных) вместе со снимком) и показ их на экране;
- экспорт промежуточных и окончательных результатов, черно-белых или цветных изображений и текстов в другие программы.

Основные особенности и функции программы MultiSpec, а также примеры выполнения отдельных операций при обработке снимков приведены на сайте Межуниверситетского аэрокосмического центра при МГУ имени М.В.Ломоносова (http://www.geogr.msu.ru/science/aero/center/sem2_sum_article.htm), где на примерах снимков с изо-

бражением дельты Волги и участка Москвы рассмотрено практическое выполнение следующих операций:

- ввод снимков, (автоматический, ручной снимков, соединение зональных снимков в многозональный файл);
- изучение особенностей отображения объектов на снимках и выбор оптимального варианта синтеза;
- построение кривых спектрального образа;
- создание обучающих выборок для предложенных классов и их сравнение;
- создание эталонных участков и обучающих выборок в Multispec;
- алгоритмы классификации, предлагаемые в Multispec.

Классификация с обучением (контролируемая):

- оценка качества обучающих выборок по диаграммам двумерного поля признаков и выбор алгоритма классификации;
- оценка качества обучающих выборок путем классификации эталонных участков;
- оценка качества обучающих выборок путем сравнения с результатами гибридной классификации без обучения.

Классификация и оценка результатов:

- создание тестовых участков для оценки результатов классификации;
- классификация и оценка ее результатов по тестовым участкам и карте вероятностей;
- применение Multispec и изученных алгоритмов в эколого-географических исследованиях.

Для иллюстрации возможностей программы MultiSpec рассмотрим порядок работы при картографировании по снимкам высокогорных ландшафтов Приэльбрусья (Центральный Кавказ). На первом этапе для определения набора объектов для классификации по снимку осуществляется предварительное знакомство с особенностями территории. Для этой цели используются данные полевых обследований местности, аэровизуальных наблюдений, ранее составленные карты. В приведенном примере при опоре на ландшафтную карту национального парка "Приэльбрусье" был выделен сокращенный набор объектов, относящихся к разным высотным поясам. Второй этап – создание

эталонных участков и обучающих выборок по ним, которые оформляются в виде отдельного файла. Третий этап – собственно классификация элементов снимка по методу максимального правдоподобия (Maximum Likelihood). Результаты ее представляются в виде изображения, где выбранными цветами обозначаются пиксели снимка, отнесенные к соответствующему классу, и в виде текстовой таблицы оценки точности классификации по эталонным участкам, при которой оценивается, насколько достоверно разделены заданные эталонные классы.

Другие примеры выполнения тематической обработки многозональных снимков с помощью программы MultiSpec для высокогорной территории приведены на сайте http://www.geogr.msu.ru/science/aero/acenter/int_sem3/sem3_3.htm.

Программный пакет **ILWIS** – свободно распространяемый ГИС-пакет, который обеспечивает не только операции по обработке снимков, включая их геометрические преобразования и координатную привязку, но также и работу с картами в векторном формате (http://www.itc.nl/Pub/Home/Research/Research_output/ILWIS-Remote_Sensing_and_GIS_software.html).

Программная оболочка ILWIS – Integrated Land and Water Information System, разработанная в Международном институте аэрокосмических съемок и наук о Земле (ИТС, Нидерланды), использовалась авторами в качестве основного программного средства при разработке ГИС и осуществлении мониторинга природных компонентов Астраханского биосферного заповедника.

Важное достоинство системы ILWIS – оптимальное сочетание возможностей собственно ГИС, систем обработки аэрокосмической информации и создания карт. Необходимыми компонентами ILWIS являются система обработки изображений с функциями геометрической коррекции и извлечения из снимков тематической информации и векторный модуль, обеспечивающий совместную обработку информации в растровом и векторном формате. В системе предусмотрен импорт и экспорт широко используемых форматов растровых и векторных данных. Рассмотрим некоторые возможности системы ILWIS, наиболее существенные для организации мониторинга природных и природно-антропогенных территорий на основе аэрокосмической информации.

В системе ILWIS представлены все обязательные компоненты, входящие в современные системы обработки дистанционной информации, большая их часть была перечислена выше при характеристике программы MultiSpec. Однако, поскольку система ILWIS обладает и функциями ГИС, то необходимо особо выделить такие функции, как геометрическая коррекция изображений, редактирование и дополнение результатов обработки снимков картографическими элементами.

Геометрическая коррекция и взаимное геометрическое согласование снимков с разным пространственным разрешением имеют особое значение при изучении динамики по разновременным материалам, полученным разными съемочными системами. Программы геометрического трансформирования изображений в среде ILWIS обеспечивают преобразование любых растровых изображений по заданным параметрам известной картографической проекции и произвольное – по опорным точкам с известными координатами. Возможны три основных метода задания координат опорных точек: 1) по полевым измерениям приемником спутникового позиционирования; 2) с помощью эталонной карты или геокодированного (т. е. с пространственными координатами) снимка, представленных в виде изображения в формате системы ILWIS; 3) в результате измерений по традиционным бумажным картам.

В системе предусмотрено несколько методов изменения геометрии исходных изображений: конформное (линейное), аффинное (линейное), преобразование второго порядка, преобразование третьего порядка и, наконец, перспективное. Выбор метода трансформирования зависит от геометрических особенностей изображения. Большое значение имеет и такая опция геометрического преобразования снимков, как склейка цифровых снимков участков территории и монтаж цифровых мозаик – фотопланов.

Для успешного тематического анализа снимков предназначены процедуры улучшения визуального качества изображений, их дешифрируемости: повышение контраста, синтез цветного изображения из нескольких зональных. В программном пакете предусмотрены различные методы манипуляции со значениями яркостей в зонах спектра: метод главных компонент, факторный анализ, вычисление коэффициентов, в частности, нормализованного вегетационного индекса NDVI.

Как любая другая система обработки изображений, система ILWIS позволяет выполнять два вида классификации: контролируемую, на основе статистики признаков в обучающей выборке с использованием максимум четырех зональных снимков, и неконтролируемую (кластеризацию) на основе спектральных признаков – максимум восемь каналов. Для контролируемой классификации приняты три наиболее распространенных метода – минимального расстояния, параллелепипеда и максимального правдоподобия. Считается, что последний дает наилучшие результаты, так как используется вероятностный подход к решению задачи классификации.

Как ГИС-пакет система ILWIS обеспечивает хорошие возможности ввода точечной информации, создания и импорта атрибутивных таблиц, интерполяции данных. Векторный блок позволяет создавать точечные, сегментные и полигонные карты, выполнять их несложное оформление и выводить на печать. В программе обеспечены такие возможности, как ортопреобразования, моделирование и пространственный анализ статистических данных, трехмерная визуализация с интерактивным редактированием для оптимального представления модели, создание и визуализация стереопар снимков, методы интерполяции и построения цифровых моделей геополей. Примеры практического применения системы ILWIS для обработки снимков в целях решения конкретных задач картографирования и мониторинга природных систем на основе данных дистанционного зондирования приведены в последующих разделах.

В большинстве распространенных ГИС-пакетов (AutoCAD Map, MapInfo, ArcGIS Desktop/Workstation и его наиболее распространенных модулей Arc/Info, ArcView и др.) есть модули, позволяющие в большем или меньшем объеме выполнять дешифрирование снимков. Как правило, в таких ГИС-пакетах не предусматриваются преобразования снимков (растровых изображений), такие, как разного вида классификации, математические операции с зональными снимками (вычисление индексов) и т. п., но есть возможность создания векторных карт по растровой подложке. Это значит, что можно выполнять визуальное дешифрирование и рисовать контуры распознанных объектов. Кроме того, можно создавать векторные карты по изображениям, полученным в результате предварительной обработки снимков в специализированных программных пакетах.

2.4. Формирование базовых данных как уровня отсчета мониторинговых наблюдений

Важным этапом создания системы мониторинга охраняемых территорий является формирование единой пространственной основы, которая призвана объединить архивные данные, современные источники и поступающие новые данные, обеспечить их пространственно-геометрическое и смысловое согласование. Такой пространственной основой должна стать базовая карта.

Базовая карта – слой тематической информации, предназначенный для использования в качестве географической основы и для привязки других пространственных данных. От геометрической точности базовой карты зависит точность всех новых информационных слоев, создаваемых на ее основе.

Содержание карты должны составлять объекты, удовлетворяющие двум основным требованиям: иметь четкие контуры и быть физиономичными, т. е. изображающимися на аэрокосмических материалах различного разрешения. В зависимости от географических особенностей территории этим требованиям соответствуют разные объекты. Практически для любых территорий такими объектами являются элементы гидрографии: реки, озера, береговая линия. Они могут быть основным элементом содержания базовой карты, обеспечивающим географическую локализацию информации. Например, это может быть сеть протоков, русло которых ограничено относительно высокими прирусловыми валами и потому они не меандрируют. В противоположность этому в большинстве высокогорных районов, небольшие водотоки часто меняют русло, насыщены взвесями и на аэрокосмических изображениях плохо отличаются от галечных и щебнистых отложений. Здесь на базовой карте могут быть показаны гребни хребтов, выходы скальных пород, характерные изгибы верхней границы хвойных лесов. При слабой развитости речной сети для сильно залесенных территорий такими объектами могут стать контуры безлесных участков и, наоборот, в лесостепной зоне – участки лесов в сочетании с дорогами, элементами населенных пунктов.

В качестве базовой можно использовать топографические карты, однако большинство из них в нашей стране не обновлялось более 20 лет, а крупномасштабные топографические карты часто оказываются

недоступными. В каждом случае вопрос использовать ли имеющиеся данные или составлять такую карту по современным снимкам решается особо.

Базовое аэрокосмическое изображение. Выбор материалов, которые могут быть использованы для формирования базового аэрокосмического слоя, зависит не только от наличия снимков разного пространственного разрешения, но и от природных особенностей территории, прежде всего рельефа. Для территорий с малым перепадом относительных высот предпочтительнее космический снимок, отвечающий нескольким требованиям. Он должен иметь высокое разрешение, лучше – самое высокое из имеющихся данных. Для относительно небольших территорий это могут быть снимки с размером пиксела 5–20 м. Желательно в качестве базового использовать многозональный снимок, так как на нем легче, чем на черно-белых снимках, распознавать большинство природных объектов. Выбранный снимок должен охватывать территорию несколько большую, чем изучаемая, что позволит обеспечить его более точную привязку.

Для территории с большим перепадом относительных высот в качестве базового слоя нужно использовать изображение, преобразованное в ортогональную проекцию. Это может быть ортофотоплан, составленный из аэрофотоснимков, или ортотрансформированный космический снимок, совмещенный с цифровой моделью рельефа. Современные снимки снабжены системами пространственных координат. Привязка осуществляется по орбитальным данным, поэтому снимки, полученные разными съемочными системами, часто геометрически плохо согласованы. Для базовой карты или базового аэрокосмического слоя целесообразно уточнить координаты по опорным точкам, что впоследствии обеспечит и согласование снимков с разных спутников.

Базовое аэрокосмическое изображение служит основой для приведения к выбранной системе координат всех аэрокосмических снимков, а также других материалов, представленных в растровом формате. Опыт показывает, что сопоставление двух даже сильно различающихся, в том числе и разновременных, снимков и поиск идентичных точек на них несравнимо легче, чем сопоставление снимка и карты. Это позволяет добиваться хороших результатов при передаче координат и трансформировании всех аэрокосмических данных.

Базовая тематическая карта. Для согласования разнообразных тематических карт, составляемых по данным наблюдений, помимо базового аэрокосмического слоя желательно иметь и базовую тематическую карту (слой), которая обеспечит смысловое согласование информации. Для этого, в частности, создают карту природных контуров, или используют имеющуюся.

Согласование отдельных тематических карт-слоев необходимо как на локальном, так и на более высоких уровнях, и заключается в согласовании пространственного положения границ. Поскольку многие тематические слои, относящиеся к разным компонентам природной среды, создаются по аэрокосмическим данным, на первый взгляд может показаться, что границы изображаемых выделов будут совпадать. Однако в крупных масштабах большинство природных границ носит неопределенный характер и при представлении картографических данных в векторном формате неизбежно возникает задача обобщения изображения. Растровая структура цифрового снимка усиливает неоднозначность границ, поскольку даже при изображении четких на местности контуров, как правило, возникают так называемые смешанные пикселы. В то же время для создания по тематическим слоям разного рода моделей требуется однозначное положение границ, чтобы избежать ложных выводов при сопоставлении. Содержание базовой тематической карты зависит от природных особенностей охраняемой территории, чаще это контуры растительности или орографическая схема горных хребтов.

В противоположность базовой карте-основе, показывающей четкие, легко распознаваемые на снимках контуры, тематическая базовая карта призвана определить и зафиксировать в виде линий положение нечетких, неопределенных, в виде переходной полосы природных границ, чтобы при последующем применении геоинформационных технологий обеспечить сопоставимость тематических данных.

Таким образом, три базовых слоя – векторная карта-основа, растровое аэрокосмическое изображение, дополненное цифровой моделью рельефа, и базовая тематическая карта составляют блок базовой информации для картографо-аэрокосмического обеспечения мониторинга территории, который должен способствовать взаимной увязке и согласованию всех остальных источников пространственных данных (рис. 5).

3 Методы обработки космических снимков

Все разнообразие приемов и способов дешифрирования сводится к двум основным методам: визуальному и автоматизированному (компьютерному). Под визуальным дешифрированием понимается процесс, выполняемый исполнителем, независимо от того, в каком виде представлен снимок: в виде фотоотпечатков или изображения на экране компьютера. В противоположность этому автоматизированное (компьютерное) дешифрирование – это программная обработка снимков на компьютере. Существовавшее некоторое время тому назад представление о том, что автоматизированное дешифрирование полностью заменит визуальное, оказалось неверным. Более того, по мере все более широкого использования снимков со сверхвысоким пространственным разрешением роль визуального дешифрирования возрастает. Это объясняется тем, что способности человека анализировать изображение пока существенно превосходят возможности вычислительной техники.

Одно из основных преимуществ визуального метода дешифрирования перед автоматизированным заключается в легкости получения пространственной информации. Дешифровщик без труда определяет форму, относительные размеры объектов и особенности их распределения. Другое несомненное преимущество визуального способа – одновременное использование всей совокупности дешифровочных признаков, в особенности косвенных. На современном этапе развития компьютерных технологий такая задача пока еще не решена. Также недостижимы для компьютера логическое мышление и интуиция, которыми обладает человек и которые позволяют ему извлекать из снимка информацию не только об объектах и их свойствах, но и о процессах и явлениях.

К преимуществам компьютерного метода дешифрирования можно отнести возможность преобразования яркостей цифровых снимков для улучшения их восприятия, а также разнообразные математические операции, классификацию по заданным признакам. Несомненны преимущества этого метода при обработке многозональных снимков и особенно при сопоставлении разновременных

съемочных и картографических материалов с целью изучения изменений объектов.

Что касается объективности получаемых результатов, то нужно иметь в виду следующее. При компьютерной обработке данных дистанционного зондирования анализ изображения осуществляется по формальным признакам, поэтому получаемые результаты лишены субъективизма. Однако представление о том, что они полностью объективны, не в полной мере соответствует действительности. Многочисленные и разнообразные эксперименты по определению достоверности компьютерной классификации показывают, что, как правило, верно определяются 60–80% объектов. Результат тем лучше, чем больше различаются объекты по своим оптическим свойствам. Если они имеют сходные оптические характеристики, для их распознавания приходится привлекать, кроме яркостных и структурных, другие дешифровочные признаки. В таких случаях более правильными, а значит, и объективными оказываются результаты визуального дешифрирования.

Определенный субъективизм результатов визуального дешифрирования не всегда имеет отрицательный характер, он аналогичен субъективизму карты. В процессе дешифрирования исполнитель проводит осмысленную картографическую генерализацию: обобщает изгибы границ, отбрасывает мелкие или несущественные объекты. При применении визуального метода благодаря широкому привлечению косвенных дешифровочных признаков объекты классифицируются по их сущности, а при компьютерной обработке – по формальному признаку, в конечном итоге по их внешнему облику. Сопоставление визуального и автоматизированного методов дешифрирования показывает, что все они имеют свои преимущества и ограничения, поэтому в каждом конкретном случае предпочтение отдается одному из них или оба используются параллельно, в зависимости от поставленной задачи, географических особенностей и оптических свойств объекта изучения, имеющихся материалов и технических средств,

3.1. Визуальное дешифрирование

Признаки, по которым распознаются объекты на снимках, называют дешифровочными. Дешифровочные признаки принято делить на прямые и косвенные.

Прямые дешифровочные признаки – это свойства объекта, находящие непосредственное отображение на снимках. К ним относятся три группы признаков: геометрические (форма, тень, размер), яркостные (фототон, уровень яркости, цвет, спектральный образ), структурные (текстура, структура, рисунок).

К первой группе, как следует из ее названия, относятся признаки, связанные с размерами и формой объектов на местности. *Форма* – наиболее надежный, т. е. не зависящий от условий съемки признак. К тому же наш глаз наиболее уверенно распознает именно форму объектов. С изменением масштаба снимков форма объекта на нем может несколько изменяться, за счет исчезновения деталей она упрощается. Форма в плане часто используется при распознавании объектов, связанных с деятельностью человека, поскольку они, как правило, имеют форму, близкую к правильной геометрической. Исключительно большое значение, особенно при дешифрировании рельефа местности, имеет пространственная, объемная форма объектов. Самый надежный способ ее определения – стереоскопическое наблюдение пары перекрывающихся снимков.

Тень – дешифровочный признак, позволяющий судить о пространственной форме объектов на одиночном снимке. Различают собственную тень, т. е. часть объекта, не освещенную прямым солнечным светом, и падающую – тень от объекта на земной поверхности или поверхности других объектов. Собственная тень позволяет судить о поверхности объектов, имеющих объемную форму: резкая граница тени характерна для угловатых объектов, например крыш домов, а размытая свидетельствует о плавной поверхности, например крон деревьев. Падающая тень в большей степени характеризует вертикальную протяженность, силуэт объекта.

Существенную роль играет тень как дешифровочный признак рельефа. По выраженности границы тени определяют профиль водораздельных поверхностей, бровок эрозионных форм, гребней форм золотого рельефа, а по размеру, протяженности – относительную высоту или длину форм рельефа (рис. 6). При дешифрировании форм микро-рельефа плоских равнин, речных террас тень как дешифровочный признак играет едва ли не главную роль.

Размер – не вполне надежный признак. При дешифрировании чаще используются не абсолютные, а относительные размеры объектов.

Яркостные дешифровочные признаки связаны с одним и тем же свойством объектов местности – спектральной отражательной способностью, которая фиксируется на снимке в зависимости от вида съемки и типа материала, используемого при дешифрировании. На панхроматических и зональных (отдельных съемочных каналов) сканерных снимках интегральная или спектральная яркость объектов земной поверхности закодирована уровнями яркости (чаще говорят «яркостью») шкалы из определенного числа ступеней (например, 256 или 2048). Этот признак является функцией интегральной или зональной (в относительно узкой зоне спектра) яркости объектов. На многозональном снимке различия в спектральной яркости объектов отображаются набором уровней яркости в съемочных зонах, называемым спектральным образом, а на цветных синтезированных снимках – цветом (рис. 7). *Фототоном, или тоном изображения*, принято называть оптическую плотность на черно-белых фотоотпечатках при визуальном анализе. Наиболее широко этот признак использовался при дешифрировании материалов фотографической съемки, в первую очередь аэрофотосъемки.

Отражательные свойства объектов не постоянны во времени, зависят от высоты Солнца, прозрачности атмосферы, фазы вегетативного развития и других факторов. Изменчивостью спектральной яркости объектов, а также неоднозначностью изобразительных свойств съемочных систем объясняется невысокая надежность яркостных дешифровочных признаков. Яркостные дешифровочные признаки одного и того же объекта на разных снимках могут сильно варьировать, но, несмотря на это, они широко используются при визуальном дешифрировании, а при компьютерном в настоящее время являются основными.

Солнечное излучение обладает свойством в зависимости от длины волны проникать в воду на разную глубину, поэтому серия из снимков в голубой, зеленой и красной съемочных зонах создает как бы разноглубинный образ водных объектов и служит незаменимым материалом для их дешифрирования.

Структурные признаки являются отражением реально существующих ландшафтных рисунков, горизонтальной ландшафтной дифференциации. На снимке эти признаки представляют собой сочетание изображений объектов и их частей определенной формы, размера и тона (цвета), дополняя его новым свойством – про-

пространственным распределением элементов изображения, их размещением, повторяемостью. Благодаря этим свойствам структурные признаки мало зависят от условий освещения, сезона и технических параметров съемки, несмотря на изменчивость отдельных составляющих изображения, поэтому их принято считать надежными дешифровочными признаками. Относительно мелкие элементы на снимке, у которых распознаются форма и размер, образуют структуру изображения. Типичным примером служат изображения лесных насаждений на аэроснимках и космических снимках сверхвысокого разрешения. Несколько разных структур часто формируют довольно устойчивые сочетания, типичные для определенных объектов земной поверхности. Такие сочетания называют рисунком изображения. В рисунке находят отражение как природные особенности территории (структура почвенного и растительного покрова, распределение геоморфологических элементов, литологические особенности слагающих пород, тектонические условия), так и пространственные взаимоотношения объектов антропогенного происхождения. Очень часто рисунок изображения территории определяется ее рельефом и растительностью. Например, типичный рисунок поверхности речных террас с полукружьями заполненных водой или пересохших стариц обусловлен различиями в микрорельефе и растительных сообществах, а характерный рисунок грядово-мочажинного болота представляет собой чередование изображения растительности и открытой водной поверхности.

Несмотря на изменчивость отдельных физиономических элементов на местности, обусловленную сменой сезонных и погодных состояний ландшафтов, особенности рисунка изображения могут сохраняться довольно долго.

Структурные признаки тесно связаны с пространственным разрешением или масштабом снимка, поскольку они соответствуют рисунку природно-территориальных комплексов разного ранга. Например, на снимках с высоким пространственным разрешением (в крупном масштабе) структуру изображения формируют кроны отдельных деревьев, а на снимках с более низким разрешением – чередование выделов лесной и травянистой растительности (рис. 8).

Косвенные дешифровочные признаки. Наличие взаимосвязей и взаимообусловленности всех природных и антропогенных свойств территории служит методологической основой дешифрирования по

косвенным признакам. В качестве косвенных обычно выступают прямые дешифровочные признаки других объектов, называемых индикаторами. Интерпретировать изобразившийся на снимке объект можно по его географической приуроченности, местоположению.

Косвенные признаки условно делят на три группы: индикаторы объектов, индикаторы свойств объектов и индикаторы движения или изменений. Так, индикатором административных и государственных границ могут служить различия в нарезке сельскохозяйственных полей, структуре организации территории, состоянии растительного покрова (рис. 9). Колодцы в пустынных и полупустынных районах определяются на аэроснимках по сети сходящихся к ним троп и пятну выбитой скотом растительности. На космических снимках это светлые пятна (их диаметр на местности несколько километров), соответствующие растительному покрову с измененным в результате воздействия видовым составом.

По косвенным признакам определяют скрытые свойства отчетливо читающихся на снимке объектов. Чаще это относится к объектам хозяйственной деятельности.

Объекты-индикаторы динамики позволяют выявить наличие движения или изменений во времени по материалам одной съемки. В некоторых случаях оказывается возможным не только установить факт наличия движения, но и выявить его особенности. Примером могут служить формы эолового рельефа – индикаторы направления ветра. Мутьевые потоки, выносимые реками в прибрежную зону озер или морей, индицируют течения в приповерхностном слое воды. Рисунок морен на поверхности ледников обусловлен характером движения льда. Обычно поверхностные морены представляют собой скопления обломочного материала в виде полос, постепенно расширяющихся в направлении течения ледника и повторяющих изгибы его языка. У пульсирующих ледников скорость движения льда крайне неравномерна, в период подвижки (пульсации) она возрастает в десятки раз, что может приводить к катастрофическим последствиям. Косвенный дешифровочный признак такого характера движения льда – наличие петель или резких изгибов в изображении поверхностных морен (рис. 10).

Индикационное дешифрирование – это преимущественно дешифрирование по косвенным признакам. Определение одних компонентов ландшафта по другим, физиономичным, легко опозна-

ваемым на снимке, так называемым индикаторам, – распространенный прием географического дешифрирования. Его методологической основой служит взаимосвязь и взаимозависимость компонентов ландшафта.

В качестве индикаторов в зависимости от географических условий могут выступать отдельные компоненты природной среды, называемые частными индикаторами. Чаще в такой роли выступают растительность и рельеф. Так, в лесной зоне почвы распознаются по типу растительности: индикатором подзолистых почв служат лесные насаждения, а торфянистых – болотная растительность. На равнинах, как правило, растительность служит индикатором рельефа: посевы сельскохозяйственных культур приурочены к выровненным участкам, с углами наклона обычно не превышающими 100, в то время как лесная растительность занимает более крутые склоны. Надежным индикатором выровненности и расчлененности равнинного рельефа служит нарезка сельскохозяйственных полей. В горных районах абсолютная высота и экспозиция склонов определяют характер почвенно-растительного покрова и служат косвенными признаками для их распознавания на снимках (рис.11).

В других случаях дешифрирование выполняется не по частным, а по комплексным индикаторам, т. е. по облику природно-территориальных комплексов. В таком случае говорят о ландшафтной индикации, или ландшафтном методе дешифрирования. Сущность его заключается в распознавании природно-территориальных комплексов по всей совокупности признаков, нашедших отражение на снимке, для последующего выявления, изучения и картографирования отдельных составляющих ландшафта. Ярким примером применения ландшафтного метода дешифрирования служит изучение и картографирование подземных вод. Распознавание и интерпретация физиономичных компонентов ландшафта и их пространственных сочетаний позволяют выявить геолого-географические условия и гидро-геологические параметры, такие как направление потоков и глубина залегания грунтовых вод, распространение водоупорных пород. Индикатором ландшафта может быть его рисунок, обусловленный процессом формирования природно-территориальных комплексов.

Важно иметь в виду, что индикационные связи действуют лишь в пределах определенного ландшафта, поэтому ландшафтно-индикационное дешифрирование обычно начинают с районирова-

ния. Затем в пределах каждой из выделенных территориальных единиц выявляют взаимосвязи компонентов ландшафта и определяют индикаторы. Экстраполяция выявленных индикаторов на соседние районы может привести к существенным ошибкам, так как одни и те же объекты в разных районах могут индцировать различные географические условия.

Индикационное дешифрирование служит основой для изучения по аэрокосмическим снимкам географических процессов. Озерные террасы, дешифрируемые по различиям в растительном покрове, свидетельствуют о периодах существенного изменения уровня водоема, т. е. процессах, измеряемых десятками или сотнями лет. В то же время песчаные, практически лишенные растительности косы, с хорошо выраженным дистальным концом – индикатор современного аккумулятивного процесса формирования берега.

Изучение процессов эволюции основывается на выделении ландшафтно-генетических рядов. В этом случае пространственный ряд ландшафтов служит индикатором их смены во времени. Например, на заповедной территории в дельте Волги можно видеть, как по мере движения от береговой линии моря в более высокие части идет последовательная смена растительных сообществ: кустарниковая ива трехтычинковая с отдельными деревьями ивы белой, леса из ивы белой, редколесья из ивы белой по прирусловым валам, разнотравно-осоково-тростниковые луга и ежевичники по прирусловым валам. Этот пространственный ряд отражает смену сообществ во времени. На вновь образовавшихся косах и островах формируются преимущественно кустарниковые сообщества, со временем они вымирают, уступая место лесам, которые, достигнув зрелости, также прекращают свое существование. Процесс протекает быстрее в менее благоприятных условиях произрастания, в более низких, подтапливаемых в половодье внутренних частях островов. Вследствие этого леса остаются лишь на прирусловых валах. Возобновление ивы не происходит, и через 50–60 лет и здесь леса сменяются лугами и ежевичниками.

Результаты индикационного дешифрирования в существенной степени зависят от знания особенностей территории, формирующих ее факторов, взаимосвязей между компонентами природной среды, антропогенным воздействием на нее.

3.2. Автоматизированное (компьютерное) дешифрирование

Цифровые аэрокосмические снимки могут быть представлены в различных форматах растровых изображений, например: TIFF (Tagged Image Format), HDF (Hierarchical Data Format), форматах специализированных пакетов обработки изображений. Следует учитывать, что в этих и некоторых других форматах снимки хранятся без потери информации, но существуют форматы для сжатого представления, при переводе в которое часть информации теряется (JPEG, GIF, PNG и др.).

Компьютерная обработка материалов дистанционного зондирования включает геометрические и яркостные преобразования и классификацию.

Большинство **яркостных преобразований** направлено на улучшение качества изображения для визуального дешифрирования на экране, но иногда путем преобразований можно получить нужный окончательный результат. Среди наиболее часто применяемых преобразований – повышение контрастности снимка для его наилучшего отображения, выполняемое путем изменения гистограммы значений яркости; фильтрация, квантование снимка по яркости, синтезирование цветных изображений, слияние (синергизм) снимков с разным пространственным разрешением, создание индексных изображений.

Квантование – способ яркостных преобразований одиночного снимка, заключающийся в группировке уровней яркости в несколько относительно крупных ступеней. В результате такого преобразования получают новое изображение, на котором мелкие детали, как бы "зашумляющие" изображение, исчезают, постепенное изменение яркости заменяется четкой границей и закономерности распределения яркостей на снимке становятся более отчетливо выраженными. Весь интервал яркостей (например, значений вегетационного индекса) может быть разделен на равные ступени. Но в большинстве случаев лучшего эффекта можно достигнуть, если границы новых ступеней выбирает дешифровщик, пользуясь при этом гистограммой или измеряя на снимке интервалы яркостей для каждого из интересующих его объектов. Квантование чаще используют в случаях неопределенных границ, постепенных переходов.

Яркостные преобразования многозонального снимка преследуют две основные цели: сжать информацию, т. е. получить одно изо-

бражение вместо нескольких, или улучшить визуальное восприятие снимка.

Синтез цветного изображения – простой и наиболее широко применяемый вид преобразования, при котором изображению в каждом из съемочных каналов присваивается свой цвет. Наиболее часто для синтеза используются зоны 0,5–0,6; 0,6–0,7 и 0,8–1,1 мкм или аналогичные им, которым присваивают соответственно синий, зеленый и красный цвета. Этот вариант синтеза называют стандартным. Растительность на изображении имеет красные тона, что объясняется ее высокой яркостью в ближней инфракрасной зоне спектра. Если изменить комбинацию съемочных каналов и цветов и присвоить инфракрасной зоне зеленый цвет, можно получить цветопередачу, близкую натуральной (см. рис. 7). Синтезировать можно не только зональные снимки, составляющие многозональный, но также разновременные снимки и изображения, полученные в результате более сложных преобразований.

Для улучшения пространственного разрешения цветного изображения выполняется операция, называемая улучшением пространственного разрешения. Это другой вариант создания одного изображения из трех – одного с высоким разрешением (обычно это снимок в панхроматическом канале, но может быть и снимок другой съемочной системы, например радиолокационный), и двух зональных снимков, например в инфракрасном и красном каналах (рис. 12).

Математические операции с матрицами значений яркости пикселей двух цифровых снимков (сложение, умножение и др.) также относятся к простейшим преобразованиям. Наиболее часто вычисляется отношение значений яркости двух зональных изображений при работе с многозональными снимками и вычитание – при анализе двух разновременных. Широко распространено *определение индексов*, т. е. преобразование изображений, основанных на различиях яркости природных объектов в двух или нескольких частях спектра. Наибольшее количество индексов относится к дешифрированию зеленой, вегетирующей растительности, отделении ее изображения от других объектов, в первую очередь от почвенного покрова и водной поверхности.

Вегетационные индексы основаны на отношениях значений яркости в спектральных зонах, наиболее информативных для характеристики растительности – красной и ближней инфракрасной. Наиболее

часто используют нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI (Normalised Difference Vegetation Index), рассчитываемый по формуле

$$\text{NDVI} = (\text{БИК} - \text{К}) / (\text{БИК} + \text{К}),$$

где К – значение яркости в красной зоне, а БИК – в ближней инфракрасной.

Значения индекса изменяются в пределах от -1 до +1. Для растительности характерны положительные значения NDVI, и чем больше ее фитомасса, тем они выше. На значения индекса влияют также видовой состав растительности, ее сомкнутость, состояние, в меньшей степени экспозиция и угол наклона поверхности (рис. 13).

Индексные изображения создают на основе и других зональных соотношений. Например, содержание в воде фитопланктона определяют по различиям в синей и зеленой зонах, а концентрацию минеральных частиц (взвесей) – в красной и синей.

Более сложное преобразование – *по методу главных компонент*, направленное на оптимизацию изображения всех типов объектов, изобразившихся на многозональном снимке. Оно основано на переходе от спектральных зон снимка к новым изображениям, являющимся линейными комбинациями исходных зон (т. е. взвешенными суммами зональных значений яркости). Цветное синтезированное изображение первых трех главных компонент дает яркое, контрастное отображение всех объектов (хотя и в необычных цветах). Главные компоненты более высокого порядка обычно менее контрастны, изменения яркости в них соответствуют мелким деталям изображения либо шумам. Цвета на синтезированном изображении главных компонент не сопоставимы с физическими характеристиками объектов и для их интерпретации надо привлекать исходный многозональный снимок.

Классификация многозонального снимка предполагает компьютерное, программное распознавание объектов на снимке. Использование многозональных снимков для распознавания объектов основано на особенностях их спектральной отражательной способности, следствием которых являются различия яркостных характеристик на зональных снимках, благодаря чему человек воспринимает различия в цвете.

Классификация цифрового снимка заключается в группировке пикселей в соответствии с принятым правилом классификации. Возможны два подхода. В первом случае классификация основана

на признаках объектов, принадлежность которых к определенному классу на местности известна (например, признаки объектов на эталонных участках). Это *контролируемая классификация* (supervised classification), иногда называемая классификацией с обучением. Другой подход заключается в группировке пикселей со сходными уровнями яркости в съемочных зонах без предварительного знания числа и характеристик классов объектов на местности. Это *неконтролируемая классификация* (unsupervised classification), или кластеризация (cluster), которую иногда называют классификацией без обучения.

Смысл неконтролируемой классификации заключается в разделении всех пикселей изображения на группы (кластеры), название, спектральные характеристики и даже само существование которых предварительно неизвестны. Критерием отнесения пикселей к тому или другому кластеру служит схожесть спектральных характеристик. Выделенным кластерам присваиваются порядковые номера, а в задачу дешифровщика входит последующее определение их соответствия классам на земной поверхности. Этот способ чаще применяют при отсутствии достоверных эталонных данных: полевых наблюдений, спектрометрирования и т. д., а также как этап, предшествующий классификации с обучением.

Контролируемая классификация предполагает отнесение каждого из пикселей снимка к определенному классу объектов на местности, которому соответствует некоторая область в пространстве признаков. Независимо от того, какой способ выбран для решения этой задачи, контролируемая классификация включает несколько этапов.

Первый этап заключается в определении, какие классы объектов будут выделены в результате выполнения всей процедуры. Это могут быть сообщества растительности, сельскохозяйственные культуры, породы леса, гидрографические объекты и т. д. На втором этапе для каждого из классов объектов выбираются типичные для него пиксели, т. е. формируется обучающая выборка. Третий этап – вычисление параметров, "спектрального образа" каждого из классов, сформированного в результате набора эталонных пикселей. Набор параметров зависит от алгоритма, который предполагается использовать для классификации. Четвертый этап процедуры классификации – просмотр всего изображения и отнесение каждого пикселя к тому или иному классу.

Контролируемая классификация выполняется, как правило, при наличии достаточных эталонных данных, прежде всего в случае наличия данных полевых наблюдений. Особое значение имеет форми-

рование обучающей выборки, поскольку от ее качества в решающей степени зависит точность классификации.

Широко распространены три метода классификации с обучением (рис. 14). *Метод классификации по минимальному расстоянию* (Minimum Distance) основан на детерминированном подходе. Он прост в вычислительном отношении. Смысл метода заключается в отнесении пиксела к тому эталонному классу, евклидово расстояние до центра которого в пространстве признаков минимально. Этот способ целесообразно использовать при ограниченном числе классов в обучающей выборке. *Метод параллелепипедов* (Box Classifier) реализует наиболее простой алгоритм, основанный на статистическом подходе. Он заключается в отнесении пикселей изображения к эталонным классам, в качестве характеристик которых задаются некоторые интервалы значений яркости. Они выбираются в результате анализа гистограммы распределения яркости на изображении. В пространстве признаков интервалы значений яркости определяют замкнутую область, которая в зависимости от размерности поля признаков может иметь форму параллелограмма, параллелепипеда или гиперпараллелепипеда для четырех и более зон. Метод дает хорошие результаты, если спектральные характеристики изобразившихся на снимке объектов не пересекаются в пространстве признаков. *Метод максимального правдоподобия* (Maximum Likelihood) также основан на статистическом подходе. Смысл его сводится к определению вероятности попадания пиксела в тот или иной класс. В общем случае вероятностное распределение спектральных признаков, которыми характеризуется каждый класс, определяет возможность нахождения пиксела в любом месте пространства признаков. Этот метод обычно применяют в случаях, когда спектральные характеристики классов объектов мало различаются, как это часто бывает при распознавании растительных сообществ.

Заключительный этап классификации — это оценка достоверности результатов, т. е. определение процентного отношения правильно определенных объектов к общему количеству классифицируемых. Достоверность классификации вначале оценивают визуально, выявляют грубые промахи и несоответствия. Затем переходят к количественной оценке, сравнивая результаты классификации с тестовыми участками, в качестве которых могут использоваться результаты наземных наблюдений, карты и снимки крупного масштаба, данные публикаций и фондовые материалы. Если полученные результаты не

удовлетворяют исполнителя, он уточняет обучающую выборку (например, путем деления крупных классов на более мелкие) и затем повторяет процесс. Практический опыт показывает, что достоверности классификации в 90–95% можно добиться для 2–3 классов. Удовлетворительными считаются результаты, если правильно определены 70–85% классифицируемых объектов.

3.3. Геометрические преобразования цифровых снимков

Наиболее важные операции при обработке снимков, а особенно при их использовании в проведении регулярных наблюдений – геометрические преобразования, прежде всего присвоение пространственных координат, трансформирование и создание мозаик («склеивание»). В некоторых программных пакетах две первые операции выполняются одновременно, в других – раздельно. *Присвоение координат (геокодирование)* – это установление связи между растровыми координатами снимка и пространственными координатами опорных точек или углов рамки карты, а *трансформирование* – перестройка изображения в принятую проекцию и поворот на север (орбиты спутников, как правило, имеют угол наклона, не равный 90°).

Для горных территорий особое значение имеет еще одно преобразование – *ортотрансформирование*. Только в ортогональной проекции отсутствуют так называемые искажения за рельеф, т. е. смещения точек, возникающие в случае, если проективные лучи (направление визирования на точку) отклонены от нормали к поверхности геоида. Снимки, полученные сканерными системами, не ортогональны, и чтобы контуры, нарисованные по снимку, ложились на карту, топографическую например, необходимо их преобразовать, для чего нужно иметь цифровую модель рельефа.

Цифровые модели рельефа могут быть созданы разными способами, но в последние годы именно использование космических съемочных систем дает основной массив данных для их формирования, а не полевые съемки, как в прошлые десятилетия. Традиционно информация о рельефе местности, особенно для территорий большого размера и тем более в высокогорье, получалась на основе фотограмметрической обработки стереопар снимков. Этот процесс включал собственно аэрофотосъемку, геодезические определения координат опорных то-

чек, фотограмметрическое сгущение этой сети точек до необходимой плотности, стереоскопическую рисовку рельефа и контуров на стереоприборах и составление топографической карты или плана. Именно этим способом в основном и были созданы все топографические карты нашей страны, которые долгое время служили основным источником информации о рельефе местности. Позднее для этой цели на основе цифровых методов были разработаны программы автоматической корреляции стереопар с последующим получением высотных отметок с требуемым шагом и построением на их основе изолиний рельефа, если это необходимо. В последние годы более популярными стали наглядные трехмерные представления рельефа, а для количественной обработки информации о рельефе используются цифровые модели в виде массива трех пространственных координат.

В настоящее время целый ряд космических сканеров обеспечивает (с различной точностью) получение стереопар заданной территории. Наиболее успешным методом создания ЦМР является *радиолокационная интерферометрия*. Причем получение необходимых данных возможно как за два прохода спутника (таких, как RADARSAT-1, JERS, TerraSAR-X и др.) или за один проход, если спутник оборудован двумя антеннами (как радар Shuttle, обеспечивший создание SRTM). На основе полученных данных создают карты поверхности рельефа Земли с шагом сетки в первые десятки метров и абсолютной ошибкой в положении точек по высоте около 10 м.

Создание ЦМР на основе фотограмметрической обработки стереопар – процесс достаточно сложный и требует не только специального оборудования и программного обеспечения, но и специалистов соответствующей квалификации, поэтому в настоящее время для географических исследований широко применяются глобальные ЦМР, созданные на основе космических съемок. Основные общедоступные ЦМР – GTOPO30 (разрешение около 1 км), SRTM (разрешение 90 м) и ASTER GDEM (разрешение 30 м).

GTOPO30 была создана Геологической службой США (USGS) на основе преимущественно картографических данных. Она охватывает всю территорию суши, точность высотного положения точек составляет 30 м при шаге сетки 30 угловых секунд, что примерно соответствует 1 км. Данные этой модели общедоступны (http://eros.usgs.gov/#/Find_Data/Products_and_Data_Available/gtopo30_info), они пригодны для картографирования в глобальных и субглобальных масштабах.

Более современная ЦМР – SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) – создана на основе радиолокационной съемки с космического челнока Shuttle, выполнявшего съемку в 2000 г. SRTM – международный проект по формированию цифровой модели рельефа большей части земного шара от 56° ю. ш. до 60° с. ш. на основе съемки поверхности Земли двухантенным локатором SIR-C/X-SAR. Изначально детальность сетки этой ЦМР составляла 1 угловую секунду, т. е. около 30 м, в дальнейшем в открытом доступе были представлены данные, заглубленные до 3 сек (90 м). На территорию США доступна ЦМР с исходным разрешением.

Последняя версия этой модели (2009) обеспечивает абсолютную точность по высоте около 16 м и относительную по высоте 10 м; ее данные общедоступны (<http://dds.cr.usgs.gov/srtm/>). Возможность свободного доступа обеспечила очень широкий спектр использования этой модели рельефа в отраслевых научных исследованиях.

Наиболее поздняя из общедоступных глобальных ЦМР – ASTER GDEM (<https://wist.echo.nasa.gov/~wist/api/imswelcome/index.html>) – охватывает поверхность суши между 83° с. ш. и 83° ю. ш. Она разделена на фрагменты размером 1°х1°. ASTER GDEM распространяется в формате GeoTIFF в географической системе координат (широта/долгота) и разрешением 1 угловая секунда (примерно 30 м). Оценка точности высотного положения точек 20 м (95% доверительный интервал) и 30 м (95% доверительный интервал) в плане. Однако по оценкам практиков (<http://www.geofaq.ru/forum/index.php?action=vthread&forum=2&topic=201>) эта модель пока уступает по качеству и точности SRTM, которая создавалась значительно дольше.

Две последние ЦМР являются наилучшими среди доступных источников информации о рельефе в региональном и глобальном масштабах, хотя и имеют погрешности и отдельные пропуски данных. В настоящее время на основе данных радиолокационных съемок, выполняемых со спутников TanDEM-X и TerraSAR-X, начато создание новой высокоточной глобальной ЦМР. Данные, получаемые одновременно с двух спутников, должны обеспечить недостижимые до сих пор для глобальных ЦМР характеристики: детальность (шаг сетки) 12 м, абсолютная точность высотного положения точек 10 м, а относительная – 2 м. Однако пока данные TerraSAR распространяются только по высоким коммерческим ценам.

4 Методика выявления изменений по снимкам

Применение космических материалов при проведении мониторинга сводится к сопоставлению разновременных данных для выявления как короткопериодических, так и многолетних изменений. Основные методические приемы совместного анализа включают, во-первых, сопоставление разновременных снимков и результатов их обработки, во-вторых, карт, составленных по разновременным съемочным данным, и в-третьих, архивных карт и снимков.

Наиболее простая по выполнению операция – *вычитание (или сложение) разновременных снимков*. Однако во многих случаях такой подход требует соблюдения определенных условий, которые частично ограничивают его применение на практике. Снимки должны быть получены одной и той же или аналогичной съемочной системой и приведены к одинаковым условиям съемки, для чего необходимо выполнить дополнительную коррекцию – исключить влияние атмосферы. В противном случае с достаточной уверенностью можно выявлять лишь значительные изменения во внешнем облике территории или отдельных объектов, а к количественным оценкам изменений в яркости объектов подходить с осторожностью (рис. 15).

Значительно чаще выполняется *сложение преобразованных изображений*: результатов квантования, вычисления вегетационного или других индексов, а также классификации. Например, вычитание изображений, предварительно квантованных на два уровня (вода и суша), показывает изменения в сезонной зарастаемости акватории водной растительностью. Во всех программных пакетах, предназначенных для обработки растровых изображений, предусматривается специальная процедура сопоставления (наложения) двух изображений, в результате выполнения которой создается новое изображение и/или таблица, в которой зафиксированы все сочетания выделов, представленных на сопоставляемых изображениях (например, в ILWIS эта операция выполняется функцией Cross). Непосредственное наложение разновременных аэрокосмических данных часто используется при проведении регулярных наблюдений, мониторинге.

Вариант сложения трех разновременных аэрокосмических снимков – синтез цветного изображения (рис. 16). Так, синтез трех снимков в ближней инфракрасной части спектра или результатов вычисления вегетационного индекса, относящихся к трем разным сезонам одного года, позволит проследить прирост зеленой массы растений или дать дополнительные возможности для выделения растительных сообществ, у которых не совпадают фазы вегетативного развития.

Во всех названных случаях требуется геометрическое согласование разновременных изображений. Большинство космических снимков поставляются потребителям с выполненной радиометрической коррекцией (получение «сырых» данных специально оговаривается и не всегда возможно). Если требуется количественное сравнение значений яркости на разновременных снимках, полученных в разных условиях, необходимо выполнить и другие виды коррекции: учет различной освещенности, исключение влияния атмосферы, рельефа и геометрии съемки. При выявлении качественных, а не количественных параметров объектов и наличии снимков, полученных в безоблачных условиях, коррекция влияния атмосферы не обязательна. Можно использовать простой, но не вполне точный метод коррекции влияния атмосферы в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне. Значения яркости наиболее темных объектов на снимке (участков глубокой тени от облаков, глубоких и чистых водоемов в ближней инфракрасной зоне) теоретически должны быть нулевыми. Если они имеют некоторое значение, отличное от нуля, то значения яркости «эталонов» вычитаются из значений яркости всех пикселей соответствующего зонального снимка.

При сопоставлении двух разновременных снимков обычна ситуация, когда гистограммы резко различаются, например один снимок выглядит темным, а другой светлым. В таком случае необходимо так преобразовать оба снимка или один из них, чтобы минимальные и максимальные значения яркостей были одинаковыми. Это преобразование известно как приведение изображений к одному виду.

Сложение карт, составленных по разновременным снимкам (переходных карт) применяется, если моменты съемки отстоят во времени на десятки лет и сопоставлять, как правило, приходится разнотипные данные, например аэрофотоснимки или фотопланы с космическими снимками или космические снимки, полученные разными съемочными системами. Еще больше усложняется ситуация, если для определе-

ния состояния изучаемого объекта в каждый из моментов наблюдения использовано несколько источников. Отличительная особенность и несомненное преимущество серии специально составленных переходных карт – их сопоставимость: единая легенда, одинаковые цензы отбора и обобщения элементов содержания. Все это позволяет провести впоследствии совместный анализ карт средствами геоинформационных технологий.

При использовании архивных карт особое значение имеют два взаимосвязанных обстоятельства: дата съемки, по материалам которой составлены карты, и точность планового положения объектов на них. Дата съемки далеко не всегда указывается в выходных данных, более того, год издания карты и время, которому соответствует изображенная ситуация, могут не совпадать и отстоять друг от друга на десятки лет. О точном положении объектов свидетельствуют только топографические карты, которые составляются по инструкциям. Важно также учитывать метод составления архивных карт.

Результаты мониторинговых наблюдений могут быть представлены в виде количественных характеристик или карт динамики. В любом случае расхождения, выявленные путем совмещения разновременных данных, будь то снимки или результаты их дешифрирования, требуют дополнительного анализа, целью которого является разделение изменений, происшедших на местности, и разного рода погрешностей. Такой анализ значительно более важен при использовании геоинформационных технологий, чем при традиционных картографических способах, когда исполнитель осмысленно выполняет сопоставление и рисовку контуров изменившихся объектов, обобщает или отбрасывает ненужные объекты и детали. При компьютерной обработке операция сопоставления данных выполняется формально, а в результирующем изображении и таблице (матрице) переходов появляются *фиктивные изменения*, что может привести исследователя к неверным выводам.

Появление фиктивных изменений связано с двумя основными причинами. Первая из них – сопоставление при изучении многолетней динамики снимков, зафиксировавших разные сезонные состояния ландшафта. В некоторых случаях, и таких немало, внутригодовые изменения в площади объектов могут превышать долговременные, за десятки лет. Так, к существенным ошибкам при изучении речной сети может привести сопоставление снимков, сделанных в паводок и межень, а при определении границ оледенения – снимков с изображе-

нием сезонного снежного покрова. Выявление сезонных изменений географических объектов – необходимое условие получения достоверных данных о многолетних изменениях. Вторая причина появления фиктивных изменений – неизбежные «технические» погрешности в положении границ объектов дешифрирования на разновременных изображениях.

В случае непосредственного сопоставления *растровых изображений*, составляющих как бы многовременный снимок (или результаты его преобразования, классификации), фиктивные изменения возникают как следствие неоднозначности геометрических преобразований. Обеспечить идеальное наложение пикселей по всей сопоставляемой площади снимков нельзя. Погрешность совмещения можно свести к минимуму, если снимки получены одной и той же или аналогичной съемочной системой, а при взаимном координировании в качестве опорных использовались идентичные точки. Точность положения контуров в таком случае зависит от размера пиксела и точности определения пространственных координат опорных точек. Например, при размере пиксела разновременных снимков 30 м погрешность их сопоставления без учета геометрического согласования составит 45 м, погрешность геометрического согласования – не меньше одного пиксела, т. е. изменения в площади даже в идеальном случае можно определить не точнее 1 га. Выявление фиктивных изменений, выражающихся чаще в изменении площади объектов, при непосредственном сопоставлении растровых изображений затруднительно или даже невозможно.

При сопоставлении разновременных переходных карт в векторном формате, кроме погрешностей геометрических преобразований исходных аэрокосмических данных, неизбежно возникают погрешности цифрования. Положение отдешифрированных (оцифрованных) контуров в определенной мере субъективно вследствие того, что для многих природных объектов четкие границы нетипичны, им больше свойственны постепенные переходы. При сопоставлении составленных независимо одна от другой карт из-за неоднозначного проведения границ, отбора мелких деталей на каждой из них появляются контуры фиктивных изменений. В отличие от ситуации с растровыми моделями, на изображениях, полученных в результате наложения векторных карт, фиктивные изменения определить значительно легче: их можно обнаружить как на самом изображении, так и при смысловом анализе

таблицы переходов. При использовании цифровых методов возможны разные варианты выявления «лишних» контуров: поиск на гистограмме объектов размером меньше предвычисленного, выявление заведомо невозможных изменений и т. д. Избежать фиктивных изменений или, по крайней мере, свести к минимуму их число можно, если увязать между собой сопоставляемые разновременные карты.

Последовательное сопоставление разновременных карт – один из возможных методических приемов. Смысл его заключается в наложении векторного изображения, относящегося к одному из моментов наблюдения, на снимок (растровое изображение), относящийся к следующему моменту. Если границы выделов на двух изображениях совпадают или расходятся не более чем на число пикселей, соответствующее точности исходных данных, положение векторной границы не изменяется. Если расхождение превышает допуск, проводится новая граница. Аналогичная процедура выполняется и для других сроков наблюдений. Таким образом, не изменившиеся контуры оказываются одинаковыми на всей серии переходных разновременных карт, а несовпадение границ с высокой степенью достоверности свидетельствует о действительном наличии изменений.

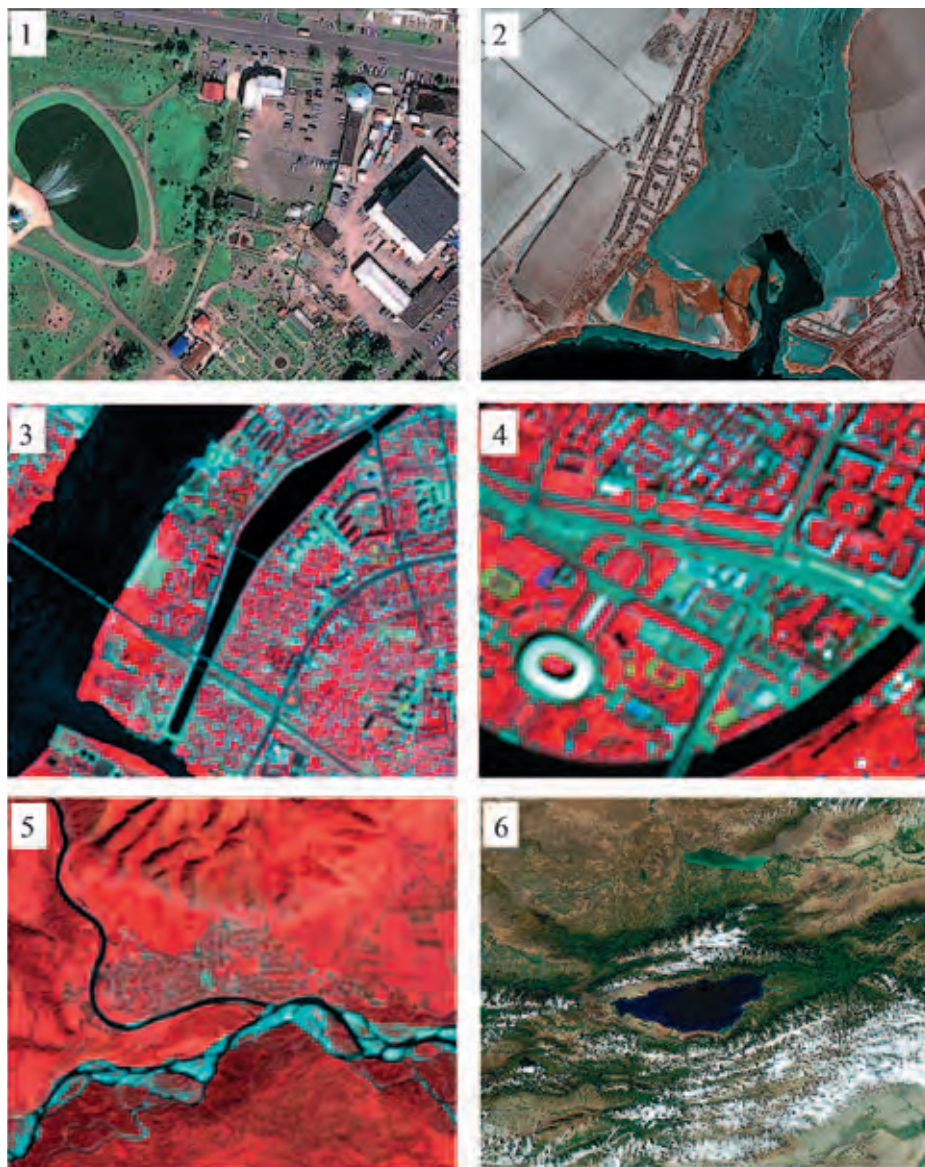


Рис.1. Фрагменты снимков с разным пространственным разрешением:
 1 – около 2 м, GeoEye (Google Earth); 2 – 5 м, SPOT-5; 3 – 10 м, ALOS;
 4 – 15 м, ASTER; 5 – 30 м, Landsat; 6 – 500 м, MODIS

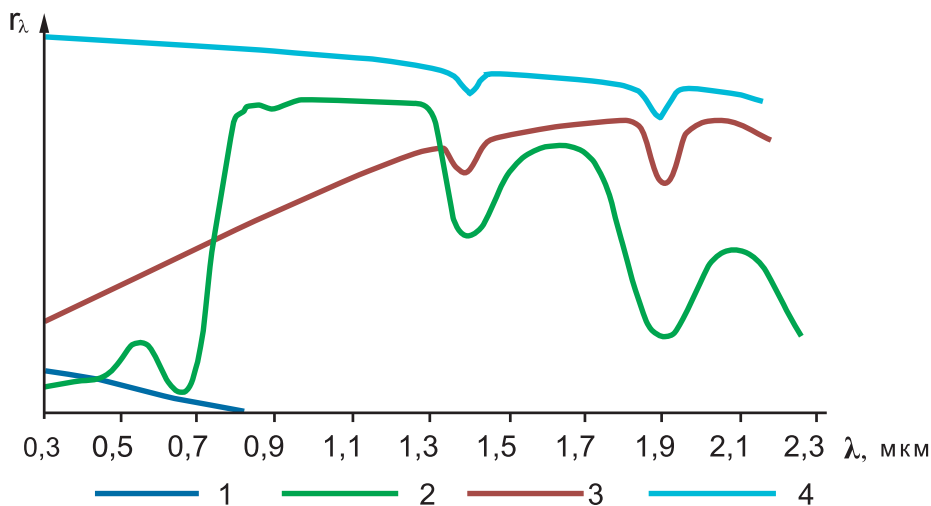


Рис. 2. Кривые спектральной яркости основных классов природных объектов: 1 – водные объекты; 2 – растительность; 3 – почвы и горные породы; 4 – снег, облака

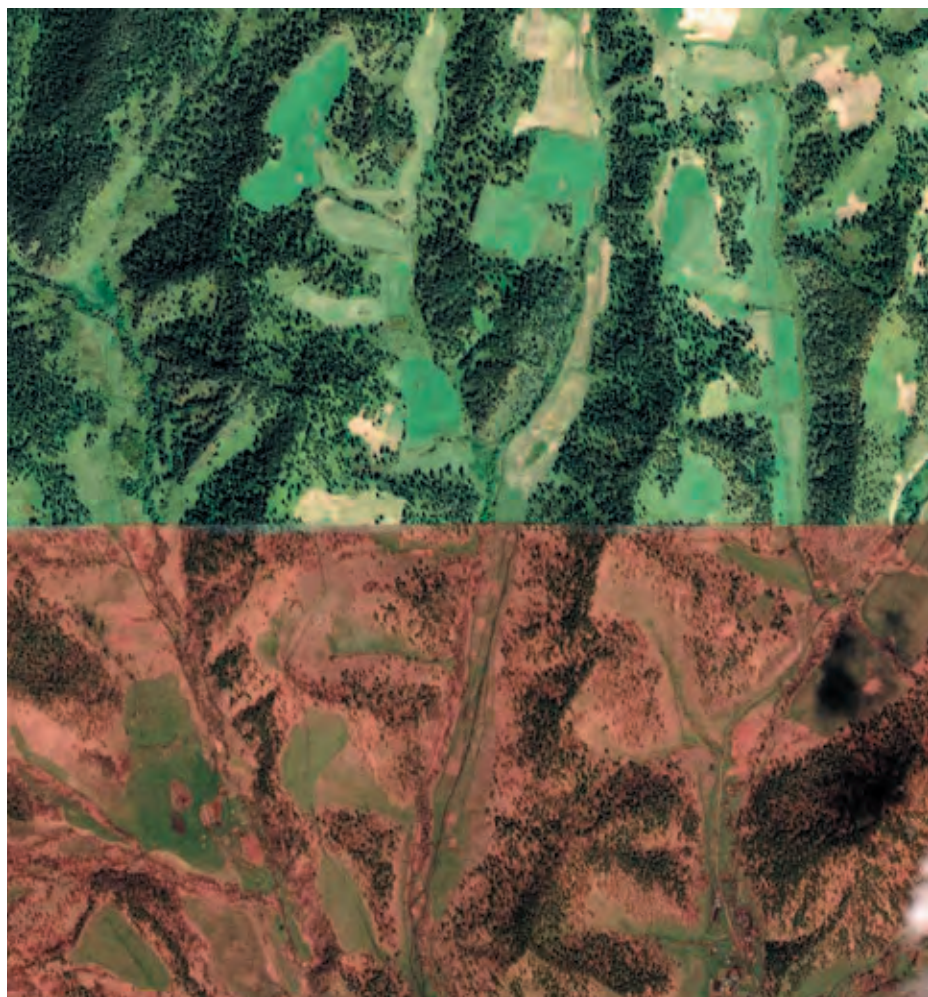


Рис 3. Изображение растительности в разном сезонном состоянии: нижняя часть изображения – весенний аспект, 8 мая 2009 г., верхняя часть – летний аспект, 29 августа 2004 г. (Google Earth)

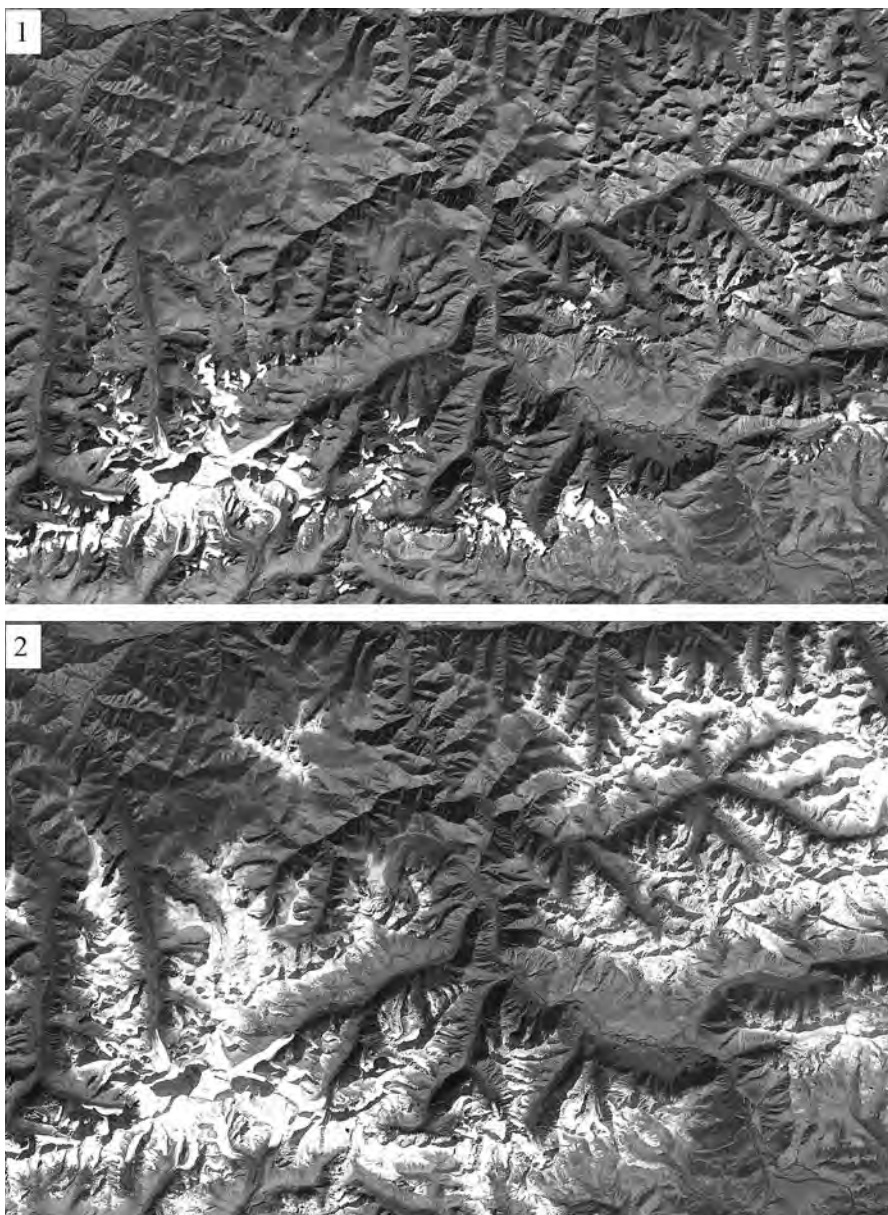


Рис.4. Граница снежного покрова в высокогорье: 1 – в конце периода абляции, 21 сентября 2002 г., 2 – в начале установления сезонного покрова, после снегопада, 30 сентября того же года. (ETM+/Landsat 7)

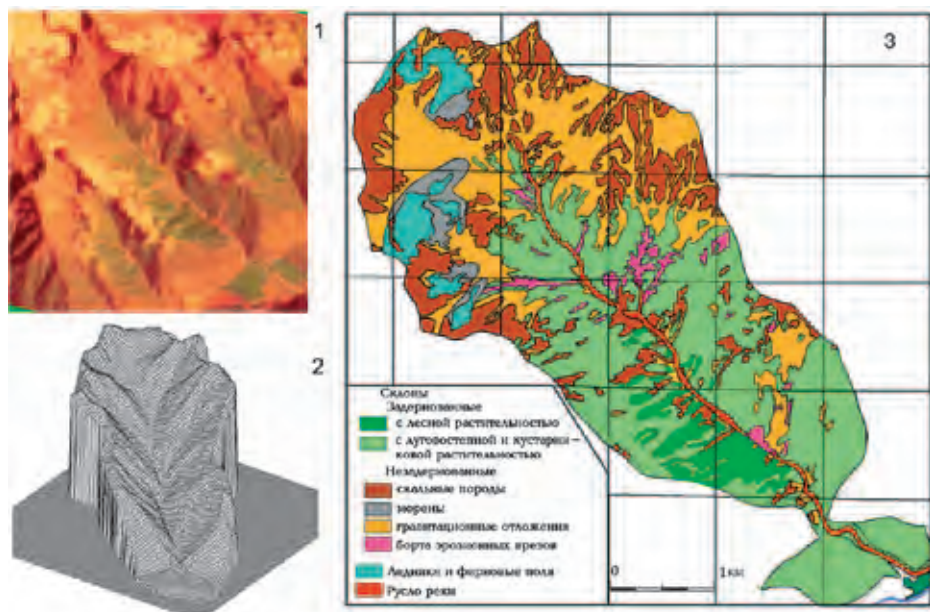


Рис.5. Блок базовой информации высокогорного селевого бассейна:
1 – базовый космический снимок, 2 – цифровая модель рельефа,
3 – базовая тематическая карта

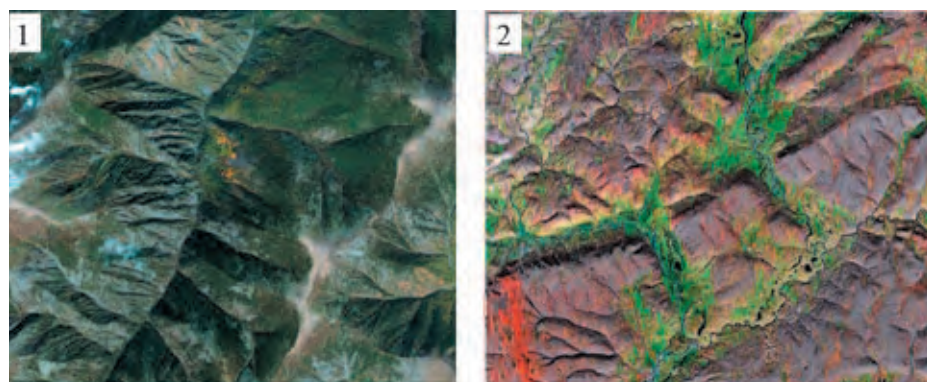


Рис.6. Различия в характере границы теней на изображениях горного рельефа:
1 – среднегорье, 2 – увалистое нагорье

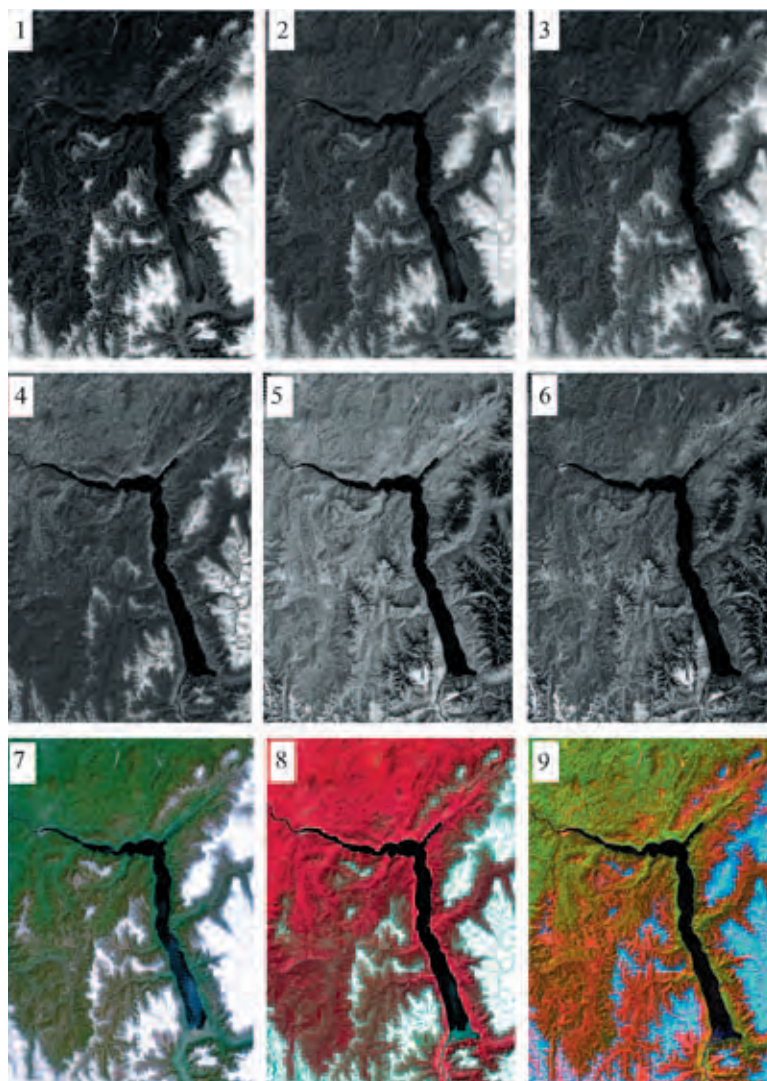


Рис.7. Фрагмент многозонального снимка ТМ/Landsat 5, зональные изображения: 1 – голубая часть спектра (0,45-0,52 мкм); 2 – зелено-желтая (0,52-0,60 мкм); 3 – красная (0,63-0,69 мкм); 4 – ближняя инфракрасная (0,76-0,90 мкм); 5 – средняя инфракрасная (1,55-1,75 мкм); 6 – средняя инфракрасная (2,08-2,35 мкм); варианты синтеза цветного изображения, при которых цвета красный, зеленый и синий (RGB) присвоены соответственно снимкам: 7 – в красной, зеленой и голубой съемочных зонах, 8 – в ближней инфракрасной, красной и зеленой, 9 – в средней инфракрасной, ближней инфракрасной и красной.

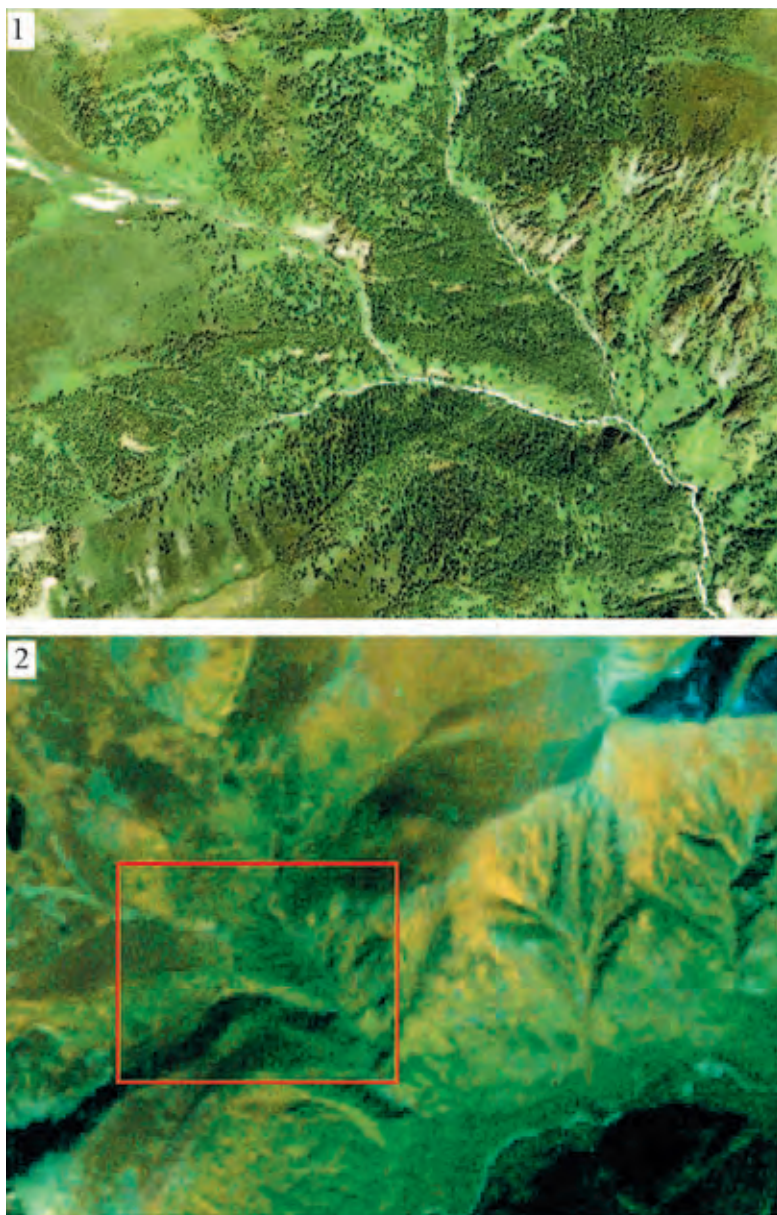


Рис.8. Зависимость дешифровочного признака структура изображения от пространственного разрешения снимка: 1 – GeoEye-1, размер пиксела 2 м, 2 – ТМ/ Landsat 5, размер пиксела 30 м

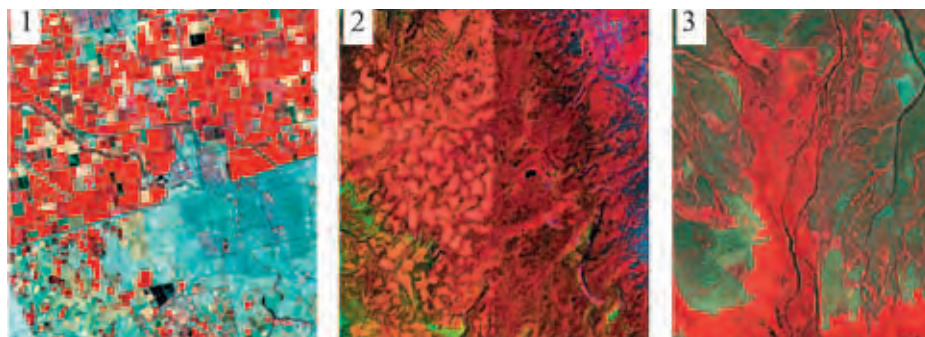


Рис. 9. Изображение административных границ на космических снимках: 1 – государственная граница США и Мексики, 2 – граница Йеллоустонского национального парка (США), 3 – граница Дамчикского участка Астраханского биосферного заповедника

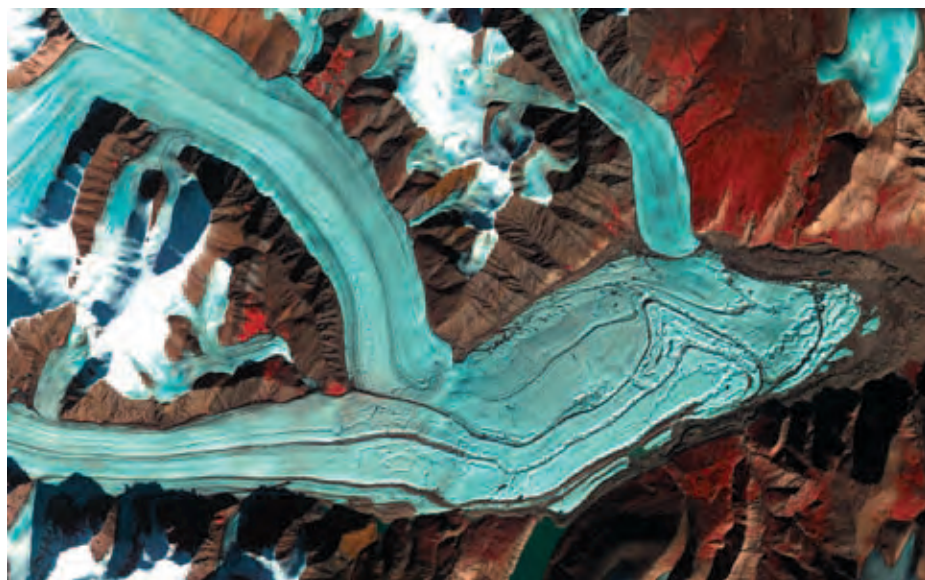


Рис.10. Изображение поверхностных морен, служащее косвенным признаком характера движения льда в леднике

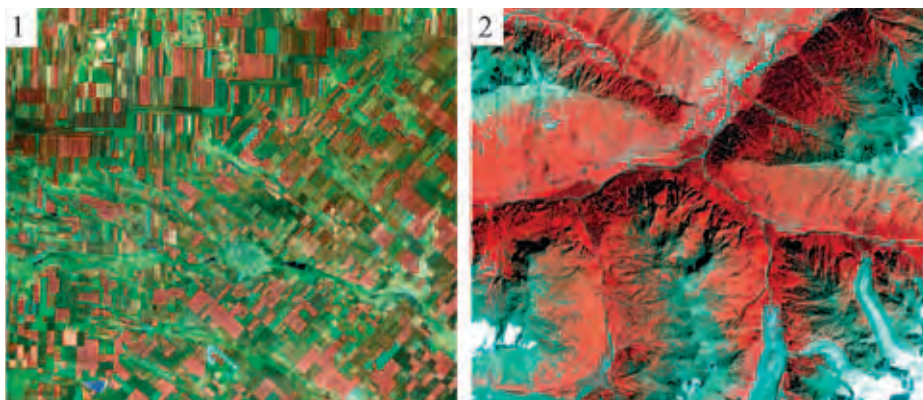


Рис. 11. Индикаторы свойств ландшафта: 1 – прямоугольная нарезка сельскохозяйственных полей служит признаком плоского рельефа, а более бессистемная, с полями разного размера – признаком изменения уклонов и расчлененности; 2 – экспозиция и абсолютная высота индицируют горные ландшафты: лесные в нижних частях склонов северной и северо-западной экспозиции (темно-красный цвет), луговые субальпийские и альпийские на более высоких склонах (светлые красные оттенки), нивально-гляциальные, с крайне редкой растительностью вдоль гребней хребтов (голубоватые оттенки)

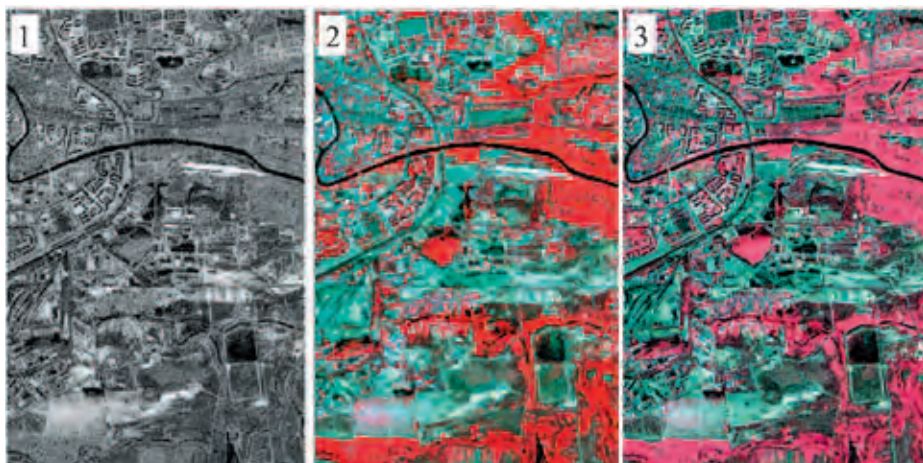


Рис.12. Создание цветного синтезированного изображения ETM+/Landsat 7 с улучшенным пространственным разрешением: 1 – панхроматический канал с пространственным разрешением 15 м, 2 – цветное синтезированное изображение, 30 м, 3 – цветное синтезированное изображение, 15 м

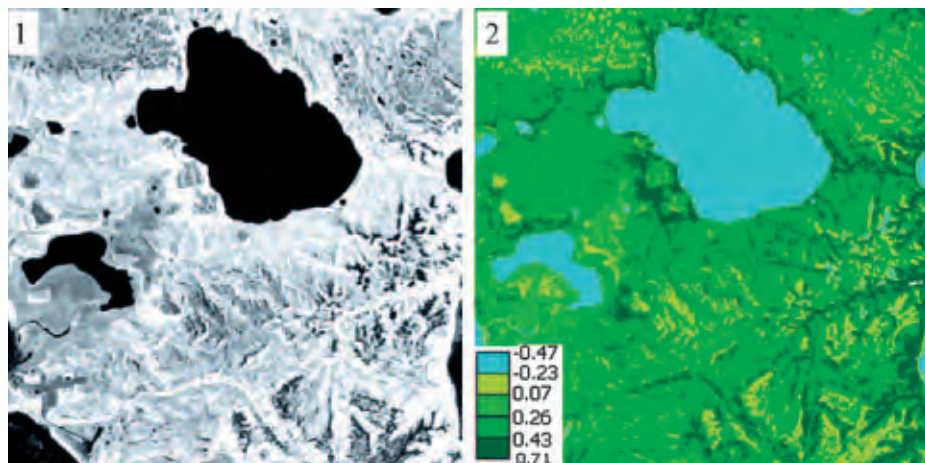


Рис. 13. Результат определения вегетационного индекса NDVI: 1 – изображение в непрерывной шкале значений от -1 до $+1$, 2 – изображение, квантованное на пять ступеней

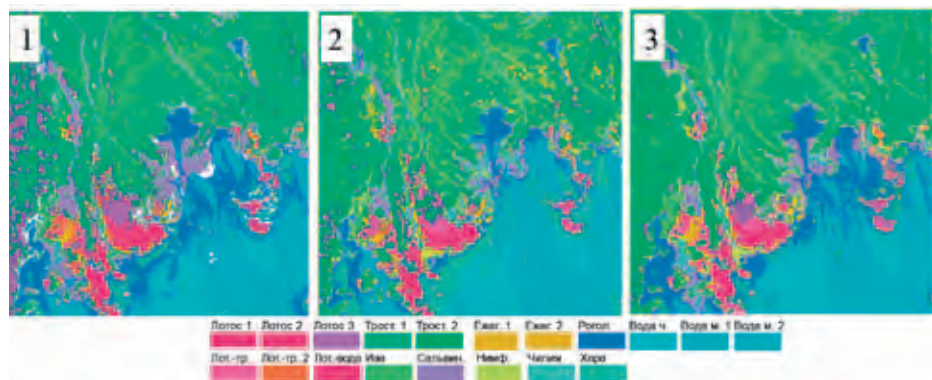


Рис. 14. Результаты контролируемой классификации растительных сообществ: 1 – по методу параллелепипедов, 2 – по методу минимального расстояния, 3 – по методу максимального правдоподобия

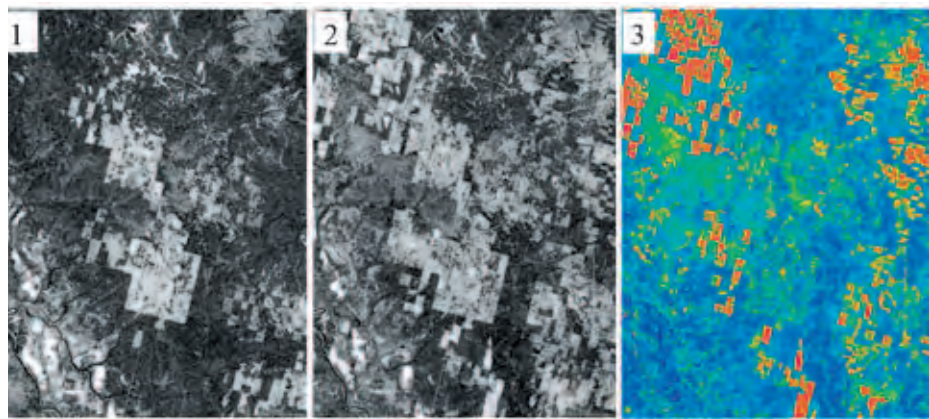


Рис. 15. Изображение, полученное в результате вычитания фрагментов двух снимков TM/Landsat 5: 1 – май 1985 г., 2 – май 2009 г., 3 – разностное изображение, оттенками оранжево-красного цвета показаны вырубки за прошедший период

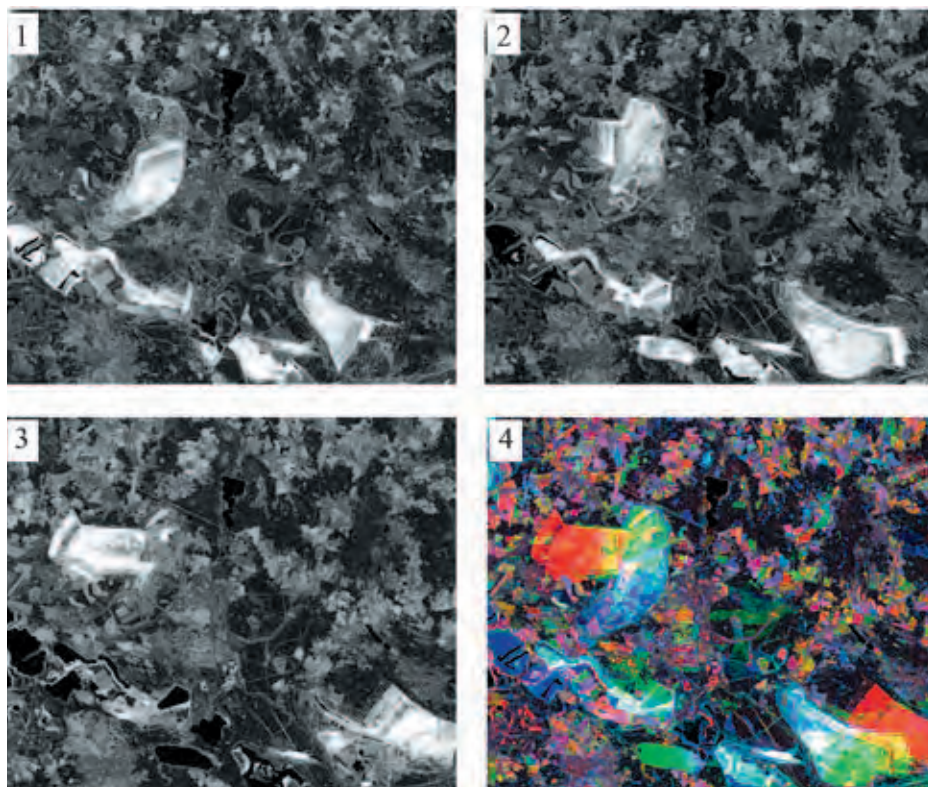


Рис. 16. Создание цветного синтезированного изображения, из трех разновременных снимков ТМ/Landsat 5 в канале 1,55-1,75 мкм: 1 – 1985 г., 2 – 1994 г., 3 – 2009г. 4 – динамика рекультивации земель на месте открытых разработок бурого угля и строительных материалов (при синтезе красный цвет присвоен позднему снимку, зеленый – промежуточному, синий – раннему)

5 Примеры использования ДДЗ для целей мониторинга в разных типах экосистем

В этом разделе приведены несколько примеров работ по мониторингу и картографированию на основе дистанционных данных тех ландшафтов и их характеристик, которые встречаются на ООПТ Алтайского края. В обзоре сделан акцент на оценке возможностей и методике проведенных исследований.

Лесные экосистемы относятся к тем объектам природной среды, которые наилучшим образом поддаются изучению, картографированию и мониторингу. Многолетними исследованиями организаций, специализирующихся на аэрокосмических методах изучения лесов, разработаны методы использования аэрокосмической информации для лесохозяйственной отрасли (Сухих, 2005) и пути применения современных материалов дистанционного зондирования для регионального и глобального оперативного картографирования лесной растительности и мониторинга лесов (Барталев и др., 2005).

Известны также примеры оценки эффективности применения различных данных ДДЗ для характеристики наиболее типичных элементов лесных экосистем. В таблице 3 систематизированы сведения о точности определения характеристик лесов при использовании аэрофотоснимков и космических снимков разного пространственного разрешения в сравнении с наземными методами обследования лесов. Видно, что космические снимки можно использовать в решении разных практических задач, но, как правило, в сочетании с фондовыми картографическими и таксационными данными, выборочными аэрофотосъемками, наземными работами, а также с учетом косвенных признаков дешифрирования и разновременных космических изображений. Во всех случаях применение космических снимков сокращает затраты труда и средств на выполнение тех или иных работ и ускоряет сроки их выполнения.

Приведенные данные показывают, что космические снимки с пространственным разрешением от 10–15 до 30–50 м (ETM+/Landsat, ASTER/Terra (США), HRV/SPOT (Франция), LISS/IRS (Индия) и др) неприменимы при традиционной технологии лесоинвентаризации, так как по ним невозможно определить основные биометрические параметры насаждений. Вместе с тем эти снимки обладают повышенным

спектральным разрешением и могут быть получены на одну и ту же территорию с известной периодичностью съемки. Это создает дополнительные возможности для классификации лесных формаций, а также проведения мониторинга состояния лесного покрова на региональном и более высоком уровне с учетом фенологического состояния лесов.

Таблица 3

Возможная точность определения по прямым дешифровочным признакам параметров и характеристик отдельных участков лесного фонда (таксационных выделов) (по Сухих и Жириной, 2005)

Категории земель, классы объектов и характеристики	Способы оценки и ошибки определения характеристик лесов (при достоверности 0.68)			
	Наземные работы	По аэрофото-снимкам	По космическим фотоснимкам с разрешением 7–10 м	По космическим изображениям с разрешением 20–40 м
Покрытые лесом земли	0%	±5%	±10%	±20%
Несомкнувшиеся лесные культуры	0%	±30%	Не распознаются	
Редины	±20%	±30% ±40% + 50% Перепутываются с насаждениями низкой полноты, старыми гарями, марями, рубками		
Вырубки	0%	+10% ±20% +30% Перепутываются со старыми гарями, прогалинами, рединами, марями, старыми рубками		
Гари	0%	0%	±20% +30% Перепутываются с марями, рединами, старыми рубками	
Прогалины, пустыри	0%	±30% ±50% ±50% Перепутываются с сенокосами, болотами		
Нелесные земли:				
Болота	0%	+10% ±20% +30% Перепутываются с прогалинами, сенокосами, марями, тундрами		
Мари, тундры	0%	±10% ±20% ±30% Перепутываются с рединами, болотами, гарями		
Воды	0%	0%	0%	0%
Усадьбы	0%	0%	± 50%	Не распознаются
Сенокосы	0%	±20% ±50% ±50% Перепутываются с прогалинами, болотами, лесками, старыми рубками		
Пески	0%	±10% +30% ±50% Перепутываются с сенокосами, прогалинами		
Каменистые россыпи	0%	±10%	±50% l ± 50%	
Трассы	0%	0%	± 50% ± 50% Перепутываются с дорогами	
Дороги	0%	0%	± 50% ± 50% Перепутываются с трассами	
Биометрические параметры:				
Состав насаждений	± 1–2 единицы	± 1–3 единицы	Не определяется	Не определяется
Высота, м	+ 7–10%	±10–20%	Не определяется	Не определяется
Возраст, лет	+ 10–40 лет	+ 10–60	Не определяется	Не определяется
Группа возраста	–	±1	±1–2	Не определяется

Полнота (0.3—1,0)	±0.1–0.2 ед.	+ 0.1–0.2	± 0.2–0.3	Не определяется
Запас древесины (по моделям)	±15–25%	+ 15–30%	±20–40%	± 30–50%
Категория состояния (5 категорий)	± 1 категория	± 1 категория	± 2 категории	Участки погибших насаждений
Запас сухостоя	±20–30%	± 30–40%	Не определяется	Не определяется
Запас вапечной древесины	± 30%	± 50%	Не определяется	Не определяется
Группы насаждений (хвойные, лиственные, смешанные)	0%	0%	±10%	± 30%

Известны примеры детального изучения и картографирования лесной растительности на основе различных материалов космических съемок и с применением разных методов компьютерной обработки (Князева, 2006; Малышева, Князева, Золина, 2000; Малышева и др., 2002). Результаты такой оценки приведены в таблице 4. Оценка достоверности распознавания классов природных объектов на территориях нескольких национальных парков при автоматизированном дешифрировании снимков показала ее высокий уровень при использовании алгоритма максимального правдоподобия.

Таблица 4

**Достоверность распознавания классов по различным алгоритмам
для территорий национальных парков в % (по Князевой, 2006)**

Алгоритм	Способ максимального правдоподобия						Способ минимальных расстояний	Кластеризация	
Снимки	МК-4-М, 1992	МСУ-СК, 1997	МСУ-Э, 1993	МСУ-Э, 1998	SPOT, 1996	IRS, 2002	SPOT, 1996	МСУ-Э, 1993	МСУ-Э, 1998
Национальный парк / Классы	Водлозерский		Лосиный остров		Куршская коса			Лосиный остров	
Лес	95	90	-	-	-	-	-	-	-
Заболоченный лес	90	80	-	-	-	-	-	-	-
Хвойный лес	-	-	73	62	88	92	72	81	75
Смешанный лес	-	-	61	74	-	-	-	55	62
Лиственный лес	-	-	75	61	85	85	87	90	88
Болота	93	60	38	43	-	75	-	-	-
Болота с водоемами	90	70	-	-	-	-	-	-	-
Дюны без растительности	-	-	-	-	100	99	100	-	-
Озера	97	95	-	-	100	98	100	-	-

В последние годы стремительно растет число работ, в которых анализируются изменения в природных системах в связи с изменениями климата. Так, А.И. Михеева по материалам дистанционного зондирования исследовала пространственную изменчивость положения верхней границы леса в Хибинах (Михеева, 2010). Хибинский горный массив, расположенный в центре Кольского полуострова — один из перспективных горных районов для изучения реакции лесотундровой растительности на изменения климата. В работе отмечается трудность задачи выделения верхней границы леса, которая давно стоит перед исследователями. На основе обзора литературы показано, что разработано множество критериев ее выделения, например: сомкнутость крон древесного яруса, величина островка леса, высота и диаметр деревьев, предел распространения пряморослых деревьев. Выделенные таким образом границы — условные линии, так как растительность представляет собой пространственный континуум. Верхняя граница леса — зона контакта двух экосистем, в пространстве она больше похожа на полосу. В проведенном исследовании в качестве границы леса принята условная линия, ниже которой находится сплошной лес, ясно распознаваемый на космических снимках высокого разрешения по яркости, и выше которой отмечается наличие признаков (в основном яркостных) более высокого фитоценоза (в данном случае тундры).

Определение положения верхней границы леса, ее пространственных вариаций, а также факторов, влияющих на ее положение, для последующей оценки динамики во второй половине XX в. выполнено на примере Хибинского горного массива. Поставленные задачи решались на основе материалов космической съемки, осуществленной с индийского спутника IRS сенсорами LISS и PAN 23 июля 2004 г. (пространственное разрешение 23 и 5,8 м), космического снимка ASTER/Terra от 30 июля 2004 г., цифровых топографических карт масштаба 1:50 000, карты природных территориальных комплексов Хибин, геоботанических описаний. Работы по географической привязке снимков, визуальному и автоматизированному дешифрированию объектов, расчеты и интерпретация результатов проводились в геоинформационной среде в пакетах ERDAS Imagine и ArcGIS. Итогом работы стала карта пространственных вариаций верхней границы леса Хибинского горного массива в масштабе 1:50 000, которая позволила сделать ряд выводов об особенностях произрастания леса и измене-

ниях его границы. Например, граница леса повсеместно определяется формами рельефа, на которых он произрастает. Крутизна склонов часто служит лимитирующим фактором для верхней границы леса, так как на очень крутых склонах почвенный смыв и иные процессы эрозионной природы не позволяют формироваться зональным почвам, а зачастую уничтожают сами деревья. Обычно предел по крутизне составляет 20–23°. Исследованиями было подтверждено, что главный фактор произрастания леса – увлажненность почвы и воздуха, а орографические факторы лишь вторичны. В данном случае можно говорить о проявлении закона минимума Либиха: увлажненность почвы и воздуха – те факторы, недостаток действия которых влияет на выживание деревьев у верхней границы леса. Пространственные вариации положения границ леса во многом связаны с локальной экспозицией склонов. На склонах западной экспозиции лес может подниматься до самого гребня, тогда как на восточном склоне едва превышает 300 м. Огромное воздействие на лес и, в частности, на положение его верхней границы оказывает антропогенный фактор – вырубки нарушают естественное положение границы леса, такую ситуацию можно наблюдать, например, на хорошо освоенных территориях. Главное значение орографического фактора заключается в том, что чем выше растет лес, тем сильнее влияют на его произрастание все остальные факторы. На больших высотах даже незначительная смена экспозиции и крутизны может повлиять на исчезновение древесных форм. На определенной высоте, которая служит пределом распространения древесной растительности, леса сменяются тундрой.

Примеры изучения реакции **горных ледников** на изменения климата с использованием разновременных материалов дистанционного зондирования можно привести, основываясь на работах Е.А.Золотарева (Золотарев, 2009) и Е.А. Золотарева и Е.Г. Харьковца (Золотарев, Харьковец, 1996, 2000, 2007). В этих работах исследование эволюции оледенения Эльбруса базируется на трех фиксированных датах: 1957, 1979 и 1997 гг., которые образуют два почти равных интервала времени. Данные 1957 г. были представлены оцифрованной топографической картой масштаба 1:10 000, составленной по материалам фототеодолитной съемки в лаборатории аэрокосмических методов кафедры картографии и геоинформатики географического факультета Московского университета, а 1979 и 1997 гг. – материалами аэрофотосъемок, обработанных с помощью цифровых техноло-

гий. В результате на каждую из дат были составлены цифровые модели всего оледенения. Их сопоставление дало возможность измерить изменение границ и высоты поверхности оледенения для каждого из интервалов времени. Оно облегчалось тем, что все три цифровые модели оледенения были составлены в единой системе координат и опирались на одни и те же пункты съемочного обоснования. Максимально возможная среднеквадратическая ошибка при совмещении разновременных цифровых моделей в плане и по высоте составила 2,5 м и была рассчитана по 20 контурным точкам, опознанным на карте и на снимках. Количественные данные по изменению площади и объема оледенения Эльбруса позволили авторам сделать вывод, что за 40 лет (с 1957 по 1997 г.) объем оледенения Эльбруса уменьшился на 1,2 км³, что составляет около 1 км³ воды, из них 45% приходится на два ледника северо-восточного склона. Примечательно, что 98% этого объема – это нижняя часть оледенения от окончаний языков до высоты 4000 м.

Технология выполнения работ по сравнению разновременных аэрокосмических материалов при изучении высокогорных ледников описана в других работах (Золотарев, Харьковец, 1996, 2000, 2007). Современный этап картографического изучения ледников характеризуется цифровой фотограмметрической обработкой наземных, аэро- и космических снимков. Появились "цифровые снимки", которые для нужд горной гляциологии пока получают в основном путем сканирования и цифровой записи материалов фотографической аэро- или фототеодолитной съемки. Обработку стереопар цифровых снимков выполняют с помощью цифровых фотограмметрических программных комплексов, построенных на базе вычислительных систем, в том числе и персональных компьютеров. В представленных здесь работах использовалось преимущественно собственное программное обеспечение, разработанное Е.Г. Харьковцом. Цифровой метод картографирования ледников рассмотрен на примере составления цифровой ортофотокарты Эльбруса по материалам аэрофотосъемки 1997 г.

Цифровая ортофотокарта составлялась с использованием цифрового фотограмметрического программного комплекса, который включал следующие основные компоненты: программный стереокомпаратор для измерения координат точек по цифровым снимкам; программы для проведения фотограмметрических расчетов, в том числе блочной фототриангуляции; программы для автоматического

измерения параллаксов и набора точек цифровой модели рельефа; стереоредактор для редактирования стереомодели и цифрования контуров при визуальном дешифрировании стереомодели, наблюдаемой на мониторе персонального компьютера с помощью жидкокристаллических затворных стереочков; программы построения цифровой модели рельефа и создания ортофотоизображения. Фотограмметрическая обработка включала измерение опорных точек, фототриангуляцию, набор точек для цифровой модели рельефа и составление ортофотоплана. Цифровые снимки были предварительно получены путем записи исходных аэрофотоснимков на фотограмметрическом сканере.

Определение элементов ориентирования снимков и вычисление пространственных координат измеряемых точек основывались на проведении блочной фототриангуляции с использованием большого количества опорных точек по всей площади аэрофотосъемки. Это позволило достичь точности определения координат порядка 1,5 м в плане и по высоте, достаточной для создания карты в масштабе 1:10 000. Основными элементами содержания созданной ортофотокарты являются ортофотоизображение с разрешением 1 м на местности, рельеф, изображаемый горизонталями с сечением 10 м, и отдешифрированная граница ледников.

Картографирование рельефа проводилось с использованием в качестве промежуточных данных его цифровой модели. Набор точек ЦМР осуществлялся по стереопарам взаимно ориентированных снимков. Необходимость набора большого количества точек для построения детальной модели рельефа обусловила применение автоматизированных методов стереоизмерения, с использованием которых было получено 96% точек ЦМР. Остальные точки были набраны во время визуального контроля результатов измерений с помощью программы-стереоредактора после обработки каждой из стереопар. Общее количество измеренных точек составляет около 1 000 000 на всю обрабатываемую территорию. Полученная ЦМР использовалась для построения горизонталей и при ортотрансформировании аэрофотоснимков.

Границы оледенения определялись в режиме визуального дешифрирования при стереоскопическом рассмотрении снимков, увеличенных в стереоредакторе приблизительно до масштаба 1:5 000, что позволило изобразить их достаточно точно.

Особое значение при мониторинге ледников имеет определение изменения высоты поверхности ледника, на основе чего устанавливается изменение его объема. Традиционно для этого используются картометрические способы определения по разновременным картографическим материалам. Однако большая трудоемкость картографирования ледников на основе материалов фототеодолитной съемки или аэрофотоснимков и стремление повысить точность определения изменений путем использования материалов повторных съемок без предварительного создания по ним карт обусловили необходимость их непосредственного совмещения на универсальных приборах. При таком способе стереопары повторной съемки ориентировались по картам, составленным на основе более ранних съемок. Измерения проводились при наведении визирного устройства координатографа на горизонталь карты или узел регулярной сетки и одновременном наведении марки стереоавтографа на поверхность стереомодели. Наведение на горизонталь не требует интерполяции рельефа по карте. Измерения в узлах регулярной сетки, напротив, предусматривают такую интерполяцию, но они предпочтительнее при восстановлении непрерывной поверхности изменения высоты. Обе разновидности этого способа позволяют определять изменения высоты точнее, чем картометрическими способами.

Иллюстрации визуальных наблюдений стереомодели смещения, составленной из двух повторных снимков на примере изменений одного из ледников Эльбруса, можно найти в учебных материалах Межуниверситетского аэрокосмического центра (http://www.geogr.msu.ru/science/aero/acenter/int_sem5/sem5_1.htm). Высокая трудоемкость такого способа и его ограничения, связанные с техническими возможностями совмещения повторных снимков и карт, стали причиной перехода к аналитическим способам обработки снимков. Предпринимались попытки определения изменения высот путем сравнения ЦМР, построенных по разновременным стереопарам. Экспериментально было установлено, что при наборе точек по регулярной или какой-либо произвольной сетке, при использовании структурных линий или других способов детализации поверхностей, полученных по независимо измеряемым стереопарам, не удастся значительно повысить точность определений, а аналитически полученная поверхность изменений существенно отличается от реальной. Выход был найден в проведении согласованных измерений стереопар – в одних и тех же

точках с предварительно заданными плановыми координатами (Золотарев, Харьковец, 1996). В этом случае значение изменения высоты в точке получается непосредственно, без промежуточных интерполяций, с существенно более высокой точностью, обеспечиваемой применением аналитических способов. При необходимости расположение точек может соответствовать узлам регулярной сетки в плановой системе координат. Это стало возможным после появления стереокомпараторов, передающих значения измеряемых координат снимков непосредственно на вычислительную систему, что позволяет при известных элементах внешнего ориентирования снимков производить взаимный пересчет координат снимков и местности непосредственно во время наведения стереоскопической марки на поверхность ледника. Тем самым корректируются координаты марки и достигается ее положение на поверхности ледника в точке с необходимыми плановыми координатами.

Накоплен *опыт изучения и оценки состояния природных и природно-антропогенных экосистем ООПТ*. Например, в работе (Тишков, Малышев, 2006) всесторонне рассматривается использование спутниковой информации для дистанционного мониторинга состояния экосистем ООПТ. Особо отмечен тот факт, что размеры ООПТ и использование для их мониторинга данных дистанционного зондирования тесно связаны. При мониторинге ООПТ различного уровня (регионального, субрегионального и локального) первостепенное значение имеет пространственное разрешение, с которым была получена информация. Размеры ООПТ различаются от нескольких сот гектаров (некоторые участки кластеров степных заповедников, заказников и памятников природы) и тысяч гектаров (небольшие участки лесных и горных заповедников, национальных парков и заказников) до сотен тысяч и миллионов гектаров (арктические, тундровые и таежные заповедники и национальные парки). Аналогичным образом меняются и объекты наблюдений при мониторинге. Например, полосы отчуждения линейных сооружений – 30–100 м при их протяженности в границах ООПТ от нескольких десятков метров до десятков и сотен километров. Природные объекты мониторинга более масштабны, если речь идет об оценке состояния экосистем площадью от сотни до нескольких тысяч гектаров (нефрагментированные массивы тундр, тайги, степей, пустынь, высокогорий), или, наоборот,

имеют «миниатюрные размеры» (очаги загрязнения и механических нарушений – десятки и сотни метров по площади, очаги подтопления и изменения гидрологического режима – сотни и первые тысячи м), зоогенные нарушения растительности и пр.

В таблице 5 представлена сводная характеристика возможностей проведения мониторинга объектов разных типов, расположенных на ООПТ с указанием наиболее подходящих для этой цели видов данных дистанционного зондирования.

Таблица 5

Природные и техногенные объекты ООПТ для мониторинга с помощью спутниковых систем дистанционного зондирования
(по Тишков, Малышев, 2006)

Процессы, наблюдаемые при дистанционном мониторинге	Многоспектральные сканирующие системы с пространственным разрешением 20–50 м		Спутниковые системы с пространственным разрешением 1–8 м	
	природные объекты	техногенные объекты	природные объекты	техногенные объекты
Природные сезонные и погодичные флуктуации растительности	Ландшафты, растительные сообщества, массивы лесов и тундр, степные кластеры, участки болот, поймы средних и крупных рек	Состояние растительности вдоль магистральных трубопроводов, ЛЭП-250, ЛЭП-500, вдоль транспортных коридоров федеральных трасс, плотины и дамбы на средних и крупных реках, сельхозугодья в границах ООПТ	Границы ландшафтов и растительных сообществ, граница леса на северном и южном пределах, верхняя граница леса в горах, поймы малых рек, полосы «лес – степь», «лес – болото» и пр.	Полосы отчуждения федеральных и региональных автомобильных и железных дорог, газо- и нефтепроводов, состояние противопожарных полос, границ с сельхозугодьями, рекреационными зонами и пр.
Первичные и вторичные сукцессии растительности	Аллювиальные ландшафты, дельты, острова, высокогорья, крупные гари и ветровалы (десятки и сотни тыс. га). полосы схода селевых потоков и пр.	Эродированные сельскохозяйственные земли, сбитые пастбища, отвалы, спущенные и вновь созданные водохранилища, нарушенные при строительстве линейных сооружений земли и пр.	Меловые обнажения, поймы малых рек, экотоны растительных сообществ, острова леса в тундре, березовые и осиновые колки в лесостепи, морены, ложбины стока, мелкие гари	Локальные нарушения целостности растительного покрова, следы гусеничного транспорта, заброшенные скважины, зимники, места форсирования берегов рек наземным транспортом, пятна разливов нефти и др.

Последствия климатических изменений	Зональные экотоны: тундра – тайга, хвойные и широколиственные леса, дубравы – степи, лиственничники – степи, верхняя граница леса и субальпийской растительности в горах	Очаги активизации техногенной эрозии, участки с нарушениями мерзлотного режима почвогрунтов вдоль трубопроводов и пр.	Граница растительных сообществ, природные пастбища копытных, местообитания редких видов, убежища крупных хищников, водоемы на ООПТ	Зоны влияния конкретных линейных сооружений и хозяйственных объектов на ООПТ
Последствия природных катастроф	Крупные участки нарушений (сотни метров и более): гари, оползни, сели, осыпи, карст и пр.	Участки нарушений (сотни метров и более) в границах влияния техногенных объектов	Участки нарушений (метры – десятки метров)	Участки нарушений в границах влияния техногенных объектов
Последствия техногенных процессов, в т.ч. локального, регионального и глобального загрязнения	Участки техногенных нарушений (сотни метров и более): разливы нефти, гибель растительности в зонах влияния атмосферных выбросов, кислотных дождей и пр.	Локальные нарушения (метры – десятки метров): пятна разливов нефти, участки загрязнения растительности, техногенные геохимические аномалии грунтов		
Последствия антропогенных изменений гидрологического режима	Зоны подтопления, дренирования, изменения паводкового режима, затопления водохранилищами, подтопляющего влияния на растительность, трансформации ледового режима водоемов и пр.	Зона локального влияния изменения гидрологического режима		
Биотические катастрофы и инвазии чужеродных видов	Крупные очаги инвазии чужеродных видов, размножения животных-вредителей сельского и лесного хозяйства, заросли растений, содержащих наркотические и психотропные вещества, фронтальное движение саранчи, катастрофически сбитые пастбища и др.	Локальные очаги хвое- и листогрызущих насекомых, катастрофические миграции животных, участки зоогенных повреждений растительности, локальные заросли растений, содержащих наркотические и психотропные вещества, и др.		

Возможности **организации системы мониторинга на охраняемой территории** с помощью данных дистанционного зондирования показаны авторами (Лабутина и др., 2009) на примере изучения распространения зарослей лотоса в Астраханском заповеднике. Известно, что дельта Волги обладает уникальными особенностями, связанными прежде всего с ее формированием в условиях существенных колебаний уровня приемного бассейна, Каспийского моря, которые сказываются на природных и хозяйственных геосистемах. Отмечается значительное усиление антропогенного воздействия на природные комплексы дельты и взморья в связи с расширением по-

исковых работ, а местами и добычей углеводородного сырья. В то же время нижняя часть дельты Волги и устьевое взморье еще в 1975 г. была включена в Список Конвенции о водно-болотных угодьях, имеющих международное значение (Рамсарская конвенция) и подлежит охране. Авторы отмечают особую актуальность мониторинговых исследований в дельте, опирающихся на применение данных дистанционного зондирования и разработку геоинформационных методов получения на их основе географически надежных результатов. Все компьютерные этапы работ выполнялись средствами системы ILWIS.

Основными исходными материалами выполненных работ служили на первых этапах аэрофотоснимки, позже космические снимки, полученные в разные годы съемочными системами с разным пространственным разрешением, а также многолетние полевые наблюдения совместно с сотрудниками заповедника, служившие базовой информацией при компьютерной обработке снимков.

Картографированию особенностей пространственного распространения лотоса орехоносного, занесенного в Красную книгу России, было уделено особое внимание, в частности, оценивалась возможность определения по дистанционным данным площади зарослей как показателя экологического состояния рамсарского водно-болотного угодья. Материалами для изучения особенностей распространения лотоса и создания разновременных карт Дамчикского участка заповедника и его охранной зоны и приустьевого взморья Волги в целом служили космические снимки за период 1977–2009 гг.

Сравнение двух методов обработки космических данных – компьютерной классификации и составления карт с применением как компьютерного, так и визуального дешифрирования – показало, что при определении площади зарослей оба метода дают сопоставимые результаты, а при изучении изменений в пространственном распределении сообществ преимущество имеет картографирование. На акватории Дамчикского участка наметилась тенденция разрушения некоторых старых зарослей наряду с укрупнением относительно молодых и формированием новых. Сопоставление компьютерными средствами фрагментов разновременных снимков Landsat 5 территории заповедника позволило выявить не только сезонные изменения в распространении лотоса, но и очень существенные различия в площади и состоянии отдельных зарослей в снимках разных лет.

В результате картографирования сообществ лотоса на всем приустьевом взморье в 1987 и 2009 гг. было установлено, что за этот период площадь растительных сообществ с участием лотоса возросла на 17,8 тыс. га. Одновременно с приростом произошло разрушение зарослей, существовавших ранее, на площади 10,7 тыс.га. Появление новых зарослей и разрастание существовавших отмечено в северной половине ареала распространения, а разрушение происходило в основном в его южной части.

Результаты изучения и картографирования распространения лотоса позволили сделать вывод о возможности мониторинга зарослей по дистанционным данным, определить три уровня наблюдений и сроки их проведения, рекомендовать космические снимки для использования на каждом из уровней. Мониторинг распространения лотоса орехоносного на приустьевой акватории дельты Волги предполагает определение площади и картографирование зарослей, сопоставляя наземные наблюдения и данные космической съемки разной периодичности и различного пространственного разрешения. Ежегодные наблюдения на детальном и локальном уровнях позволяют фиксировать изменения, вызванные метеорологическими и гидрологическими условиями года, а также тенденции разрушения или разрастания отдельных зарослей и причины, вызывающие их. На региональном уровне наблюдения с периодичностью в 5–7 лет могут обеспечить выявление многолетних изменений массивов лотоса в разных частях дельты под влиянием как антропогенных, так и природных факторов. Использование площади сообществ лотоса в качестве единственного показателя его распространения недостаточно, поскольку она не дает представления об особенностях и изменениях мест произрастания этого растения. Преимущества в этом отношении имеет карта. Точность определения изменений площади сообществ с участием лотоса, вычисленная по картам, зависит от пространственного и временного масштабов: надежные данные об изменениях суммарной площади и особенностях распространения лотоса можно получить лишь для протяженной территории и за значительный промежуток времени.

Комплексное картографирование аквальных ландшафтов мелководной акватории на Дамчикском участке Астраханского заповедника и создание серии электронных карт – еще один пример успешного применения космических снимков, материалов полевых обследований и методов картографирования на основе ГИС (Лабути-

на, 2005). Методика выполнения работ по созданию серии карт опиралась на совместные полевые работы с сотрудниками Астраханского заповедника в течение нескольких сезонов. Серия включает пять карт (рельеф дна, степень проточности, подводные грунты, водная растительность и аквальные ландшафты) в базовом масштабе 1:100 000. Обработка снимков и создание карт осуществлялись средствами программного пакета ILWIS. Были использованы космические снимки ЕТМ+ Ландсат и ASTER/Terra, на отдельных этапах работы также КФА-1000/Ресурс-Ф, МСУ-Э/Ресурс-О, HRV/SPOT. Предварительная обработка снимков включала приведение к системе координат, принятой для ранее составленных базовых слоев ГИС заповедника, улучшение пространственного разрешения снимков Landsat «замещиванием» панхроматического канала, а также создание вариантов цветных синтезированных изображений.

При создании карты рельефа дна проводились полевые измерения глубин, определение координат с помощью GPS-приемника, приведение полученных данных к условному нулю и построение изолиний. Изобаты, проведенные через 0,1 м, строились автоматически, но из-за крайне малых уклонов дна пришлось их скорректировать. Для этого изображение изолиний накладывали на разносезонные космические снимки: в период половодья с изображением мутневых выносов и в середине лета с наилучшим изображением растительности.

Основными источниками при картографировании водной растительности служили данные полевых наблюдений (описание видов растительности в точках с определенными координатами) и космические снимки. Методика составления карты включала компьютерную обработку (вычисление вегетационного индекса, классификацию растительных сообществ) и визуальное дешифрирование нескольких вариантов цветных синтезированных изображений. На карте показано пространственное распределение по акватории основных растительных сообществ.

Еще один объект изучения – направление стоковых течений и степень проточности – имеет особое значение, поскольку течения служат определяющим фактором на акватории. Направления течений распознавались визуально – по изображению мутневых выносов на снимках в оранжево-красном участке спектра. Их изображение может служить индикатором не только направления течения, но и сте-

пени проточности акватории, так как с увеличением расходов воды наблюдается практически линейное возрастание мутности волжских вод. Обработка снимков заключалась в квантовании изображений мутьевых потоков, суммировании результатов квантования и определении степени проточности.

Картографирование подводных грунтов осуществлялось на основе полевого отбора проб и лабораторного анализа гранулометрического состава грунтов. Полевых данных для компьютерной интерполяции было недостаточно (площадь акватории около 60 км²), поэтому для картографирования пространственного распространения грунтов в качестве индикатора использовали растительность. Для этого по предварительно отобраным пробам была выявлена связь между типом грунта и сообществами растительности.

Карта аквальных ландшафтов составлена в результате применения компьютерных методов совместного анализа всех описанных выше карт.

Это первая серия карт данной территории, она может служить основой для проведения мониторинга водных экосистем. На картах зафиксировано распределение водных экосистем на территории, с их помощью можно установить связь между отдельными компонентами экосистем. Например, выявлена тесная связь между растительностью и подводными грунтами, точнее, их верхним слоем толщиной до 20–25 см, в котором наблюдаются наибольшие пространственные различия. На участках с зарослями лотоса всегда формируются илистые грунты, поскольку эти растения образуют большую органическую массу. В противоположность этому на опесчаненных грунтах в 80% проб выявлены сообщества валлиснерии спиральной. Гранулометрический состав грунтов зависит от степени проточности: чем меньше проточность, тем больше содержание илистых фракций, поэтому на слабопроточных участках формируются илистые грунты, даже при практически полном отсутствии водной растительности. От степени проточности зависит и распределение растительных сообществ, их видовой состав и проективное покрытие. На участках с наиболее высокой скоростью течения произрастают валлиснерия и роголистник с низким проективным покрытием, со средней – сообщества лотоса, со слабой – подводные луга из роголистников и рдестов. Было также установлено, что при малых глубинах (до 1,6 м в межень) и преобладающей выровненности рельеф дна мало влияет

на формирование аквальных комплексов. Прделанная работа свидетельствует о том, что космические снимки с пространственным разрешением 15–20 м продолжают оставаться отличным материалом для решения географических задач и картографирования в масштабах 1:50 000–1:100 000. Снимки с разрешением 1–2 м полезны при создании обучающей выборки в дополнение к полевым данным. Для изучения и картографирования подводных объектов важно наличие в съемочной системе канала в участке спектра 0,4–0,5 мкм, более высокое пространственное разрешение не компенсирует отсутствие такого канала.

Заключение

В последнее время космическая съемка заняла прочное место в системе средств, применяемых при проведении мониторинга окружающей среды и ООПТ в частности. Перечень тематических задач, решаемых по данным дистанционного зондирования Земли настолько велик, что разработаны их классификаторы (Классификатор..., 2008). Широкое распространение снимков из космоса часто создает обманчивое представление о легкости получения надежной информации при их использовании. На самом деле получить достоверные данные о состоянии природных объектов и их изменениях во времени – довольно сложная и трудоемкая задача.

Надежность информации, извлеченной из съемочных материалов, в наибольшей степени зависит от нескольких факторов, основные из которых – свойства изучаемых объектов и квалификация исполнителя. Достоверность распознавания на снимке природных объектов в решающей степени обусловлена их спектральными свойствами, выраженностью границ, степенью изменчивости, а также наличием устойчивых взаимосвязей с другими объектами. Квалификация исполнителя предполагает, что помимо базовой природоведческой подготовки он должен обладать знанием теоретических основ дистанционного зондирования, опытом дешифрирования и владеть геоинформационными технологиями. Существенными факторами надежности результатов являются также качество (свойства) снимков и техническое обеспечение работы (компьютеры и программы), что в решающей степени зависит от финансирования.

Рекомендуемая учебная литература

Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И., Тутубалина О.В. Аэрокосмические методы географических исследований: учеб. для студентов вузов. М.: Академия, 2004. 306 с.

Лабутина И.А. Дешифрирование аэрокосмических снимков: учеб. пособие для студентов вузов. –М.: Аспект Пресс, 2004. 184 с.

Лурье И.К., Косиков А.Г. Теория и практика цифровой обработки изображений: учеб. пособие. М.: Научный мир, 2003. 168 с.

Тутубалина О.В. Компьютерный практикум по курсу «Космические методы исследования почв»: учеб. пособие / под ред. В.И.Кравцовой. М.: Географический факультет МГУ, 2009. 112 с.

Интернет семинары Межуниверситетского аэрокосмического центра
[<http://www.geogr.msu.ru/science/aero/acenter/seminars.htm>]

Дистанционное зондирование Земли. – Энциклопедия – Фонд знаний Ломоносов: <http://www.lomonosov-fund.ru/enc/ru/encyclopedia:01330>

Интернет-сайты

- 1. Сайты основных поставщиков данных дистанционного зондирования компаний**, на которых много полезной информации по некоторым основам дистанционного зондирования и возможностям применения данных дистанционного зондирования для изучения природных ресурсов Земли и мониторинга. Важно, что данные по космическим аппаратам дистанционного зондирования Земли и современным съемочным системам постоянно обновляются:

СканЭкс: <http://www.scanex.ru/ru/data/index.html> и

Совзонд: <http://www.sovzond.ru/dzz/>

- 2. Тематические сайты на базе оперативной космической информации:**

- Портал Минприроды и экологии РФ по оперативному выявлению возгораний на ООПТ федерального значения России <http://fires.rfimnr.ru/api/index.html>
Анонс: <http://www.mnr.gov.ru/part/?act=more&id=7555&pid=11> ,
- Пожарный сервис SFMS http://www.scanex.ru/ru/news/News_Preview.asp?id=n23810191
- Пожарный сервис FIRMS <http://firefly.geog.umd.edu/firemap/>
- Проект НП «Прозрачный мир» по мониторингу ООПТ <http://new.transparentworld.ru/ru/environment/monitoring/oopt/>
- Сервис по ЧС Геологической службы США <http://nhss.cr.usgs.gov> (информация по вулканам, землетрясениям)

- 3. Общедоступные картографические сайты:**

- Яндекс- карты, Google Maps
- OpenStreetMap («открытая карта улиц») <http://www.openstreetmap.org/>, сокращённо OSM — некоммерческий сетевой картографический проект по созданию силами сообщества участников-пользователей Интернета (зарегистрированных участников уже более 350 тысяч) подробной свободной и бесплатной карты всего мира (не только улиц). Все данные доступ-

ны для легального копирования, редактирования и коммерческого использования по свободной лицензии Creative Commons Attribution-ShareAlike 2.0 Generic

- Викимания (WikiMapia): <http://wikimapia.org/> — проект, объединяющий информацию Google Maps с технологией вики («каждый может добавить информацию»). Основан А. Корякиным и Е. Савельевым 24 мая 2006 года. Его заявленной целью является описание географических объектов всей планеты, которое создается преимущественно на базе изображений Google Earth. С декабря 2010 данные Викимании доступны по лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 Unported.

4. Сайты - технические помощники, обеспечивающие в режиме форумов, помощь в решении многих практических вопросов получения и обработки пространственных данных, включая топографические карты, снимки, цифровые модели рельефа и мн. др.

<http://gis-lab.info/qa/> -

<http://giscraft.ru/index.shtml>

<http://www.geofaq.ru/>

Используемая литература

1. Аэрокосмические снимки в изучении высокогорья. Динамика оледенения. Стихийно-разрушительные явления // Интернет-семинары Межуниверситетского аэрокосмического центра [http://www.geogr.msu.ru/science/aero/acenter/int_sem5/int_sem5.htm].
2. Барталев С.А., Исаев А.С., Лулян Е.А. Современные приоритеты развития мониторинга бореальных экосистем по данным спутниковых наблюдений // Сиб. экол. журн. 2005. № 6. С. 1039–1054.
3. Золотарев Е.А. Эволюция оледенения Эльбруса: Картографо-аэрокосмические технологии гляциологического мониторинга. М.: Научный мир, 2009. 230 с.
4. Золотарев Е.А., Харьковец Е.Г. Применение методов автоматизированного картографирования и цифровой фотограмметрии для мониторинга ледника Джанкуат в Приэльбрусье. // Интеркарто 2: ГИС для изучения и картографирования окружающей среды. Материалы международной конференции (Иркутск, 26–29 июня 1996 г.), 1996.
5. Золотарев Е.А., Харьковец Е.Г. Оледенение Эльбруса в конце XX в. (цифровая ортофотокарта Эльбруса на 1997 г.) // Материалы гляциологических исследований. 2000. Вып.89. С. 175–181.
6. Золотарев Е.А., Харьковец Е.Г. Оценка деградации оледенения Эльбруса методами цифрового картографирования // Вестник Моск. ун-та. Сер.5. География. 2007. №5. С. 45–51.
7. Классификатор тематических задач оценки природных ресурсов и окружающей среды, решаемых с использованием материалов дистанционного зондирования Земли. Редакция 7. Иркутск: ООО «Байкальский центр», 2008. 80 с.
8. Князева С.В. Картографо-аэрокосмический мониторинг лесов национальных парков: Автореф. дис. канд. геогр. наук, М.: ВНИЛМ, 2006. 26 с.
9. Лабутина И.А., Балдина Е.А., Горбунов А.К. Распространение лотоса в дельте Волги по данным дистанционного зондирования // Труды Астраханского государственного природного биосферного заповедника. – Астрахань, 2009. – Вып. 14. – С. 56 – 65.

10. *Лабутина И.А.* Применение космических снимков при картографировании приустьевых взморья дельты Волги: тезисы 2-ой Междунар. конф. Земля из космоса – наиболее эффективные решения. 30.11–2.12 2005. М.: Медином. С.189–200.
11. *Мальшева Н.В., Князева С.В., Золина Т.А.* Использование ГИС-технологий для ведения мониторинга особо охраняемых природных территорий. № 3–4. М.: ВНИЦ-Лесресурс, 2000. 36 с.
12. *Мальшева Н.В., Орлова О.Л., Князева С.В., Золина Т.А., Вуколова И.А.* Мониторинг лесных экосистем национальных парков с использованием дистанционных методов и ГИС-технологий. Методические подходы и опыт работ // Лесхоз. информация. 2002. № 12. С. 19–24.
13. *Михеева А.И.* Пространственная изменчивость положения верхней границы леса в Хибинах (по материалам дистанционного зондирования) // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5. География. С.18–22.
14. Программные продукты для обработки материалов дистанционного зондирования [<http://loi.sgcc.ru/gis/RS/chapter108.html>].
15. *Сухих В.И.* Аэрокосмические методы в лесном хозяйстве и ландшафтном строительстве: учеб. для вузов. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2005. 392 с.
16. *Сухих В.И., Жулин В.М.* Применение сканерных космических снимков при инвентаризации резервных лесов // Дистанционные методы в лесоустройстве и учете лесов. Приборы и технологии: материалы Всероссийского совещания-семинара с международным участием. Красноярск: Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2005. С. 92–97.
17. *Тишков А. А., Мальшев В. Б.* Использование дистанционных методов для мониторинга состояния экосистем особо охраняемых природных территорий // Известия РАН., Сер. географическая. 2006, №6, С. 20–32.
18. Федеральный закон от 10.01.2002 N 7-ФЗ (ред. от 27.12.2009) «Об охране окружающей среды» (принят ГД ФС РФ 20.12.2001).
19. ILWIS – Remote Sensing and GIS software Integrated Land and Water Information System (ILWIS) [http://www.itc.nl/Pub/Home/Research/Research_output/ILWIS_-_Remote_Sensing_and_GIS_software.html].
20. ILWIS User Guide [<http://52north.org/communities/ilwis/ilwis-userguide>].

Основные характеристики доступных в настоящее время данных дистанционного зондирования из космоса

(по данным <http://www.scanex.ru/ru/data/comparsion.asp> и <http://www.sovzond.ru/satellites/>)

Прибор/ режим съемки	Спутник	Спектральный диапазон	Простран- ственное разрешение, м	Полоса обзора, км	Повторяемость съемки одной территории (для одного спутника)
PAN	IRS-1C/1D	0.5 – 0.75 (Панхроматич.)	5.8	70	1 раз в 5 суток
LISS-3		0.52 – 0.59 (Зеленый) 0.62 – 0.68 (Красный) 0.77–0.86 (БИК)	23	140	1 раз в 24 – 25 суток
LISS-4 / Mono		IRS-P6	0.62–0.68 (Красный)	5.8	70
LISS-4 / MX	0.52–0.59 (Зеленый) 0.62–0.68 (Красный) 0.77–0.86 (БИК)		5.8	23	1 раз в 5 суток
LISS-3	0.52 – 0.59 (Зеленый) 0.62 – 0.68 (Красный) 0.77 – 0.86 (БИК) 1.55 – 1.70 (Средний ИК)		23	140	1 раз в 24 суток
AWiFS	0.52 – 0.59 (Зеленый) 0.62 – 0.68 (Красный) 0.77 – 0.86 (БИК) 1.55 – 1.70 (Средний ИК)		55	740	1 раз в 5 суток
PAN-Fore	IRS-P5		0.50 – 0.85 (Панхроматич.)	2.5	29
PAN-Aft		26			1 раз в 5 суток
HRV PAN	SPOT 2	0.50 – 0.73 (Панхроматич.)	10	60	1 раз в 1–4 суток
HRV XS		0.50 – 0.59 (Зеленый) 0.61 – 0.68 (Красный) 0.78 – 0.89 (БИК)	20	60	1 раз в 1–4 суток
HRVIR MONO		SPOT 4	0.61 – 0.68 (Красный)	10	60
HRVIR XS	0.50 – 0.59 (Зеленый) 0.61 – 0.68 (Красный) 0.78 – 0.89 (БИК) 1.58 – 1.75 (Средний ИК)		20	60	1 раз в 1–4 суток
HRG PAN	SPOT 5		0.48 – 0.71 (Панхроматич.)	2.5 или 5	60
HRG XS		0.50 – 0.59 (Зеленый)	10	60	1 раз в 1–4 суток
		0.61 – 0.68 (Красный)	10		
		0.78 – 0.89 (БИК)	10		
		1.58 – 1.75 (Средний ИК)	20		
ETM+	Landsat 7	0.450 – 0.515 (Синий)	30	185	1 раз в 16 суток
		0.525 – 0.605 (Зеленый)	30		
		0.630 – 0.690 (Красный)	30		
		0.750 – 0.900 (БИК)	30		
		1.550 – 1.750 (Средний ИК)	30		
		10.40 – 12.50 (Тепловой)	60		
		2.090 – 2.350 (Средний ИК)	30		
		0.520 – 0.900 (панхроматич.)	15		

TM	Landsat 5	0.450 – 0.515 (Синий) 0.525 – 0.605 (Зеленый) 0.630 – 0.690 (Красный) 0.750 – 0.900 (БИК) 1.550 – 1.750 (Средний ИК) 10.40 – 12.50 (Тепловой) 2.090 – 2.350 (Средний ИК)	30 30 30 30 30 120 30	185	1 раз в 16 суток
PAN	EROS A	0.5 – 0.9 (Панхроматич.)	2.0	13.5	1 раз в 3–4 суток
PAN	EROS B	0.5 – 0.9 (Панхроматич.)	0.7	7	1 раз в 3–4 суток
Panchromatic	Ikonos	0.45 – 0.9 (Синий – БИК)	0.82	от 11.3 (в надири) до 13.8 (при откл. от надира на 26 град.)	1 раз в 3–4 суток
Multispectral		0.45 – 0.52 (Синий) 0.51 – 0.60 (Зеленый) 0.63 – 0.70 (Красный) 0.76 – 0.85 (БИК)	3.2		
Panchromatic	QuickBird	0.45 – 0.9 (Синий – БИК)	0.61 – 0.72	от 16.5 (в надири) до 20.8 (при откл. от надира на 25 град.)	1 раз в 2,4 – 5,4 суток
Multispectral		0.45 – 0.52 (Синий) 0.52 – 0.60 (Зеленый) 0.63 – 0.69 (Красный) 0.76 – 0.9 (БИК)	2.44 – 2.88		
MODIS	Terra Aqua	0.620 – 0.670 (Красный) 0.841 – 0.876 (БИК)	250	2 300	1–2 раза в сутки
		0.459 – 0.479 (Синий) 0.545 – 0.565 (Зеленый) 1.230 – 1.250 (БИК) 1.628 – 1.652 (Средний ИК) 2.105 – 2.155 (Средний ИК)	500		
		0.405 – 0.420 (Фиолетовый) 0.438 – 0.448 (Фиолетовый) 0.483 – 0.493 (Синий) 0.526 – 0.536 (Голубой) 0.546 – 0.556 (Зеленый) 0.662 – 0.672 (Красный) 0.673 – 0.683 (Красный) 0.743 – 0.753 (БИК) 0.862 – 0.877 (БИК) 0.890 – 0.920 (БИК) 0.931 – 0.941 (БИК) 0.915 – 0.965 (БИК) 3.660 – 3.840 (Тепловой) 3.929 – 3.989 (Тепловой) 3.929 – 3.989 (Тепловой) 4.020 – 4.080 (Тепловой) 4.433 – 4.498 (Тепловой) 4.482 – 4.549 (Тепловой) 1.360 – 1.390 (БИК) 6.535 – 6.895 (Тепловой) 7.175 – 7.475 (Тепловой) 8.400 – 8.700 (Тепловой) 9.580 – 9.880 (Тепловой) 10.780 – 11.280 (Тепловой) 11.770 – 12.270 (Тепловой) 13.185 – 13.485 (Тепловой) 13.485 – 13.785 (Тепловой) 13.785 – 14.085 (Тепловой) 14.085 – 14.385 (Тепловой)	1000		

ASTER / VNIR	Terra	0.52 – 0.60 (Зеленый) 0.63 – 0.69 (Красный) 0.76 – 0.86 (БИК) надирный 0.76 – 0.86 (БИК) обратный	15	60	1 раз в 4 – 16 суток
ASTER / SWIR		1.600 – 1.700 (Средний ИК) 2.145 – 2.185 (Средний ИК) 2.185 – 2.225 (Средний ИК) 2.235 – 2.285 (Средний ИК) 2.295 – 2.365 (Средний ИК) 2.360 – 2.430 (Средний ИК)	30	60	1 раз в 4 – 16 суток
ASTER / TIR		8.125 – 8.475 (Тепловой) 8.475 – 8.825 (Тепловой) 8.925 – 9.275 (Тепловой) 10.25 – 10.95 (Тепловой) 10.95 – 11.65 (Тепловой)	90	60	1 раз в 4 – 16 суток
МСУ-Э	Метеор-3М	0.50–0.590 (Зеленый) 0.61–0.690 (Красный) 0.81–0.900 (БИК)	50	76	1 раз в 5 суток
МСУ-Э	Ресурс-О1	0.50–0.590 (Зеленый) 0.61–0.690 (Красный) 0.81–0.900 (БИК)	35	45	1 раз в 6 суток
МСУ-СК		0,54–0,60 (Зеленый) 0,60–0,72 (Красный) 0,72–0,82 (БИК) 0,81–1,00 (БИК) 10,30–11,75 (Тепловой)	140	600	1 раз в 5 суток
Панхроматический Многозональный	Ресурс-ДК	(0,58–0,80 мкм)	1 м		1 раз в 6 суток
		Зеленый: 0,50–0,60 красный: 0,60–0,70 ближний ИК: 0,70–0,80	2–3 м		1 раз в 6 суток
Панхроматический	WorldView-1	(0.45 – 0.90мкм) (Панхроматич.)	0,5–0,6 м	17.6	1 раз в 1,7–5,4 суток
Панхроматический	WorldView-2	(0.45 – 0.90мкм) (Панхроматич.)	0,46 м	16,4	1–4 суток
Многозональный		синий: 0,45–0,52 зеленый: 0,52–0,59 красный: 0,63–0,69 ближний ИК: 0,76–0,90 новые каналы: 0,423–0,453 (прибрежный) 0,5–0,64 (желтый) 0,7–0,73 (крайний красный) 0,9–1,05(ближний ИК–2)	1,84 м		
Многозональный	RapidEye	синий: 0,44–0,51 зеленый: 0,52–0,59 красный: 0,63–0,685 крайний красный: 0,69–0,73 ближний ИК: 0,76–0,85	5 м	77	24 часа

Радиолокационные					
Fine (высокого разрешения)	SAR / Radarsat-1	С-диапазон, 5,6 см	8	50	от 1 раза в сутки до 1 раза в 6 суток*
Standard (стандартный)			25	100	
Wide (обзорный)			30	150	
Extended Low (Расширенный низкого разрешения)			35	170	
Узкий низкого разрешения ScanSAR Narrow			50	300	
Широкий низкого разрешения (SAR / ScanSAR Wide)			100	450 – 500	
Режим получения изображений (Image Mode)	ASAR / Envisat-1	С-диапазон, 5,6 см, с выбором одной из пяти вариации поляризации сигнала: VV, HH, VV/HH, HV/HH, или VH/VV	30	100	1 раз в 1–3 суток
Режим изменения поляризации (Alternating Polarisation Modes)			30	400	
Широкополосный и режим Глобального мониторинга (Wide swath and Global Monitoring mode)			150 – 1000*	1000	
Высокого разрешения (Fine)	Radarsat-2	5,6 см (С-диапазон),	8 x 8 м	50	От 2–3 суток
Стандартный (Standard)			25 x 26 м	100	
Обзорный (Wide)			30 x 26 м	150	
Узкий низкого разрешения (ScanSAR Narrow)			50 x 50 м	300	
Широкий низкого разрешения (ScanSAR Wide)		поляризации: HH, VV, HV, VH	100 x 100 м	500	

Расширенный низкого разрешения (Extended Low)		В разных режимах – разные сочетания поляризаций	40 x 26 м	170	
Расширенный высокого разрешения (Extended High)			18 x 26 м	75	
Высокого разрешения с полной поляризацией (Fine Quad-pol)			12 x 8 м	25	
Стандартный с полной поляризацией (Standard Quad-pol)			25 x 8 м	25	
Сверхвысокого разрешения (Ultra-Fine)			3 x 3 м	20	
Сверхвысокого разрешения (High Resolution SpotLight)	TerraSAR-X	X-диапазон, 3 см	1	10 x 5 **	1 раз в 1–3 суток
Высокого разрешения (SpotLight)			2	10 x 10	
Широкополосный высокого разрешения (StripMap)			3	30 x 50 **	
Обзорный среднего разрешения (ScanSAR)			16	100 x 150 **	

* В зависимости от режима съемки – сочетания пространственного разрешения и полосы обзора.

** Номинальный размер кадра, км.

Примерная стоимость* некоторых снимков высокого пространственного разрешения

* Стоимость снимков определяется поставщиком данных на момент поставки и зависит от разных факторов (например, площади, покрываемой снимками, новая съемка или материалы из архива и т.п.)

Стоимость снимков GeoEye-1 Ikonos и продуктов, созданных на их основе (в долларах за 1 км²) (по данным сайтов <http://www.landinfo.com/geo.htm> и www.telespazio.com):

Продукт	GeoEye-1	Ikonos
	(0.5 / 2.0 м.)*	(1.0 / 4.0 м.)*
Снимок, трансформированный	25.00	20.00
Снимок, ортотрансформированный	35.00	33.00
Архивные снимки	12.50	10.00

* 0.5 м и 1.0 м панхроматические (черно-белые) снимки или продукты на их основе; 2.0 м и 4.0 м – многозональные

Стоимость снимков со спутника WorldView-2 (действует с октября 2009 г.) и QuickBird (с 2001 г.) (в долларах за 1 км²): <http://www.landinfo.com/>

Вид продукта	Архивные материалы	Новая съемка
WorldView-2 Панхроматический (0,5 м) или многозональный (4 канала с разрешением 2,0 м) или цветной (3 канала и панхроматическое изображение)	14	20
QuickBird Панхроматический (0,60 м) или многозональный (4 канала с разрешением 2,44 м)	14	20

Интернет-каталоги космических снимков

- 1. Каталоги разнообразных типов снимков, различного разрешения** (в приблизительном порядке популярности, по О.В. Тубалиной, 2009, ссылки актуализированы на начало 2011 г.).

Зарубежные

USGS Earth Explorer – каталог Геологической службы США

<http://edcsns17.cr.usgs.gov/NewEarthExplorer/> – бесплатно – Landsat MSS, TM, ETM+; SPOT HRV (на территорию Северной Америки в 1986–1998 гг.); радиолокационные снимки SIR-C/X-SAR; а также ЦМР SRTM. За незначительную плату – аэрофотоснимки на США и отдельные районы мира; космические фотоснимки миссии CORONA (30 US\$ на ноябрь 2010). За плату – EO-1 АН, Hyperion, база постоянно пополняется. Организован новый доступ к этой базе на основе Java: <http://glovis.usgs.gov/>, через него доступны и некоторые снимки радиометра ASTER (Terralook).

Warehouse Inventory Search Tool (WIST) – каталог-портал доступа к данным центров НАСА и партнерских организаций
<https://wist.echo.nasa.gov/~wist/api/imswelcome/>

Бесплатно и за плату – Terra/Aqua MODIS, Terra M1SR, ICESat GLAS, Aqua AMSR/AMSR-E, Terra ASTER и др.

Earthnet – On Line Interactive Stand Alone client (EOLI-SA) – программа, обеспечивающая поиск снимков, распространяемых под эгидой Европейского Космического Агентства <http://earth.esa.int/EOLi/EOLi.html>: За плату и бесплатно – ENVISAT/ASAR, ERS/SAR, JERS/SAR, Proba/CHRIS, HRC Landsat, IKONOS, DMC, ALOS, SPOT/HRV(IR), Kompsat, IRS, Nimbus, NOAA, SCISAT, SeaStar, Terra/Aqua.

Gateway to Astronaut Photography of Earth: – <http://eol.jsc.nasa.gov/> – бесплатно – снимки, выполненные астронавтами и космонавтами с орбиты с 1961 г. (база данных НАСА).

Earth from Space – NASA Space Shuttle Earth Observations Photography database of images – <http://earth.jsc.nasa.gov/sseop/efs/> – бесплатно – избранные снимки с кораблей Shuttle с аннотациями.

Global Change Master Directory – <http://gcmd.gsfc.nasa.gov/>. Бесплатные данные, карты и снимки, собранные под эгидой программы изучения глобальных изменений.

Российские

ScanEx Satellite Image Catalogue – интерактивный каталог снимков, получаемых на приемные станции российского ИТЦ «СканЭкс») <http://catalog.scanex.ru/dewb/step1.pl> – платные снимки – IRS AWIFS, LISS, PAN; SPOT HRV(IR); RADARSAT SAR; Landsat 5 TM, EROS NA30.

Генеральный каталог российского Научного центра оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ) (преимущественно данные российских съемочных систем) http://sun.ntsomz.ru/data_new/ – платные снимки по программам МКФ-6, Ресурс-О, Ресурс-Ф, Природа, Метеор, Океан, Монитор, Ресурс-ДК, ERS-2 и др.

2. Каталоги, предлагающие снимки преимущественно очень высокого и сверхвысокого разрешения

Проект «Космоснимки» <http://www.kosmosnimki.ru> – геопортал ИТЦ СканЭкс, предлагающий поиск платных снимков со спутников IKONOS, QuickBird, EROS-A, EROS-B, WorldView-1, GeoEye-1 для последующего заказа, а также космических фотомонтажей («мозаики»).

DigitalGlobe ImageFinder <http://browse.digitalglobe.com/imagefinder/main.jsp>. Платные снимки – WorldView-1,2, QuickBird, аэроснимки на США и Канаду.

GeoFUSE Online Maps v Pl.O <http://geofuse.geoeye.com/maps/>. Платные снимки – IKONOS, GeoEye-1, OrbView-2.

Sirius Online Catalogue <http://sirius.spotimage.com/>. Платные снимки со спутников SPOT, KOMPSAT-2.

3. Каталоги снимков преимущественно относительно высокого разрешения

Earth Science Data Interface (ESDI) at the Global Land Cover Facility <http://glcfapp.umiaccs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>. Бесплатно – избранные снимки Landsat (Landsat MSS, TM, ETM+); Terra ASTER; а также ЦМР SRTM; фотокарты Landsat TM, ETM+.

4. Каталоги снимков преимущественно низкого разрешения
Comprehensive Large Array-data Stewardship System (CLASS),
электронная библиотека данных спутника NOAA по параметрам состояния
окружающей среды: <http://www.class.ncdc.noaa.gov/saa/products/welcome>
Бесплатно – Снимки со спутников NOAA.

MIRAVI – MERIS Images RApid Visualization – снимки, поступаю-
щие со спутника ENVISAT система MERIS, доступны в день получения в виде
синтезированного в естественных цветах изображения, ширина полосы обзора
больше 1000 км с разрешением 260 м: <http://www.miravi.eo.esa.int/about.html>

**5. Каталоги снимков низкого разрешения с геостационар-
ных спутников**

Geostationary Satellite Server – <http://www.goes.noaa.gov/>. Бесплат-
но – снимки с GOES и других геостационарных спутников.

Meteosat Image Services – [http://www.eumetsat.int/Home/Main/
Access_to_Data/Met//loi.ssc.ru/gis/RS/chapter108.htm](http://www.eumetsat.int/Home/Main/Access_to_Data/Met//loi.ssc.ru/gis/RS/chapter108.htm)

**Методическое пособие
Лабутина Ирина Алексеевна
Балдина Елена Александровна**

**Использование данных дистанционного зондирования
для мониторинга экосистем ООПТ**

Методическое пособие

Фото на обложке:

© *Hartmuth Jungius* / WWF-Canon

© *Леонид Круглов* / WWF России

Редактор: *Е.А. Воронкова*

Дизайн макета, верстка: *А.Ю. Филиппов*

Тираж: 100 экз.

Всемирный фонд дикой природы (WWF)
109240 Москва, а/я 3
ул. Николаямская, д. 19, стр. 3

Проект ПРООН/ГЭФ/МКИ
«Сохранение биоразнообразия в российской части
Алтае-Саянского экорегиона»
660062, г. Красноярск, ул. Крупской 42, офис 514
Тел./факс: (391) 247-91-12
<http://www.altai-sayan.com>

Лабутина И.А., Балдина Е.А.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЭКОСИСТЕМ ООПТ

Методическое пособие



Проект ПРООН/ГЭФ/МКИ «Сохранение биоразнообразия в российской части Алтае-Саянского экорегиона»

660062, г. Красноярск, ул. Крупской 42, офис 514

Тел./факс: (391) 247-91-12

<http://www.altai-sayan.com>



Миссия WWF

Остановить деградацию естественной среды планеты для достижения гармонии человека и природы.

www.wwf.ru

Всемирный фонд дикой природы (WWF):

109240 Москва, а/я 3, ул. Никопоямская, д. 19, стр. 3; тел: +7 (495) 727 09 39; факс: +7 (495) 727 09 38
russia@wwf.ru