

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ В ГИДРОБИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

© 2012 К.С. Ткаченко

Поволжская государственная социально-гуманитарная академия, г. Самара

Поступила 17.01.2011

В обзоре представлены основные типы и технические параметры аэрокосмической съемки, используемой для дистанционного зондирования морского дна. Приведены основные принципы дешифрования и обработки снимков для гидробиологических исследований. На конкретных примерах рассмотрено использование аэрокосмических изображений для картирования, классификации и мониторинга бентосных сообществ верхней части морского шельфа, таких как коралловые рифы, водоросли и морские травы. Показаны перспективы использования спектральных характеристик гидробионтов и неорганических компонент биотопов в дешифровании аэрокосмических изображений дна.

Ключевые слова: аэрокосмическая съемка, дистанционное зондирование, дешифрование, морской шельф, бентосные сообщества.

ТИПЫ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

При использовании аэрокосмической съемки в гидробиологических исследованиях наибольшие перспективы имеет зондирование морского дна в видимой части спектра. Прозрачность морской воды можно охарактеризовать коэффициентом относительного пропускания солнечного спектра [2, 3, 9], и она меняется в зависимости от длины волны излучения (λ). Видимая часть спектра (диапазон 400-750 нм) пропускается водой значительно лучше, чем излучение в ультрафиолетовом или инфракрасном диапазоне. С увеличением мутности воды пропускание излучения в видимой части спектра уменьшается. В водах открытого океана, обладающих наибольшей прозрачностью, излучение с длиной волны 465 нм (сине-зеленая часть спектра) имеет максимальный коэффициент пропускания, соответственно, в прибрежных водах значение этого коэффициента сдвигается в область излучения с большей длиной волны. Таким образом, диапазон колебания пропускания солнечного спектра для морской воды варьирует от 455 (самые прозрачные воды) до 575 нм (самые замутненные воды). Основная причина этих различий состоит в том, что растворенное в морской воде органическое вещество избирательно поглощает коротковолновое излучение, и в результате в прибрежной зоне максимум пропускания переходит в область более длинных волн. Поэтому неизбежно актуальным становится использование мультиспектральной съемки высокого разрешения (1-15 м) в диапазоне 455-750 нм (включая ближнюю инфракрасную зону) с разделением максимально большого количества спектральных каналов. В зависимости от спектрального диапазона съемки, существуют три типа аэрокосмических снимков земной и водной поверхности: панхроматические, спектрзональные, многозональные (мультиспектральные) и гиперспектраль-

ные [5, 7]. Все они охватывают широкий диапазон отраженного солнечного излучения, но отличаются друг от друга по ширине и количеству полос снимаемых спектров.

Таблица 1. Спектры электромагнитного излучения, используемые в аэрокосмосъемке

Диапазоны спектра		Длина волны
Ультрафиолетовый		<0,4 мкм
Видимый	Синий	0,40-0,45 мкм
	Голубой	0,45-0,48 мкм
	Зеленый	0,48-0,50 мкм
	Желтый	0,50-0,56 мкм
	Оранжевый	0,56-0,59 мкм
Инфракрасный	Красный	0,59-0,75 мкм
	Ближний (NIR)	0,75-1,3 мкм
	Средний (SWIR)	1,3-3,0 мкм
Радиодиапазон	Дальний, тепловой (TIR)	3,0-15 мкм
	Ка	0,8-1,1 см
	К	1,1-1,7 см
	Ku	1,7-2,4 см
	X	2,4-3,8 см
	C	3,8-7,5 см
	S	7,5-15 см
L	15-30 см	
P	30-100 см	

В табл. 1 представлены диапазоны и длины волн электромагнитного солнечного излучения, которые фиксируются различными приборами при дистанционном зондировании Земли (ДЗЗ). **Панхроматические** изображения фиксируют отраженный от объектов на местности световой поток в одном широком спектральном диапазоне (450-900 нм), который включает практически весь видимый и ближний инфракрасный диапазоны электромагнитного спектра. Поэтому они являются черно-белыми. При **спектрзональной** съемке используются определенные светофильтры и одновременно фиксируются 2 или 3 зоны спектра в реальных или условных

цветах на одной и той же фотопленке или цифровом носителе, изображения в этих зонах уже реально неразделимы.

Таким способом увеличивается контрастность оттенков серого тона между различными образами объектов ландшафта, тем самым усиливается их различимость и дешифрируемость, и в конечном итоге – информативность. Чтобы лучше уловить спектральную специфику объектов и использовать ее при дешифровании, применяется **многозональная (мультиспектральная)** съемка, когда одновременно, но раздельно фиксируются несколько изображений в различных зонах спектра на отдельных (до четырех) синхронизированных камерах, имеющих идентичные светотехнические характеристики объективов, в различных спектральных диапазонах. Отдельно подобранный для каждой камеры узкополосный (иногда интерференционный) светофильтр позволяет регистрировать отраженный от объектов световой поток в строго ограниченных зонах спектра. Чаще всего используются такие светофильтры, которые позволяют регистрировать электромагнитное излучение только в голубой, зеленой, красной или инфракрасной зонах спектра. При использовании оптических цифровых сканирующих устройств вместо аналоговых фотокамер, количество рабочих зон спектра при съемке может быть и больше четырех, вплоть до нескольких десятков и даже сотен узких спектральных зон. Если этих зон больше 16, то такие снимки уже называют не многозональными или мультиспектральными, а **гиперспектральными**. Такие съемки позволяют изучать спектры отражения объектов местности столь детально, что можно определить типы и даже конкретные виды растительности, горные породы и почвы, определить состав пленки загрязнений на поверхности воды, материал, из которого выполнено дорожное покрытие и многое другое. Мультиспектральный сенсор формирует несколько изображений на отдельных узких полосах видимого до инфракрасного спектра, а гиперспектральный сенсор одновременно формирует изображения на всех участках спектрального диапазона. Гиперспектральная съемка является эволюционным развитием мультиспектральных систем, когда благодаря новым технологиям количество каналов сбора информации увеличивается с 3-7 до 200 и более при достижении высокого спектрального разрешения (от 0,1 до 10 нм), в результате чего формируется многомерное пространственно-спектральное изображение, в котором каждый элементарный участок изображения (пиксель) характеризуется собственным спектром [6]. Такое изображение носит название «куба» информации, два измерения которого соответствуют пространственному изображению местности на плоскости, а третье – частоте спектра принятого излучения. Тем не менее гиперспектральная съемка к настоящему времени остается наиболее сложной и трудоемкой по сравнению с более традиционной многозональ-

ной и панхроматической съемкой в связи с трудностями в передаче и обработке гигантских объемов сложного информационного массива, который требует повышенного усложнения алгоритмов анализа и программного обеспечения.

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

Технические возможности съемочной аппаратуры ДЗЗ можно охарактеризовать тремя основными параметрами: пространственным, спектральным и радиометрическим разрешением [4, 5]. **Пространственное разрешение** – величина, характеризующая размер наименьших объектов, различимых на изображении. В зависимости от пространственного разрешения на снимках можно различать объекты, сопоставимые с величиной единичного элемента разрешения (пикселя). К примеру, если пространственное разрешение снимка равно 1 м, то в одном пикселе изображения уместится 1 м² снимаемой поверхности. В настоящее время лучшим для спутниковых изображений считается пространственное разрешение 50 см, для аэрофотоснимков – 10 см. Спутниковые изображения высокого разрешения (меньше 1 м), безусловно, имеют преимущества перед аэрофотосъемкой по большей обзорности и возможности работы в труднодоступных районах водной и земной поверхности. Однако такие изображения пока не доступны широкому кругу пользователей по причине секретности и ограничения авторским правом. Более того если, начиная с 1999 г. с момента запуска первого коммерческого спутника Ikonos с пространственным разрешением в 1 м (в панхроматическом режиме), снимки такого разрешения стали доступны для обычных пользователей, в России в соответствии с существующим российским законодательством снимки с разрешением менее 2 м поставляются заказчикам только через первый отдел. **Спектральное разрешение** определяется шириной и количеством спектральных полос, которые способен фиксировать прибор. Очевидно, гиперспектральные сканеры имеют наибольшее спектральное разрешение. **Радиометрическое разрешение** снимка определяется количеством градаций значений цвета, соответствующих переходу от яркости абсолютно «черного» к абсолютно «белому», и выражается в количестве бит на пиксель изображения. Это означает, что в случае радиометрического разрешения 6 бит на пиксель снимок имеет 64 градации цвета ($2^6 = 64$); в случае 8 бит на пиксель – 256 градаций ($2^8 = 256$), 11 бит на пиксель – 2048 градаций ($2^{11} = 2048$). В настоящее время, как правило, сенсоры, установленные на спутниках ДЗЗ, имеют радиометрическое разрешение не хуже 8 бит на пиксель. Есть сенсоры и с более высоким радиометрическим разрешением (например, 11 бит для WorldView-1, Ikonos, QuickBird, OrbView-3 и 16 бит для EO-1), позволяющим различать больше деталей на очень ярких или очень темных областях снимка.

Для дешифрирования многозональных аэрокосмических снимков существуют так называемые мультиспектральные проекторы или компьютерные программы, которые комбинируют полученные в разных зонах спектра снимки или выполняют оптический синтез. Оптический синтез облегчает распознавание не только спектральных различий на многозональных изображениях, но также позволяет проследить динамические различия в оптимальном для решаемой задачи диапазоне с течением времени. При синтезе можно одновременно использовать 2-4 полученные в разных спектральных диапазонах фотографии, каждая из которых проектируется в отдельном оптическом канале на общий для всех каналов экран при увеличении линейных размеров изображения в 5 раз. Разные цветовые сочетания обеспечиваются с помощью специальных светофильтров (синего, зеленого, красного и др.), имеющихся в каждом оптическом канале. Мультиспектральные проекторы и программное обеспечение позволяют совмещать проекции 3-4 зональных черно-белых изображений, в результате на экране получается общее совмещенное изображение, окрашенное в натуральные или условные цвета, которое используется для визуального дешифрирования. Кроме того, с изображениями проводится процесс геометрической коррекции, или «ортотрансформирования», во время которого вносятся поправки за существенные геометрические неточности, которые могут быть обусловлены топографией, геометрией камеры и ошибками сенсора [http://eng.ntsomz.ru/ks_dzz/faq_dzz]. В результате ортотрансформирования получается планиметрически точное изображение. Большинство пользователей проводят ортотрансформирование спутниковых изображений потому, что задачи, для которых они собираются использовать эти изображения, требуют очень высокой точности позиционирования или однородного масштаба по всему изображению. После ортотрансформирования становится возможным проведение измерения по изображению, определение точного местоположения деталей изображения, получение информации для ГИС, объединение изображения с другими таким же образом трансформированными изображениями для проведения более сложных исследований. Непосредственно дешифрирование аэрокосмоснимков представляет собой процесс распознавания объектов на изображении, определения качественных и количественных характеристик этих объектов, изучения ландшафтообразующей и экологической роли различных факторов [16].

СЪЕМОЧНАЯ АППАРАТУРА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Съемочная аппаратура для проведения вышеназванных типов аэрокосмических съемок может быть фотографической (аналоговой или цифровой) и сканирующей (оптико-механические сканеры).

Фотоизображения получают достаточно сложными оптическими фотосистемами, состоящими из нескольких модулей, весь фотографический комплекс может весить более 150 кг. В настоящее время аналоговая аэрокосмическая фотоаппаратура, использующая кассеты с фотопленкой или магнитной лентой, уступает свое место цифровым фотокамерам, с большими возможностями при меньших затратах и габаритах. К примеру, цифровая многозональная камера авиационного базирования UltraCam Xp с разрешением до 3 см способна делать 196-мегапиксельные снимки, а пропускная способность ее дисковой подсистемы составляет 2,5 Гб/с [<http://www.microsoft.com/ultracam/en-us/UltraCamXp.aspx>]. Камера работает в 4 каналах спектра: трех видимых (RGB) и ближнем инфракрасном. Фотосъемка производится одновременно в 4 каналах, и данные синтезируются камерой для получения изображений в естественных цветах при сохранении высокой разрешающей способности. В устройстве имеются 14 процессоров, благодаря которым изображения в формате TIFF и JPEG обрабатываются в реальном времени. Для хранения отснятого материала используется ряд накопителей общим объемом 4,2 Тб. Камера имеет относительно небольшой вес 55 кг и может использоваться вместе со стандартными гиростабилизированными штативами. Разработкой изделий в серии UltraCam занимаются специалисты из компании Vexcel Imaging, приобретенной компьютерным гигантом Microsoft в 2006 г. В случае установки фотокамер на орбитальные спутники данные передаются в центры обработки в спускаемых капсулах или по радиоканалу.

С усовершенствованием технологий ДЗЗ активно стали использоваться оптико-механические сканеры с высокочувствительными сенсорами. При помощи сканеров формируются изображения, состоящие из множества отдельных, последовательно получаемых элементов. Хотя сканеры нельзя напрямую отнести к фотоаппаратуре, о которой в основном идет речь в этой книге, исключение обзора их возможностей дало бы неполную картину обширного набора методов дистанционного зондирования океана из космоса и атмосферы с получением изображений различного характера и предназначения. «Сканирование» обозначает развертку изображения при помощи сканирующего элемента (качающегося или вращающегося зеркала), поэлементно просматривающего местность поперек движения носителя и посылающего лучистый поток в объектив и далее на точечный датчик, преобразующий световой сигнал в электрический, который затем записывается на электронные носители и передается по каналам связи на приемные станции. В качестве объектива на сканерах используются уже не линзовые, как в фотографических, а зеркальные телескопы, в качестве же приемника (датчика) электромагнитного излучения применяется не фотопленка, а полупроводниковые приборы с

зарядовой связью (ПЗС-матрицы), из таких матриц состоит фотоприёмное устройство, которое размещается в фокальной плоскости оптической системы. При съёмке земной поверхности с помощью сканирующих систем формируется изображение, каждому элементу которого соответствует яркость излучения участка, находящегося в пределах мгновенного поля зрения. Таким образом, сканерное изображение – это упорядоченный пакет яркостных данных, которые фиксируются в цифровом виде на магнитную ленту и затем могут быть преобразованы в кадровую форму. В варианте многозонального сканера регистрируется собственное излучение объектов ландшафта одновременно во многих спектральных каналах (в большом диапазоне длин волн) на многополосной широкой магнитной ленте [5]. Многозональные сканеры, устанавливаемые для орбитальных измерений со спутников, как правило, имеют от 4 до 12 спектральных каналов. Интенсивность излучения в отдельных зонах спектра принимается специальными детекторами или, точнее, блоками детекторов, фассеты которых подобраны для оптимальной работы в режиме определенного интервала длин волн. В отличие от аналоговой фотоаппаратуры, спектральный диапазон которой ограничен видимым и ближним инфракрасным излучением (0,4-0,9 мкм), фотосканеры предполагают съёмку в широком диапазоне спектра солнечного излучения – от ультрафиолетового до теплового инфракрасного (0,3-14 мкм). Для съёмки в видимом и ближнем ИК-диапазоне ПЗС-матрицы, как правило, делают на основе кремния, для среднего ИК-диапазона (3-5 мкм) – соответственно, на основе охлаждаемого антимонида индия и для дальнего ИК-диапазона (8-14 мкм) – на основе охлаждаемого ртутно-кадмиевого теллурида [1]. Важнейшей характеристикой сканера являются угол сканирования (обзора) и мгновенный угол зрения, от величины которого зависят ширина снимаемой полосы и разрешение изображения. В зависимости от величины этих углов сканеры делят на точные и обзорные. У точных сканеров угол сканирования небольшой ($\pm 5^\circ$), а у обзорных сканеров он увеличен до $\pm 50^\circ$. Величина разрешения при этом прямо пропорциональна ширине снимаемой полосы. С развитием гиперспектральной съёмки находит применение элементная база для фотоприёмников, которые уже позволяют регистрировать излучение в 256 узких (по 10 нм) спектральных зонах, формируя целый «куб изображений». Зарегистрированные фотоприёмником сигналы усиливаются, преобразуются в цифровую форму, помещаются в бортовое ЗУ.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ В ГИДРОБИОЛОГИИ

Прежде всего фото- и сканерная съёмка с авиакосмических носителей используется для построения батиметрических карт и картирования донной топографии на мелководьях. К примеру, точность

батиметрических измерений по соотношениям цветных плотностей на многозональных снимках спутников серии SPOT составляла 90% до глубины 25 м, а в чистой воде океанских островных побережий батиметрия по снимкам возможна и до глубины 40 м [8, 22].

Но непосредственно в гидробиологических исследованиях аэрокосмическая съёмка наиболее задействована в картировании и многолетнем мониторинге ландшафтно-бентосных комплексов в верхней части морского шельфа, что является одной из важнейших задач современной гидробиологии. Наблюдаемые природные объекты, по которым дешифрируются компоненты ландшафта, называются индикаторами, а сам метод именуется ландшафтным методом дешифрирования [16]. В нашей стране большой вклад в развитие этого направления внес К.М. Петров [10-16]. Выделяют три группы индикаторов: геологические, геоморфологические и биологические. Геологические индикаторы – это тектоническая структура дна, петрографические особенности коренных пород, геоморфологические индикаторы – типы и формы подводного рельефа и биологические индикаторы соответственно донные биоценозы. Существует закономерная связь определенных типов и форм подводного рельефа, петрографических особенностей коренных пород, тектонического строения и группировок донных организмов. В то же время эти индикаторы обладают разными спектральными характеристиками, определяющими их принадлежность при анализе спектральных снимков. Дешифрирование осуществляется по общепринятой схеме: предварительное дешифрирование → судовые и подводные (водолазные) исследования → камеральное дешифрирование → контроль. На первом этапе на снимках выделяются основные типы рисунков и создается контурная карта изображений морского дна. Затем проводятся полевые исследования, которые позволяют связать особенности изображений на аэрокосмоснимках со свойствами природных объектов на дне. Работы организуются методом изучения ключевых участков и проведения ландшафтных профилей. Число участков, отношение занятой ими площади к общей площади съёмки, а также тип, число и протяженность профилей зависят от масштаба съёмки и служат важнейшим показателем кондиционности составляемых ландшафтных карт. На ключевых участках раскрывается структура картографируемых объектов, выделяются индикаторы. В дальнейшем именно выявленные индикаторы позволяют распознавать однотипные природные комплексы и экстраполировать на них характеристики, полученные на ключевых участках. Метод ключей основан на типологических свойствах подводных ландшафтов и благодаря ему сокращается весь объем работ: отпадает необходимость описания каждого контура, если по ряду признаков его можно отнести к уже известному типу. Контурные донных ландшафтных

профилей проводят методами экстраполяции и интерполяции. Для этого создают ряд фотографических эталонов, которые взаимно дополняют друг друга. Эти эталоны могут представлять собой отдельные вырезки из снимка, характеризующие четко выделяющиеся и интерпретируемые объекты и явления, снимки целых ключевых участков, отображающие в полной мере особенности их ландшафтной структуры, или участки снимков (поло-

сы), отображающие характерное сочетание сопряженных природных комплексов. Значение аэрофотографических эталонов состоит в том, что с их помощью осуществляется камеральное дешифрирование материалов аэрокосмосъемки новых, не исследованных акваторий методом экстраполяции дешифровочных признаков. Достоверность экстраполяции определяется контрольными проверками.

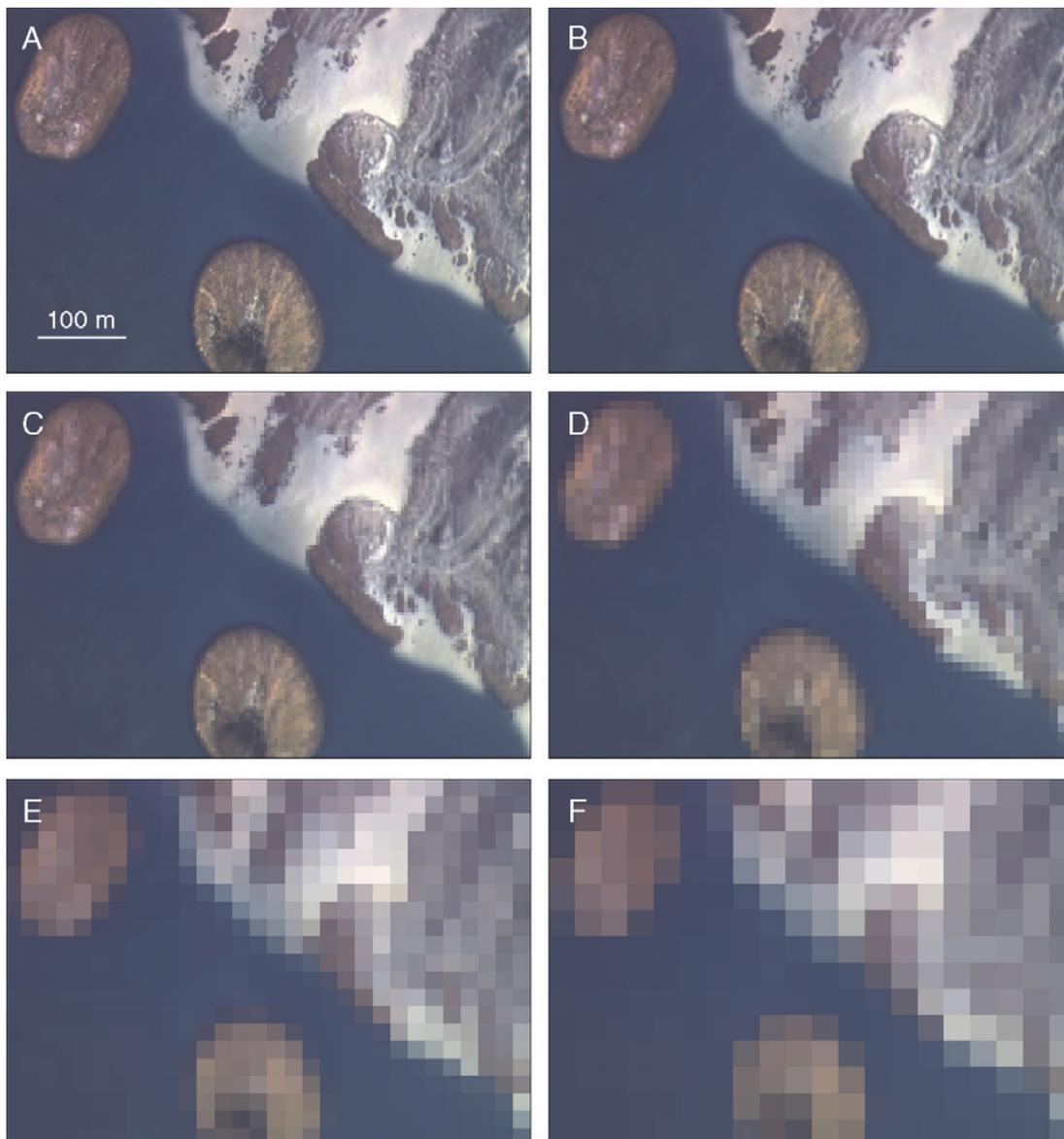


Рис. 1. Примеры пространственного разрешения снимков:
А – 1 м, В – 2 м, С – 4 м, D – 10 м, E – 20 м, F – 30 м (по [49])

Количество ландшафтно-бентосных категорий, которые можно классифицировать при дистанционном зондировании, зависит от многих факторов, включающих несущую платформу (спутник или самолет), тип сенсора (спектральное, пространственное и радиометрическое разрешение снимающего устройства), атмосферная облачность, степень структурированности дна, прозрачность воды и глубина проведения зондирования. Точность вы-

деления границ донных ландшафтно-бентосных комплексов определяется пространственным разрешением снимков, чем оно меньше, тем выше точность и детальность объектов (рис. 1).

Изображения, получаемые с авиационных сенсоров, в основном имеют пространственное разрешение 0,1-3 м, в то время как орбитальные спутники представляют пространственное разрешение в 1 м для панхроматических снимков и 4-30 м для

спектрозональных снимков. Покрытие с самолетов обеспечивает несравнимо меньшую площадь, чем со спутников, поэтому для картирования какого-то определенного сектора акватории необходимы перекрывающиеся линии полетов, составляющие полную площадь сектора. В отличие от космического пространства условия аэро съемки осложнены нестабильностью полета, вызванные главным образом турбулентностью атмосферы. Однако эта проблема решена установкой цифровой системы гиросtabilизации. Специализированные оптические гироскопы, принцип работы которых основан на эффекте Доплера и интерференции света, с помощью сервомеханизмов удерживают камеры в заданном положении с высочайшей точностью [Cnews R&D, <http://rmd.cnews.ru/>]. Система инерциального позиционирования (IMU), состоящая из трех акселерометров и оптических гироскопов в комплексе с GPS, позволяют определять положение камеры в полете с геодезической точностью до 3 см в плане и по высоте. Эти точные данные берутся за основу для координирования снимков на местности.

Исторически картирование бентосных сообществ проводилось по цветным аэрофотоснимкам [18, 19, 41, 50]. Важным преимуществом такой фотосъемки является ее доступность и простота анализа. Цветные аэрофотоснимки в масштабах 1 : 12000 или 1 : 24000 имеют пространственное разрешение 1 и 0,5 м. Картирование по аэрофотоснимкам дает очень хорошие результаты в комбинации со стандартными водолазными фототрансектами. Однако следует отметить, что интерпретация стандартных цветных аэрофотоснимков в естественных цветах занимает очень много времени и требует определенных знаний по распределению группировок бентоса для ручного сегментирования объектов на снимке в соответствии с их типовой принадлежностью. Кроме того, стандартные цветные снимки имеют только три широких спектральных канала RGB. Поэтому мульти- и гиперспектральные снимки имеют колоссальное преимущество в спектральном разрешении перед обычными фотоснимками.

КЛАССИФИКАЦИЯ И КАРТИРОВАНИЕ ЛАНДШАФТНО-БЕНТОСНЫХ КАТЕГОРИЙ НА КОРАЛЛОВЫХ РИФАХ

Наибольшее развитие, начиная с конца 80-х годов прошлого века, аэрокосмическая фото- и сканерная съемка получила в исследованиях коралловых рифов в связи с более приемлемыми оптическими характеристиками тропических вод, актуальностью широкомасштабного картирования коралловых мелководий из-за их с их исключительной важности как биоресурса для человечества, наибольшим биоразнообразием среди всех морских экосистем, высокой динамичностью и наибольшей уязвимостью под влиянием природных и антропогенных факторов [17, 19, 20, 22, 24-26, 28, 40, 42,

45-49, 51-56, 58]. Существует несколько региональных программ картирования рифов, множество локальных программ для картирования определенных рифовых акваторий и, по крайней мере, одно глобальное картирование коралловых рифов, основанное на данных серии спутников Landsat ETM+ [33]. В морях умеренных широт также проводились работы по картированию мелководных бентосных сообществ по аэрокосмическим снимкам [10, 11, 13, 15, 35, 38], однако достоверное выделение ландшафтно-бентосных комплексов на глубинах более нескольких метров от поверхности значительно затруднено или невозможно в связи с высоким рассеиванием электромагнитной энергии солнечного излучения в относительно мутных водах умеренных широт [38].

Различная отражательная способность элементов ландшафтно-бентосных комплексов (водоросли, морские травы, живые и мертвые коралловые колонии, открытая твердая порода, песок) в разных диапазонах электромагнитного спектра (рис. 2) положена в основу разделения этих элементов как классов (или категорий) на спектрозональных снимках. Более того, типы бентосного покрытия дна (кораллы, водоросли и морские травы) можно разбивать на ряд градаций в зависимости от плотности поселения. При исследовании коралловых рифов с помощью широкомасштабного дистанционного зондирования с использованием аэрокосмической съемки, очень большое значение для определения состояния рифа имеет корректное выявление изменений, связанных с переходом от живых к мертвым колониям кораллов (вторично обросших макроводорослями). Водорослевые пигменты, такие как фотосинтетический пигмент хлорофилл «а», определяют оптические особенности почти всех типов субстратов, представленных на коралловом рифе [33]. Например, цвет живых твердых и мягких кораллов главным образом определяется их симбиотическими водорослями. Тонкий слой водорослей, покрывающий мертвые кораллы, их обломки, песок и ил содержит различные типы водорослей. Разделение этих типов друг от друга, а также от морских трав возможно только на основе типичных для них пигментов. Так, симбионты склерактиний одноклеточные водоросли зооксантеллы относятся к динофлагеллятам, и типичным пигментом для них является хлорофилл C2, в то время как цианобактерии, покрывающие мертвые кораллы, содержат фикобилипротеины и т.п. Спектральная информация, требуемая для разделения различных субстратов, может быть получена только с использованием очень высокого спектрального разрешения (очень узкие спектральные полосы толщиной <10 нм) [33]. Широкомасштабные исследования в 11 тропических регионах Индо-Пацифики и Карибского бассейна с использованием оптоволоконного подводного спектрометра показали, что спектральная отражательная способность у большинства рифообразующих твердых кораллов имеет сходные

параметры и мало зависит от таксономических и географических различий [32, 37]. Более того, многие авторы [29-32, 36] отмечают, что живые кораллы даже сложно отличить от других типов бентосного покрытия, основываясь только на их спектральных сигнатурах. В то же время отражательная способность кораллов непосредственно зависит от длины волны проникающего солнечного излучения и варьирует от 0,5% в канале 400 нм до почти 100% отражения в канале 700 нм. Поэтому спектральное разрешение аэрокосмических сенсоров является даже более важным параметром, чем

их пространственное разрешение для выделения по изображениям бентосных классов на коралловом рифе [30, 45]. Для расширения возможностей классификации ландшафтно-бентосных комплексов по мультиспектральным и гиперспектральным изображениям необходимы обширные базы (библиотеки) спектральных характеристик всех бентосных типов покрытия, представленных в исследуемом регионе на всех возможных глубинах и при преобладающих водных и атмосферных условиях [36]. Такие библиотеки могут быть созданы на основе интенсивных полевых исследований.

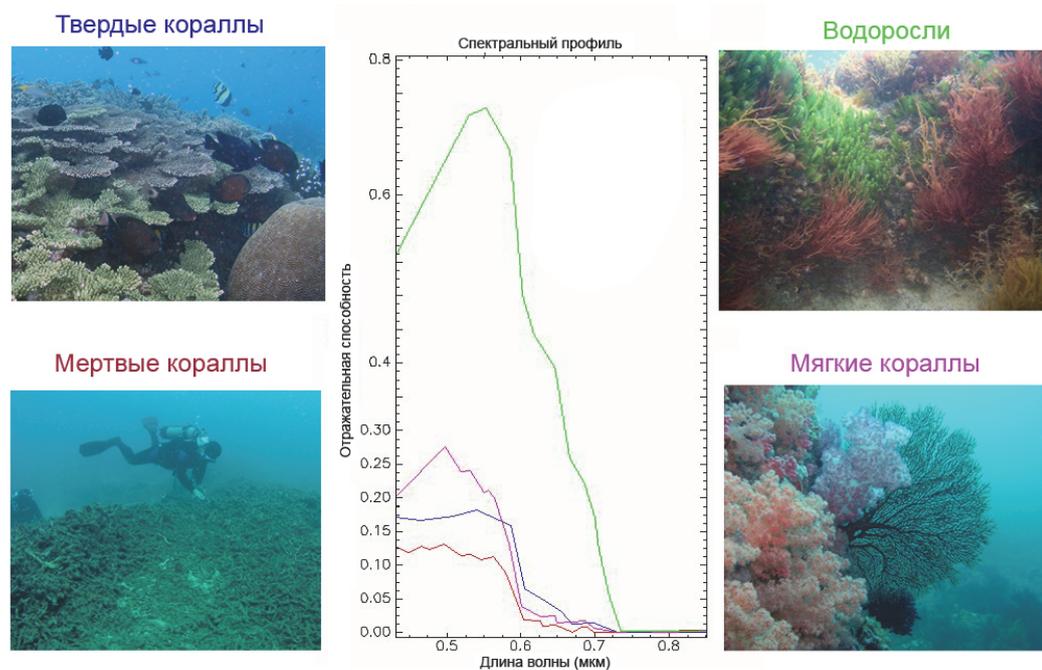


Рис. 2. Отражательная способность бентосных типов (график по: [VITO - Flemish Institute for Technological Research, [www.seos-project.eu/modules/coral reefs/](http://www.seos-project.eu/modules/coral%20reefs/)])

На коралловых рифах, обладающих наиболее высоким разнообразием типов и структур донных организмов и, соответственно, большим набором спектральных сигнатур различной плотности, необходимы гиперспектральные сенсоры с высоким пространственным, спектральным и радиометрическим разрешением. Наиболее информативными являются сенсоры с набором отдельных каналов в спектральном диапазоне 400 – 1300 нм и толщиной каждого канала в 10 нм, с пространственным разрешением 1-10 м и максимально возможным радиометрическим разрешением (11-12 бит). Примером такого типа сенсоров может служить гиперспектральный авиационный сканер CASI-1500, который имеет 288 программируемых спектральных каналов в видимом и инфракрасном диапазоне [Cnews R&D, <http://rnd.cnews.ru/>]. Авиационная гиперспектральная съемка сканером CASI-1500 позволяет создавать покрытие с пространственным

разрешением от 25 см до 4 м и спектральным разрешением до 288 каналов. Для оперативного сохранения огромного объема данных в режиме аэросъемки на борту лаборатории имеется 13-процессорный суперкомпьютер с накопителем на 4 терабайта. При максимальной высоте полета авиалаборатории обеспечивается 8-километровый коридор съемки. В 2005 г. подобный сенсор (CASI-550) использовался для картирования бентосного покрытия и донной топографии на индонезийских островах Пулау [21]. Было использовано 30 спектральных каналов шириной от 5 до 11 нм, они охватывали всю видимую и ближнюю инфракрасную часть спектра (диапазон 430-850 нм). Кластерный анализ полученных спектральных сигнатур с исследуемого кораллового рифа выделил более чем 500 классов, которые были обобщены в 16 основных бентосных групп (рис. 3А).

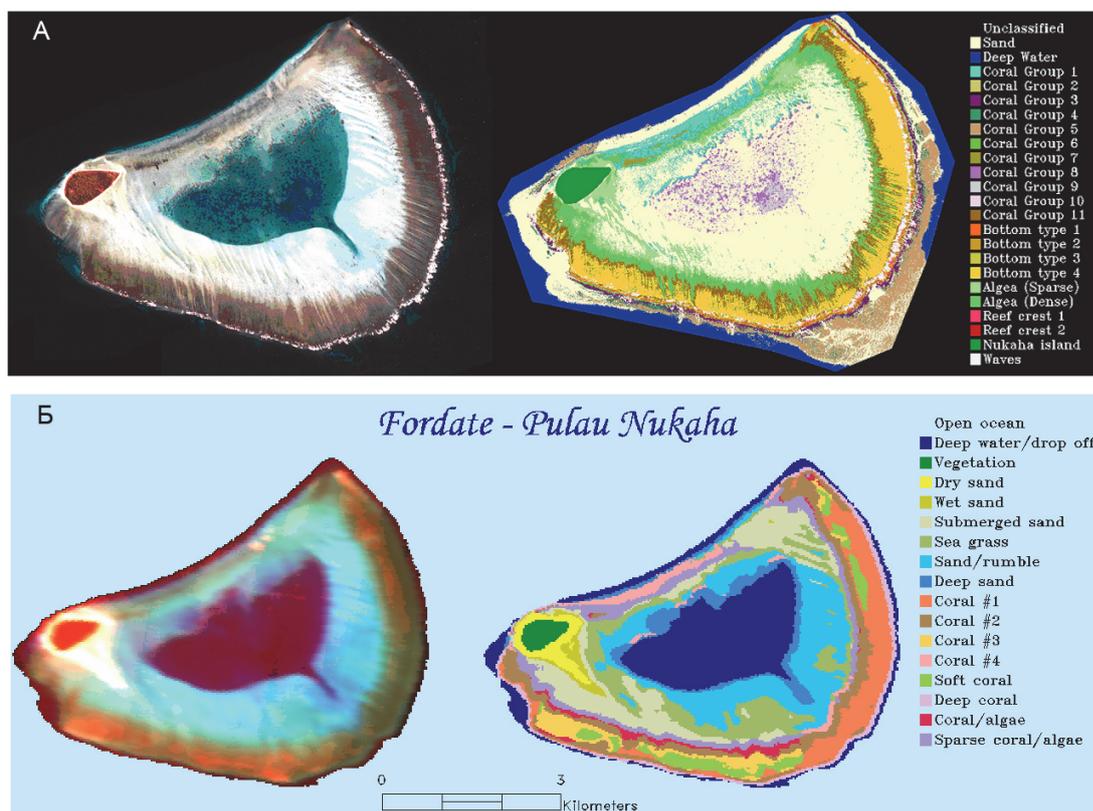


Рис. 3. Классификация и картирование ландшафтно-бентосных групп о-ва Fordate (о-ва Пулау, Индонезия) на основе изображения гиперспектрального сенсора авиационного базирования CASI-550 (А, пространственное разрешение 2,5 м) и гиперспектрального сенсора спутникового базирования CHRIS (Б, пространственное разрешение 18 м): А – по [21]; Б – по [57]

Группы были интерпретированы и верифицированы на основании большого массива полевых данных, собранных в исследуемом районе методом фототрансект. Общая точность биооптической классификации бентосного покрытия по спектральным сигнатурам его элементов составляла 73%. Глубина была определена до 15-метровой изобаты, точность батиметрических измерений верифицировалась по полевым эхолотным измерениям и составляла 0,9 м, совпадение с донной топографией по коэффициенту корреляции Пирсона составляла 86%. Ранее, в этом же районе проводились аналогичные работы, только с другим гиперспектральным сенсором (CHRIS) спутникового базирования (орбитальный спутник PROBA, [57]). Он уступал сенсору CASI как по спектральному разрешению (18 спектральных полос), так и по пространственному разрешению (20 м в надире). Тем не менее обработка изображений CHRIS позволила выделить с аналогичной точностью (71%) 9 основных бентосных групп (5 градаций покрытия кораллов, водоросли, морские травы, песок и мангровые заросли, рис. 3Б). В настоящее время единственный гиперспектральный сенсор орбитального базирования (Hyperion) работает на спутнике EO-1 [33], однако он имеет пространственное разрешение толь-

ко 30 м, что впрочем, позволяет сопоставлять его снимки с мультиспектральными снимками такого же пространственного разрешения, получаемыми с помощью других спутников, таких как Landsat.

Мультиспектральная съемка с охватом нескольких спектральных каналов (3-7) недостаточна для выделения большого числа ландшафтно-бентосных категорий, поэтому ее используют в основном для широкомасштабного топографического картирования дна с определением основных опорных типов биологических и неорганических структур дна. Чаще такую мультиспектральную съемку проводят с орбитальных носителей, так как она имеет преимущество перед аэросъемкой по несравнимо большей площади покрытия земной и водной поверхности и по возможности доступа в самые труднодоступные районы планеты. Для картирования геоморфологии дна, батиметрических измерений и выделения основных бентосных категорий мультиспектральные сенсоры орбитальных спутников должны иметь среднее (10-30 м) или высокое (<5 м) пространственное разрешение. В течение последнего десятилетия ряд таких спутников достаточно успешно используется в этих целях, их основные технические характеристики приведены в табл. 2.

Таблица 2. Технические характеристики сенсоров некоторых орбитальных спутников, используемых для картирования дна и бентосных сообществ (данные с сайтов <http://vinek.narod.ru/satellites.htm>; <http://www.sovzond.ru>; <http://gis-app.ict.nsc.ru/www/>; www.gisa.ru/5646.html)

Орбитальный спутник/год запуска	Спектральное разрешение, мкм	Пространств. разрешение в надире, м	Радиометр. разрешение, бит	Номинальный размер (км) и площадь (км ²) одной сцены в надире
Ikonos 1999	МНЗ: (B) 0,45-0,52	4	11	11×11 (121)
	(G) 0,51-0,60	4		
	(R) 0,63-0,70	4		
	(IR) 0,76-0,85	4		
	ПНХ 0,45-0,90	1		
QuickBird 2001	МНЗ: (B) 0,45-0,52	2,4	16	16,5×16,5 (272)
	(G) 0,51-0,60	2,4		
	(R) 0,63-0,69	2,4		
	(IR) 0,76-0,85	2,4		
	ПНХ 0,45-0,90	0,6		
OrbView 3 2003	МНЗ: (B) 0,45-0,52	4	11	8×8 (64)
	(G) 0,52-0,60	4		
	(R) 0,62-0,69	4		
	(IR) 0,76-0,90	4		
	ПНХ 0,45-0,90	1		
SPOT 5 2002	МНЗ:		8	60×60 (3600) или 60×80 (4800)
	(B-G) 0,49-0,60	10		
	(R) 0,61-0,68	10		
	(IR) 0,78-0,89	10		
	(SWIR) 1,54-1,75	20		
ПНХ 0,48-0,71	5			
Landsat 7 (ETM+) 1999	МНЗ:		8	185×185 (34225)
	(B) 0,45-0,51	30		
	(G) 0,52-0,60	30		
	(R) 0,63-0,69	30		
	(IR) 0,75-0,90	30		
	(SWIR) 1,55-1,75	30		
	(SWIR2) 2,09-2,35	30		
	(TIR) 10,40-12,50	60		
ПНХ 0,52-0,90	15			
Ресурс-ДК1* 2006	МНЗ: (G) 0,50-0,60	2,5-3,5	10	47,2×47,2 (2228)
	(R) 0,60-0,70	2,5-3,5		
	(IR) 0,70-0,80	2,5-3,5		
	ПНХ 0,58-0,80	1		

Примечание: МНЗ – многозональная съемка, ПНХ – панхроматическая съемка, B, G, R – соответственно синяя, зеленая и красные части спектра; IR, SWIR, TIR – соответственно ближняя, средняя и тепловая инфракрасные части спектра. * Ресурс-ДК1 включен в таблицу для сравнения, как единственный российский спутник высокого разрешения, имеющий потенциал для картирования донных ландшафтов, но до настоящего времени не использующийся для этих целей

Многозональные снимки, сделанные сенсорами этих спутников легли в основу топологических карт ландшафтно-бентосных комплексов в самых различных акваториях Мирового океана, таких как Большой Барьерный Риф у восточного побережья Австралии, Филиппины, Таиланд, Вьетнам, Французская Полинезия, Япония, Персидский Залив, Красное море, Средиземное море, Мозамбик, Мальдивские острова, Флоридский коралловый тракт, тихоокеанское побережье Панамы, Багамы, Белиз, острова Карибского бассейна и многие другие акватории [19, 20, 22, 23, 25-27, 31, 40, 42, 43, 48, 49, 51-56]. Несмотря на то, что некоторые современные спутниковые сенсоры (Ikonos, QuickBird) имеют пространственное разрешение, соразмерное с таковым при аэросъемке, проблема рассеяния света в воздушной и водной средах вместе с относительно слабым спектральным разрешением спутниковых сенсоров в настоящее время осложня-

ет их использование для детального картирования (с точностью >70%) ландшафтно-бентосных комплексов, особенно это относится к классификации и определению текущего статуса доминирующих типов бентоса на коралловых рифах [24, 43, 48, 49]. Эксперименты, проведенные по фактическим и смоделированным изображениям [23, 29, 37, 49], показали, что спутники со средним пространственным разрешением сенсоров и тремя спектральными диапазонами (SPOT, Landsat TM или ETM+, ASTER) позволяют различать с приемлемой общей точностью (60-75%) 3-6 ландшафтно-бентосных типов верхней сублиторали (т.е. живые кораллы, морские травы, коралловые обломки, песок и твердый субстрат). Как показывает ряд сравнительных исследований [20, 48, 49], спутники с сенсорами высокого пространственного разрешения (<5 м), такие как Ikonos и QuickBird увеличивают точность классификации ландшафтно-бентосных категорий

на 15-20% по сравнению со спутниками среднего разрешения (Landsat MSS, Landsat TM/ETM+, SPOT), так как в более полной мере используют текстурную информацию на снимаемых сценах. Для Ikonos общая точность составляла 77% для 4-5 бентосных классов, 71% – для 7-8 классов, 65% – для 9-11 классов и 53% – для 13 классов. Для клас-

сификации бентосных классов, выполненных по снимкам Landsat точность была систематически ниже, и в среднем составляла 56% для 5-10 классов. Несмотря на более высокое пространственное разрешение, данные Ikonos не позволили выделить с высокой точностью максимально возможное число бентосных категорий.

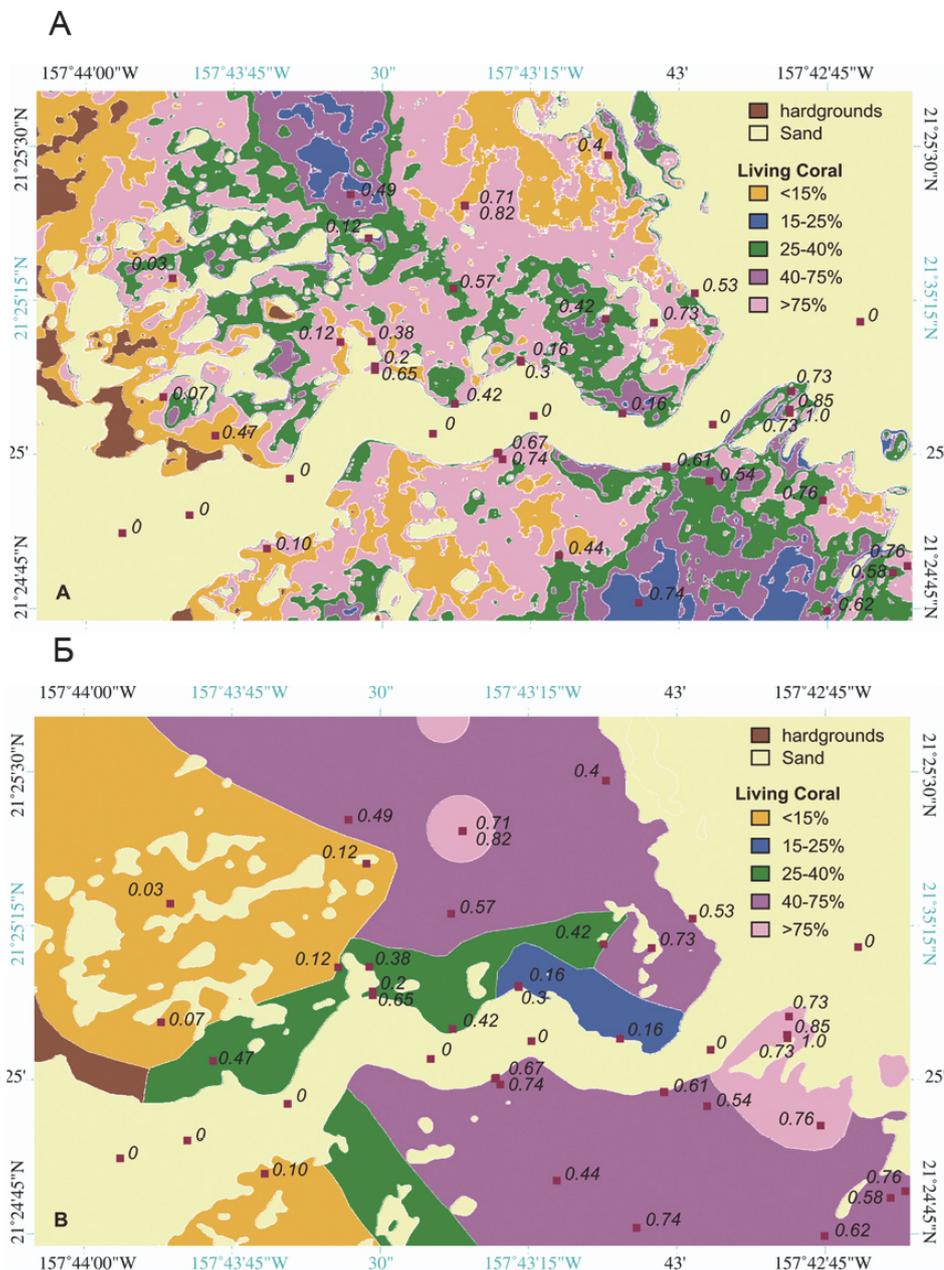


Рис. 4. Детализация выделенных бентосных классов на изображениях, сделанных мультиспектральным авиационным сенсором в спектральных каналах 488 нм (А) и 551 нм (Б) (по: [34])

Для сенсоров высокого разрешения (Ikonos) и среднего разрешения (Landsat TM/ETM+) отмечалась сходная линейная тенденция к уменьшению точности и ранжированности классов с увеличением сложности донного ландшафта [48], что связывают с низким спектральным разрешением обеих сенсоров (4 сходных спектральных канала). Сравнение изображений спутникового сенсора Ико-

nos с изображениями, полученными авиационным гиперспектральным сенсором CASI [48], показали, что CASI имеет значительное преимущество по точности выделения большого числа бентосных категорий (для 9 бентосных категорий точность CASI составляла 81% к только 64% для Ikonos). В этом же исследовании было отмечено, что спектрального разрешения сенсора Ikonos не всегда

достаточно для мониторинга изменений в спектральных сигнатурах бентосных сообществ и, соответственно, для прямого определения деградации коралловых рифов. Для четкого разделения живых и мертвых коралловых колоний (с точностью более 70%) требуется много спектральных полос (более 6 только в сине-зеленой части спектра), для чего наиболее оптимальными являются только авиационные мульти- и гиперспектральные сенсоры [24]. Тем не менее отдельные работы [51, 53] показали, что при основательной предварительной подготовке, т.е. полевых исследованиях с замером оптимальных спектральных сигнатур бентосных типов спектрометрическим и детальной оценкой проективного покрытия на контрольных стандартных трансектах, высокое пространственное и радиометрическое (11 бит) разрешение на снимках Ikonos позволяет провести достаточно точное разделение живых и мертвых кораллов и классифицировать с точностью 69% 8 ландшафтно-бентосных классов. Сектора рифа на изображении, где в значительной степени наблюдается смешение пикселей, соответствующих по спектральным сигнатурам водорослям и кораллам свидетельствует о том, что данный

сектор представляет собой зону фазового сдвига, где водоросли обрастают погибшие колонии кораллов [54]. При мультиспектральной съемке с ограниченным числом каналов (3-4), как с авиационных, так и с орбитальных носителей, наиболее информативной для обнаружения различий в плотности покрытия кораллов является синяя часть спектра, а оптимальную спектральную полосу для этих целей в зависимости от локальных условий необходимо предварительно оценивать спектрометрическим. К примеру, картирование распределения кораллов по спектральнозональным аэроснимкам в узком 10-нм спектральном канале с центром на 488 нм в синей части спектра оказалось более корректным и детальным, чем в зеленой части спектра в канале 551 нм ([34] рис. 4А, Б). Оптимальные каналы были определены экспериментально в ряде измерений *in situ* с помощью спектро-радиометра. Точность картирования в синей части спектра для 7 ландшафтно-бентосных категорий, из которых 5 категорий относились к плотностям покрытия кораллов, составляла 77%, а точность батиметрических измерений была еще больше (85% до изобаты 25 м).

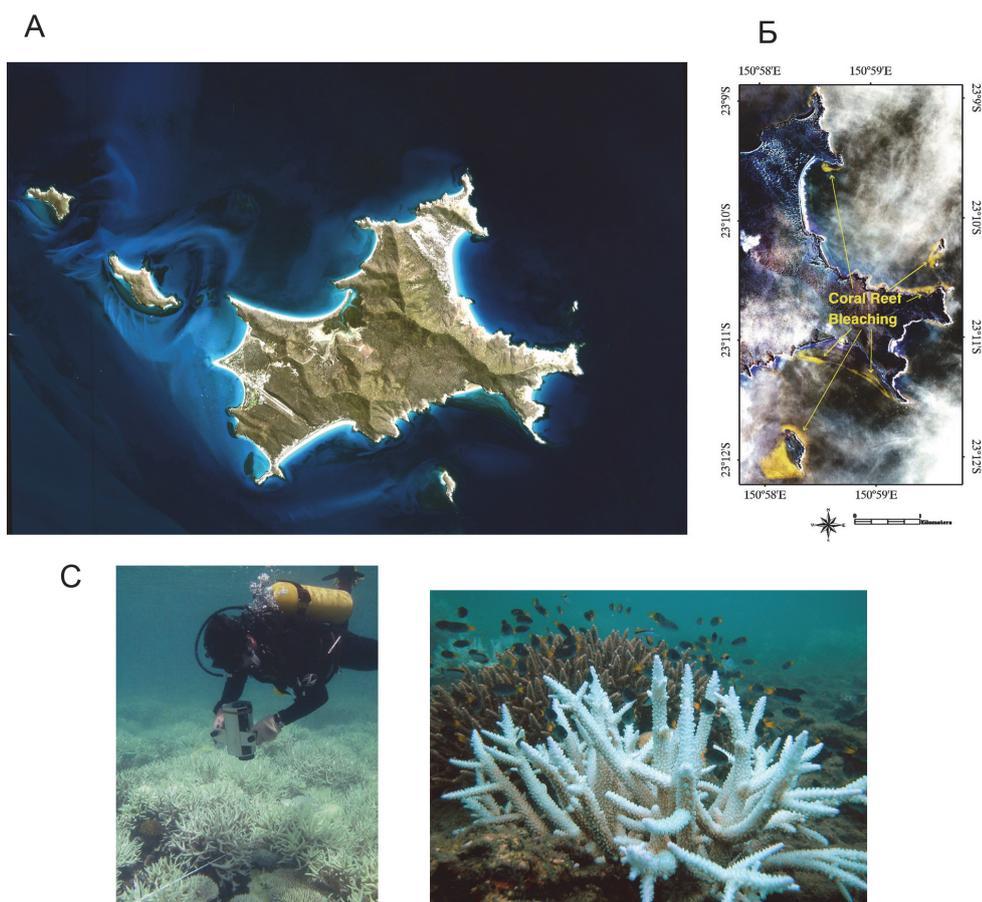


Рис. 5. Выделение очагов побеления кораллов по спектральнозональным снимкам спутника Ikonos: А – синтезированное изображение Ikonos в 3 видимых каналах спектра о-ва. Кеппел, сделанное в 2001 г. до побеления и сделанное в синей части спектра в 2002 г. (Б) во время побеления; желтым цветом отмечены очаги побеления кораллов; С – оценка побеления кораллов *in situ* по видеотрансектам для верификации спутниковых изображений (по: [27])

ВЫЯВЛЕНИЕ И КАРТИРОВАНИЕ ОЧАГОВ ПОБЕЛЕНИЯ КОРАЛЛОВ НА КОРАЛЛОВЫХ РИФАХ ПО АЭРОКОСМИЧЕСКИМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ

Характерным показателем стрессового состояния кораллового рифа является так называемый «бличинг» (от англ. bleaching) – побеление колоний твердых и мягких кораллов, вызванное выбросом коралловыми полипами симбиотических пигментирующих водорослей зооксантелл, которые и обуславливают окраску живых колоний. Выброс зооксантелл происходит под воздействием неблагоприятных факторов, в первую очередь длительного теплового шока, когда под воздействием совокупности факторов – повышенного солнечного излучения, отсутствия облачности и ветро-волнового или конвективного перемешивания с более холодными глубинными слоями, вода в верхнем 10-15-метровом слое прогревается до аномально высоких температур (выше 30°C) и держится в течение нескольких недель или даже месяцев. Явления массового побеления кораллов на обширных участках коралловых рифов с последующей гибелью кораллов и деградацией рифов наблюдаются в течение последних 15 лет во всех более угрожающих масштабах, это затронуло все тропические области Мирового океана, где есть коралловые рифы [www.reefbase.org]. Побелевшие кораллы имеют отчетливый оптический сигнал, отличный от здоровых колоний, что предполагает использование аэрокосмических сенсоров дистанционного зондирования для обнаружения очагов возникновения бличинга [19, 20]. Однако пятнистое распределение кораллов, разная интенсивность побеления и разные глубины ограничивают применение техник дистанционного зондирования в мониторинге и картировании побеления кораллов. Анализ смоделированных спутниковых изображений высокого пространственного разрешения [63] и реальных изображений сенсора Ikonos [27] показал, что с их помощью возможно обнаружение секторов коралловых рифов с побелевшими кораллами. На спектральных снимках Ikonos с пространственным разрешением 4 м, полученных до и во время эпизодов массового побеления кораллов на о-ва. Кеппел в системе Большого Барьерного Рифа [27], значительное побеление кораллов было установлено по увеличению яркости «коралловых пикселей» в синей и зеленой частях спектра (рис. 5) на глубинах до 15 м. В красной и ближней ИК-полосах спектра на спектральных снимках, а также на панхроматических снимках с разрешением 1 м во всей видимой части спектра побеление кораллов определить было невозможно. Авторы отметили, что наиболее точная идентификация побеления кораллов по космоснимкам была сделана при совпадении двух условий: очень высокое проективное покрытие рифообразующих кораллов, преимущественно кустистых акропорид (70-90%), и очень высокая

степень выраженного бличинга (92-95% покрытия представляло полностью белые колонии).

Тем не менее детальное экспериментальное исследование на Большом Барьерном Рифе показало, что для обнаружения очагов бличинга и точной количественной оценки проективного покрытия побелевших кораллов требуется очень высокое пространственное разрешение снимков (0,1 – 0,8 м), которое можно получить только с помощью аэросъемки с низких высот [19]. Пространственное разрешение на спектральных спутниковых снимках варьирует от 4 (Ikonos) до 30 м (Landsat), что не достаточно для детального картирования районов бличинга на коралловых рифах. А панхроматическая съемка с разрешением в 1 м, которую для общего пользования может предоставить только Ikonos, мало информативна для спектрального анализа бентоса, так как она представлена только одной широкой полосой видимого диапазона спектра. Даже при пространственном разрешении в 1 м 50% спектрального сигнала, полученного при разрешении в 10 см, теряется [19]. Частично побелевшие колонии (потеря пигментирующих симбиотических водорослей более 50%) сложно обнаружить и на аэроснимках, что приводит к недооценке проективного покрытия пораженных кораллов на аэроснимках по сравнению с подводными визуальными или видео-трансектами. Таким образом, космосъемка с имеющимися в настоящее время параметрами сенсоров может определить наличие побеления кораллов как таковое, а для детального картирования бличинга необходима цветная фото- или спектральная съемка с авиационных сенсоров с пространственным разрешением в 10 см (наилучший вариант) или 40-80 см (оптимальный вариант).

КЛАССИФИКАЦИЯ И КАРТИРОВАНИЕ ПОЛЕЙ ВОДОРΟΣЛЕЙ И МОРСКИХ ТРАВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

Кроме коралловых рифов, аэрокосмосъемку используют и для картирования распространения водорослей и морских трав, мутность воды обуславливает глубину, до которой возможно проведение таких работ. В частности, в относительно прозрачных водах Средиземного моря было проведено картирование полей морских трав *Posidonia oceanica* и *Symodocea nodosa* у о-вов Поркероль по спектральным снимкам среднего разрешения спутников серии SPOT на глубинах до 10 м, а геоморфология дна была классифицирована до 15-метровой изобаты [44]. Для картирования покрытия фитобентоса также используется и цветная аэрофотосъемка, особенно на мелководье на глубинах до 5 м (рис. 6А, Б). Что касается макроводорослей, анализ снимков с мультиспектрального сенсора высокого пространственного разрешения (2,4 м) QuickBird и гиперспектрального сенсора среднего разрешения (30 м) Hyperion и сравнение полученной классификации с полевыми исследованиями *in*

situ показали, что для картирования покрытия макроводорослей мультиспектральные снимки высокого разрешения предпочтительнее гиперспектральных снимков среднего разрешения [60]. Высокое пространственное разрешение мультиспектральных снимков дает более детальную информацию по

распределению водорослей в районах с выраженной пространственной разнородностью (рис. 7). Батиметрические измерения по снимкам QuickBird на мелководье эстонского побережья Балтийского моря до изобаты 3 м сопоставимы с полевыми измерениями эхолотом.

Таблица 3. Возможности сенсоров аэрокосмических носителей в исследовании донных структур

Платформа	Самолет		Орбитальный спутник		
	Гиперспектр.	Цветная фотосъемка	Гиперспектр.	Мультиспектр. (высокое разр.)	Мультиспектр. (среднее разр.)
Тип съемки					
Пример сенсора	CASI	UltraCam, DMC, ADS40-52	PROBA (CHRIS), EO1 (Hyperion)	Ikonos, QuickBird	Landsat, SPOT, IRS, ASTER
Батиметрия	+	+	+	+	+
Геоморфология дна	+	+	?	+	+
Картирование ландшафтно-бентосных категорий (< 5 категорий)	+	+	+	+	+
Картирование ландшафтно-бентосных категорий (> 5 категорий)	+	+	?+	+	-

Примечание: «+» означает возможности на постоянной основе; «?» нет данных; «?+» единичный эпизод; «-» невозможно.

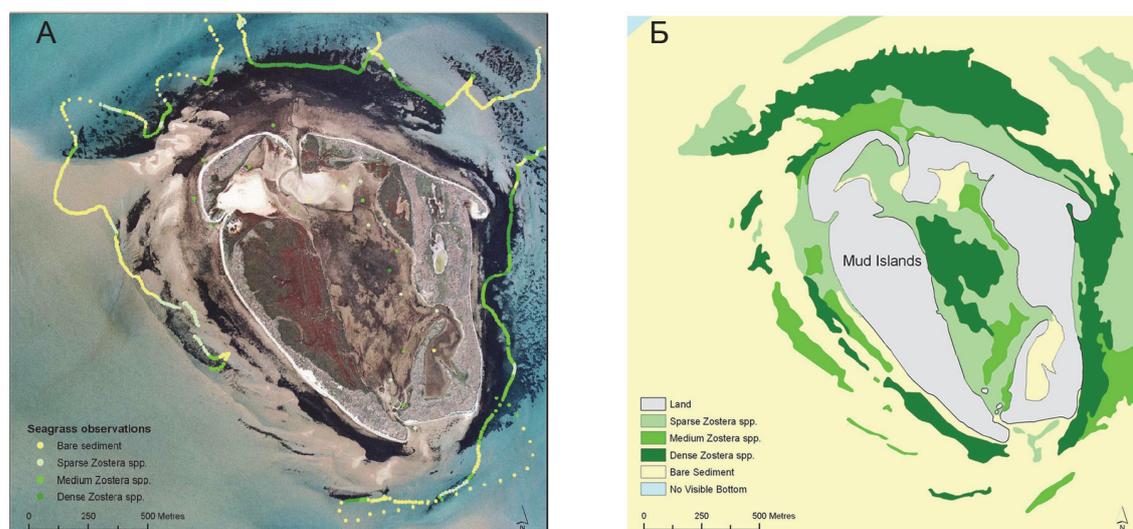


Рис. 6. Картирование по аэрофотоснимку (А) полей морской травы *Zostera* sp. (три степени проективного покрытия) на илисто-песчанном мелководье небольшого островка (Mud Island) в бухте Порт Филипп (Сидней, Австралия) [www.dpi.vic.gov.au/dpi/vro/vrosite.nsf/pages/marine_habitat]

Однако, как отмечают авторы [60], недостаток полевых спектрометрических данных по разным группам и видам водорослей может осложнить классификацию аэрокосмических изображений даже в очень мелководной зоне, так как красная часть спектра электромагнитного излучения в более эвтрофицированных водах поглощается в самом верхнем приповерхностном слое, а интенсивности отраженного сигнала главным образом в зеленой и в меньшей степени синей части спектра в таких водоемах недостаточна для разделения и классификации некоторых групп водорослей. Более того,

сравнения спектральных сигнатур макроводорослей из разных частей Мирового океана, включая Балтийское море [39], показало, что отражательная способность разных видов макроводорослей в каждой из трех из известных групп (красные, зеленые и бурые водоросли) имеет сходную форму и может варьировать только по пиковым значениям. Такое сходство делает невозможным разделение макроводорослей на видовом уровне при спектральном анализе изображений. Аналогичные ограничения имеют и кораллы при их классификации по спектральным сигнатурам [31, 32, 36, 37]. Тем не менее фото- и

спектрозональная съемка высокого разрешения с аэрокосмических сенсоров может быть использована для картирования красных, бурых и зеленых водорослей, морских трав и высших растений в мелководных прибрежных районах морей умерен-

ных широт [38, 39, 59, 60] и даже в береговой зоне внутренних водоемов [61, 62]. В табл. 3 представлены сводные данные, которые можно получить по изображениям, сделанным аэрокосмической съемочной аппаратурой.

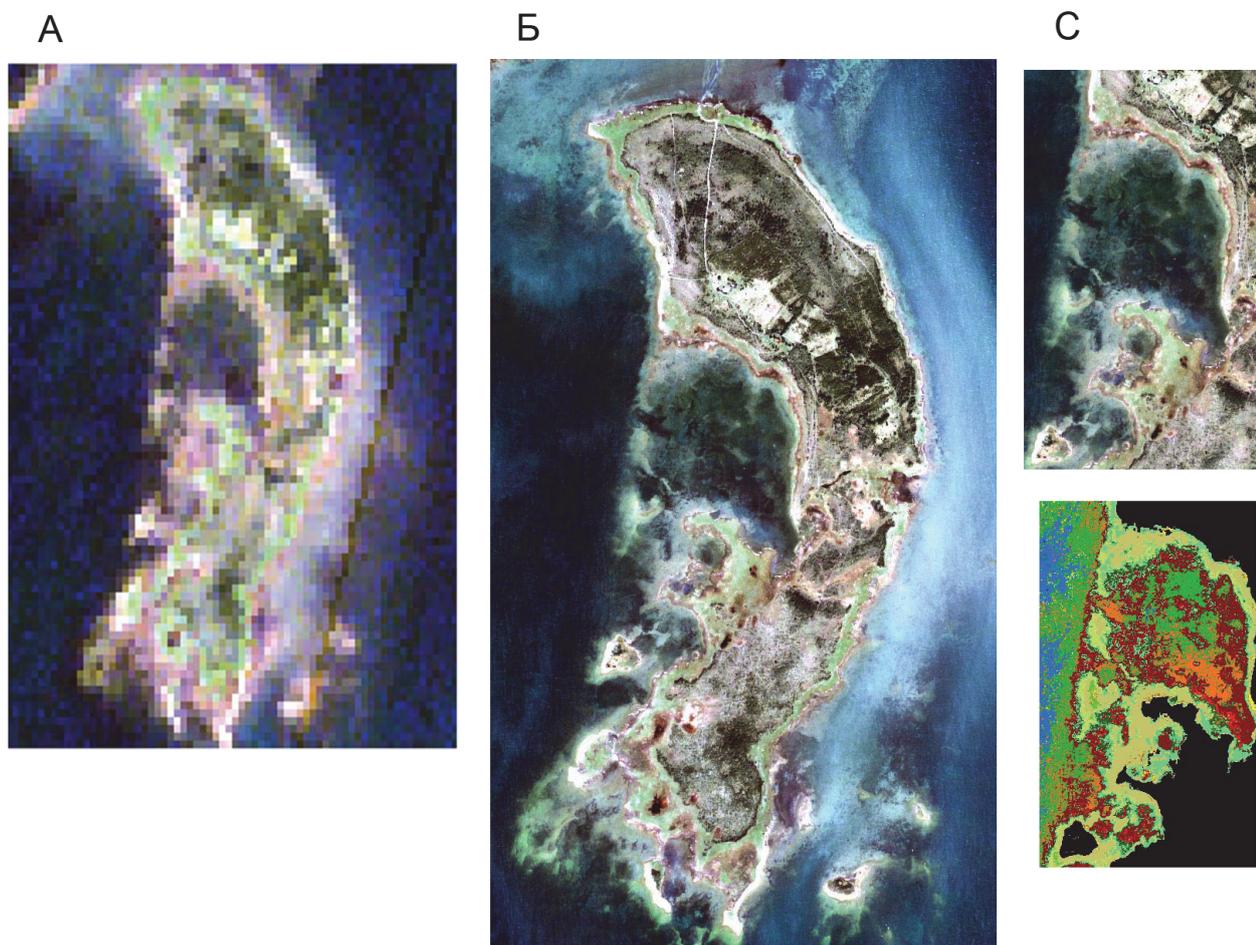


Рис. 7. Спутниковые изображения островка у эстонского побережья Балтийского моря, сделанные гиперспектральным сканером NuRegion (А) среднего разрешения (30 м) и мультиспектральным сканером QuickBird (Б) высокого разрешения (2,4 м); С – выделение области с выраженным покрытием фитобентосом и картирование доминирующих таксонов водорослей (выделено 10 ландшафтно-бентосных классов, включая 4 основных группы водорослей) (по: [60])

ДОСТУПНОСТЬ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ИХ ОБРАБОТКИ

Общее количество космоснимков в мире (не говоря уже об аэрофотоснимках) уже плохо поддается подсчету, по порядку величины оно превышает десяток миллионов. Именно этот материал и стал уникальным сырьем и продуктом для быстро набирающего темпы рынка данных ДЗЗ. Он весь хранится в многочисленных каталогах и базах данных различных «космических» фирм. Однако основная часть их плотно «закрыта» для внешнего потребителя. Ряд фирм выставляют для обзора космоснимки в сети интернет. В этом плане наибольший интерес представляют следующие онлайн-ката-

логи: сервер фирмы Space Imaging, представляющий данные со спутников Ikonos, IRS,

Landsat, Radarsat и других [www.spaceimage.com]; база данных Digital Globe фирмы Earthwatch, предлагающая наряду с архивными географическими данными и изображениями с французского спутника SPOT также снимки, полученные малыми спутниками типа QuickBird [www.digitalglobe.com]; сервер OrbNet фирмы OrbImage, предназначенный для архивирования и распространения изображений со спутников OrbView [www.orbimage.com]. Стоимость спутниковых изображений варьирует в зависимости от многих факторов, таких как общая площадь, пространственное разрешение, необходимость специального пролета над объектом или наличие снимков необходимых участков в имеющихся архивах, и т.д. К примеру, стоимость одного

квадратного километра снимков сенсора QuickBird варьирует от 30 до 185\$, в то время как минимальная цена снимков Ikonos составляет 18\$, а архивных снимков и того меньше – 7\$ за км². [www.ulrnc.org.ua/digest/new/02_ru.html]. В России официальным дистрибьютором ведущих мировых поставщиков космических изображений, и в первую очередь, снимков российского спутника Ресурс-ДК1, является компания «Совзонд» [www.sovzond.ru].

В настоящее время существуют разные программные комплексы для обработки растровых аэрокосмических изображений, все они хорошо сочетаются с векторными функциями программного обеспечения ГИС (Гео-Информационных Систем). Конечным результатом обработки изображений и включением их в комплекс ГИС становятся такие глобальные продукты, доступные для общего пользования, как виртуальный глобус Google Earth (в русской версии Google Планета Земля) - клиентское программное обеспечение для работы с трехмерной моделью Земли, созданной на основе спутниковых фотографий высокого разрешения. Широкие возможности масштабирования, осмотра местности под разными углами, а некоторых объектов и в 3D формате, точная координатная привязка и различные тематические опции делают Google Earth одним из самых популярных в мире Интернет-приложений. Другая ГИС основана на спутниковых и аэроснимках и предоставляющая информацию для общего пользования по разным аспектам состояния коралловых рифов [распространение, очаги и степень побеления, общий статус (степень деградации), батиметрия, нахождение контрольных измерительных станций и многое другое] доступна в онлайн-базе данных по коралловым рифам ReefBase [www.reefbase.org]. Базовые программные комплексы, такие как Erdas ImagineTM, WinbilkoTM, или модуль расширения Image Analysis известной программы ArcViewTM по работе с ГИС включают функциональные возможности, обеспечивающие эффективную работу пользователя традиционными методами ручного дешифрирования, только на компьютере, и широкий спектр операций по обработке изображения, которые теперь можно выполнять при необходимости прямо в процессе дешифрирования, а также и массу возможностей по точным геометрическим коррекциям и трансформированию снимка. Эти программы позволяют определять масштаб и координатную привязку объекта, оценивать размер и протяженность структур на изображении, определять, в каком канале спектра изображение наиболее пригодно для картирования надводных и подводных структур, проводить радиометрическую коррекцию изображений, компенсируя воздействие отражения от поверхности воды и эффект поглощения видимой части спектра с увеличением толщины водного слоя, составлять точные батиметрические карты мелководий, и самое основное для задач гидробиологии, проводить

картирование подводных структур и классификацию ландшафтно-бентосных категорий дна с определенной степенью точности (которая верифицируется по полевым исследованиям *in situ*). Полученные по спектральным характеристикам объектов величины их проективного покрытия можно анализировать стандартными статистическими методами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гатауллин В.Х.* Разработка каталога и базы данных космоснимков территории Узбекистана // Отчет о НИР. ТНИИКП. Ташкент, 2003. 47 с.
2. *Дрейк Ч., Имбри Д., Кнаус Д., Турекиан К.* Океан сам по себе и для нас. М.: Прогресс, 1982. 486 с.
3. *Ерлов Н.Г.* Оптическая океанография. М.: Мир, 1970. 224 с.
4. *Королев Ю.* Как подойти к обработке снимков? // DATA+ 2009. <http://www.dataplus.ru/Industries/7ZOND/usesnimok.htm>
5. *Кронберг П.* Дистанционное изучение Земли: Основы и методы дистанционных исследований в геологии: Пер. с нем. М.: Мир, 1988. 343 с.
6. *Кучейко А.* Российские перспективы в гиперспектре. Новости космонавтики. <http://www.novostikosmonavtiki.ru/content/numbers/222/24.shtml>. 2011.
7. Методические рекомендации по применению аэрокосмических методов для диагностики трубопроводных геотехнических систем и мониторинга окружающей среды М., 1995. 55 с. <http://www.complexdoc.ru>
8. *Моисеенко А.Е., Лимаренко Т.П.* Некоторые результаты использования данных ИСЗ SPOT – 1 за два года его эксплуатации // Геодезия, аэросъемка, картография 1988, Т. 3. С. 4-8.
9. Оптика океана. Физическая оптика океана. Т. 1. М.: Наука 1983. 372 с.
10. *Петров К.М.* Природное районирование мелководья у черноморских берегов Таманского полуострова и Северо-Западного Кавказа // Опыт картирования почв и растительности по аэроснимкам. Л.: Наука, 1964. С. 32-39.
11. *Петров К.М.* Методика ландшафтных исследований береговой зоны моря // Морские подводные исследования. М.: Наука, 1969. С. 75-87.
12. *Петров К.М.* Комплексное физико-географическое изучение морских мелководий // Изв. ВГО, 1973. Вып. 105. № 2. С. 18-21.
13. *Петров К.М.* Подводные ландшафты. Теория, методы исследования. М.: Наука, 1989. 124 с.
14. *Петров К.М.* Биогеография океана: взгляд географа на биологическую структуру океана. СПб.: Изд-во СПб. ун-та, 1999. 232 с.
15. *Петров К.М.* Ландшафтно-биологический подход к картографированию и районированию бентали морских мелководий // Изв. АН. Сер. геогр. 2003. Т. 1. С. 33-44.
16. *Петров К.М.* Биогеография океана. М.: Академический Проект, 2008. 323 с.
17. *Ткаченко К.С.* Перспективы экологического мониторинга коралловых рифов с использованием орбитальных спутников // Вест. ДВО РАН 2004. № 5. С. 61-67.
18. *Alquezar R., Boyd W.* Development of the rapid, cost effective coral survey techniques: tools for management and conservation planning // J. Coast. Conserv. 2007. V. 11. P. 105-119.
19. *Andréfouët S., Berklemans R., Odriozola L., Done T., Oliver J., Müller-Karger F.* Choosing the appropriate spatial resolution for monitoring coral bleaching events using remote sensing // Coral Reefs 2002. V.21. P. 147-154.

20. *Andréfouët S., Kramer P., Torres-Puliza D., Joyce K.E., Hochberg E.J., Garza-Pérez R., Mumby P.J., Riegl B., Yamano H., White W.H., Zubia M., Brock J.C., Phinn S.R., Naseer A., Hatcher B.G., Müller-Karger F.E.* Multi-site evaluation of IKONOS data for classification of tropical coral reef environments // *Remote Sensing Environ.* 2003. V. 88. P. 128-143.
21. *Bertels L., Vanderstraete T., Van Coillie S., Knaeps E., Sterckx S., Goossens R., Deronde B.* Mapping of coral reefs using hyperspectral CASI data; a case study: Fordata, Tanimbar, Indonesia // *Intern. J. Remote Sensing* 2008. V. 29. № 8, P. 2359-2391.
22. *De Vel O.Y., Bour W.* The structural and thematic mapping of coral reefs using high resolution SPOT data: application to the Tetembia reef (New Caledonia) // *Geocarto Int.* 1990. V. 5. № 2. P. 27-34.
23. *Capolsini P., Andréfouët S., Rion C., Payri C.* A comparison of Landsat ETM+, SPOT HRV, Ikonos, ASTER and airborne MASTER data for coral reef habitat mapping in South Pacific Islands // *Canadian J. Remote Sensing* 2003. V. 29. P. 187-200.
24. *Christensen T., Mumby P., Chollett I., Hedley J., Bejarano S., Skirving W., Strong A.* Directory of remote sensing applications for coral reef management // *Coral Reef Target Research & capacity Building for Management Program*, 2010. Melbourne, Australia, 31 pp.
25. *Dustan P., Chakrabarti S., Alling A.* Mapping and monitoring the health and vitality of coral reefs from satellite: a biospheric approach // *Life Supp. Biosph. Sci.* 2000. V. 7. P. 149-159.
26. *Dustan P., Dobson E., Nelson G.* Landsat thematic mapper: detection of shifts in community composition of coral reefs // *Conserv. Biol.* 2001. V. 15. P. 892-902.
27. *Elvidge C.D., Dietz J.B., Berklemans R., Andréfouët S., Skirving W., Strong A.E., Tuttle B.T.* Satellite observation of Keppel Islands (Great Barrier Reef) 2002 coral bleaching using IKONOS data // *Coral Reefs*. 2004. V. 23. P. 123-132.
28. *Garza-Pérez J.R., Lehmann A., Arias-Gonzalez J.E.* Spatial prediction of coral reef habitats: integrating ecology with spatial models and remote sensing // *Mar. Ecol. Progr. Ser.* 2004. V. 269. P. 141-152.
29. *Hochberg E.J., Atkinson M.J.* Spectral discrimination of coral reef benthic communities // *Coral Reefs*. 2000. V. 19. P. 164-171.
30. *Hochberg E.J., Atkinson M.J.* Capabilities of remote sensors to classify coral, algae and sand as pure and mixed spectra // *Remote Sensing Environ.* 2003. V. 85. P. 174-189.
31. *Hochberg E.J., Atkinson M.J., Andréfouët S.* Spectral reflectance of coral reef bottom-types worldwide and implications for coral reef remote sensing // *Remote Sensing Environ.* 2003. V. 85. P. 159-173.
32. *Hochberg E.J., Atkinson M.J., Apprill A., Andréfouët S.* Spectral reflectance of coral // *Coral Reefs*. 2004. V. 23. P. 84-95.
33. IGOS Coral Reef Sub-theme report, 2003. 40 pp. <http://www.igospartners.org>
34. *Isoun E., Fletcher C., Frazer N., Gradie J.* Multi-spectral mapping of reef bathymetry and coral cover; Kailua Bay, Hawaii // *Coral Reefs*. 2003. V. 22. P. 68-82.
35. *Karpouzli E., Malthus T.* The empirical line method for the atmospheric correction of IKONOS imagery // *Intern. J. Remote Sensing*. 2003. V. 24. P. 1143-1150.
36. *Kutser T., Dekker A.G., Skirving W.* Modelling spectral discrimination of Great Barrier Reef benthic communities by remote sensing instruments // *Limnol. Oceanogr.* 2003. V. 48, № 1. P. 495-510.
37. *Kutser T., Jupp D.L.* On the possibility of mapping living corals to the species level based on their optical signatures // *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 2006. V. 69. P. 607-614.
38. *Kutser T., Vahtmäe E., Martin G.* Assessing suitability of multispectral satellites for mapping benthic macroalgal cover in turbid coastal waters by means of model simulations // *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 2006 a. V. 67. P. 521-529.
39. *Kutser T., Vahtmäe E., Metsamaa L.* Spectral library of macroalgae and benthic substrates in Estonian coastal waters // *Proc. Estonian Acad. Sci. Biol. Ecol.* 2006 b. V. 55. № 4. P. 329-340.
40. *Lesser M.P., Mobley C.* Bathymetry, water optical properties, and benthic classification of coral reefs using hyperspectral remote sensing imagery // *Coral Reefs*. 2007. V. 26. P. 819-829.
41. *Lewis J.B.* Evidence from aerial photography of structural loss of coral reefs at Barbados, West Indies // *Coral Reefs*. 2002. V. 21. P. 49-56.
42. *Lim A., Hedley J., LeDrew E., Mumby P.J., Roelfsema C.* The effects of ecologically determined spatial complexity of the classification accuracy of simulated coral reef images // *Remote Sensing Environ.* 2009. V. 113. P. 965-978.
43. *Malthus T.J., Mumby P.J.* Remote sensing of the coastal zone: an overview and priorities for future research // *Intern. J. Remote Sensing*. 2003. V. 24. P. 2805-2815.
44. *Meinesz A., Belsher T., Boudouresque C-F., Lefevre J-R.* Premiere evaluation des potentialities du satellite SPOT pour la cartographie des peuplements benthiques superficiels de Méditerranée occidentale // *Oceanol. Acta.* 1991. V. 14. P. 299 - 307.
45. *Mumby P.J., Green E.P., Edwards A.J., Clark C.D.* Coral reef habitat mapping: how much detail can remote sensing provide? // *Mar. Biol.* 1997. V. 130. P. 193-202.
46. *Mumby P.J., Green E.P., Clark C.D., Edwards A.J.* Digital analysis of multispectral airborne imagery of coral reefs // *Coral Reefs*. 1998. V. 17. P. 59-69.
47. *Mumby P.J., Chisholm J.R.M., Clark C.D., Hedley J.D., Jaubert J.* Spectrographic imaging – a bird's eye view of health of coral reefs // *Nature*. 2001. V. 413. P. 36.
48. *Mumby P.J., Edwards A.J.* Mapping marine environments with IKONOS imagery: enhanced spatial resolution can deliver greater thematic accuracy // *Remote Sensing Environ.* 2002. V. 82. P. 248-257.
49. *Mumby P.J., Skirving W., Strong A.E., Hardy J.T., LeDrew E.F., Hochberg E.J., Stumpf R.P., David L.T.* Remote sensing of coral reefs and their physical environment // *Mar. Poll. Bull.* 2004. V. 48. P. 219-228.
50. NOAA/FRMI. Benthic habitat of the Florida Keys // Florida Department of Environmental Protection: Florida Marine Research Marine Research Institute 1998. Tech. Rep. TR-4. St. Petersburg, FL/ 53 pp.
51. *Purkis S.J.* A «reef-up» approach to classifying coral habitats from IKONOS imagery. *IEEE Trans // Geosci. Remote Sens.* 2005. V. 43, № 6. P. 1375-1390.
52. *Purkis S.J., Kenter J.A.M., Oikonomou E.K., Robinson I.S.* High-resolution ground verification, cluster analysis and optical model of reef substrate coverage on Landsat TM imagery (Red Sea, Egypt) // *Intern. J. Remote Sensing* 2002. V. 23. P. 1677-1698.
53. *Purkis S.J., Myint S., Riegl B.* Enhanced detection of the coral *Acropora cervicornis* from satellite imagery using a textural operator // *Remote Sensing Environ.* 2006, V. 101. P. 82-94.
54. *Riegl B., Andrefouet S., Moyer R.P., Walker B.K.* Integration of satellite remote-sensing of subtidal habitats with vessel-based video survey (Dubai, UAE, Arabian Gulf) // Invited paper, 7th International Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments, 2002. Miami, FL, 1-6 pp.
55. *Riegl B., Purkis S.J.* Detection of shallow subtidal corals from IKONOS satellite and QTC View (50, 200 kHz) single-beam sonar data (Arabian Gulf; Dubai, UAE) // *Remote Sensing Environ.* 2005. V. 95. P. 96-114
56. *Soto I., Andréfouët S., Hu C., Muller-Karger F.E., Wall C.C., Sheng J., Hatcher B.G.* Physical connectivity in Mesoamerican Barrier Reef System inferred from 9 years of ocean color observations // *Coral Reefs* 2009. V. 28. P. 415-425.

57. Sterckx S., Debruyne W., Vanderstraete T., Goossens R., van der Heijden P. Hyperspectral data for coral reef monitoring. A case study: Fordate, Tanibar, Indonesia // EARSeL eProceedings. 2005. V. 4. № 1. 18-25.
58. Strong A.E., Barrientos C.S., Duda S., Sapper J. Improved satellite techniques for monitoring coral reef bleaching // 8th Intern. Coral Reef Symp. 1997. V. 2. P. 1495-1498.
59. Vahtmäe E., Kutser T., Martin G., Kotta J. Feasibility of hyperspectral remote sensing for mapping benthic macroalgal cover in turbid coastal waters - a Baltic Sea case study // Remote Sensing Environ. 2006. V. 101. P. 342-351.
60. Vahtmäe E., Kutser T. Mapping bottom type and water depth in shallow coastal waters with satellite remote sensing // J. Coast. Res. 2007. V. 50. P. 185-189.
61. Wei A., Chow-Fraser P. Use of IKONOS imagery to map coastal wetlands of Georgian Bay // Fisheries 2007. V. 32. P. 167-173.
62. Wolter P.T., Johnston C.A., Niemi G.J. Mapping submerged aquatic vegetation in the US Great Lakes using Quickbird satellite data // Intern. J. Remote Sensing 2005. V. 26. P. 5255-5274.
63. Yamano H., Tamura M. Detection limits of coral reef bleaching by satellite remote sensing: simulation and data analysis // Remote Sensing Environ. 2004, V. 90. P. 86-103.

APPLICATION OF AEROSPACE IMAGERY IN HYDROBIOLOGICAL RESEARCH

© 2012 K.S. Tkachenko

Volga State Social-And-Humanitarian Academy, Samara

The basic types and technical parameters of aerospace imagery used for remote sensing of seabed are reviewed. The main principals of image decoding and processing are presented. The use of aerospace imagery for mapping, classification and monitoring of benthic communities in the upper part of marine shelf such as coral reefs, algae and sea grass is considered based on specific examples. Application of spectral features of hydrobionts and inorganic components of habitats is shown in terms of its perspective in decoding of aerospace images of seabed.

Key words: aerospace imagery, remote sensing, decoding, marine shelf, benthic communities.