

# Морские травы: взгляд из космоса

А.В.Макаров,

инженер ББС им. Н.А.Перцова

В.А.Спиридонов,

кандидат биологических наук,

старший научный сотрудник лаборатории экологии прибрежных донных сообществ

Института океанологии им.П.П.Шириова РАН

Москва

В прибрежной полосе многих морей, от экватора до полярного круга, заросли морских трав уменьшают интенсивность волнового воздействия, а их корневая система пронизывает донные осадки. Благодаря этому сообщества морских трав, в отличие от водорослей, формируют характерный илистый грунт, насыщенный органическими веществами. В Белом море такие сообщества образует zostера морская (*Zostera marina*), или взморник по-поморски.

В середине прошлого столетия в морях Атлантического океана наблюдалась массовая гибель zostеры в результате поражения миксоциетом *Labyrinthula macrocystis*. Вероятно, по той же причине взморник практически исчез в 60-х годах прошлого столетия и в Белом море [1]. До сих пор там, где до массовой гибели существовали обширные поля этого растения, можно увидеть лишь отдельные его скопления [2, 3].

Прибрежные заросли беломорской zostеры, богатые питательными веществами и защищенные от волн, служат местом обитания различных организмов, кормежки трехиглой колюшки (*Gasterosteus aculeatus*) и камбалы (*Liopsetta glacialis*), нереста беломорской сельди (*Clupea pallasii marisalbi*) и других хозяйственно важных видов рыб [4]. Кроме того, побегам взморника кормятся и некоторые водоплавающие птицы. Сообщества морской травы — своего рода индикатор прибрежных экосистем Белого моря, и потому для исследований их динамики необходимо постоянно следить за состоянием и восстановлением зарослей zostеры. Этим целям служит дистанционный мониторинг с использованием спутниковых снимков. Результаты их обработки позволяют, например, картографировать заросли zostеры [5], распознавать и наносить на карту местообитания макробентоса [6], зарослей водорослей-макрофитов [7], изучать пространственную структуру сообществ коралловых рифов [8–10]. Однако опыт использования космической информации для

идентификации подводных биологических объектов в полярных морях невелик даже на мелководье, и наше исследование — одно из первых такого рода проектов.

Дешифрирование спутниковых снимков мелководья Кандалакшского залива имеет свою специфику. В довольно узкой\* приливно-отливной зоне (литорали), покрываемой водой дважды в сутки, и на примыкающей к ней верхней сублиторали встречается не так много объектов, способных образовывать однородные скопления, которые на спутниковом снимке можно различить с большой степенью достоверности. Кроме того, идентифицировать объекты в прибрежной зоне северных морей сложно из-за очень низкой прозрачности воды, которая богата планктоном и содержит смывы с берегов взвеси. На спутниковых снимках морского побережья достоверно различаются только объекты, находящиеся у самой поверхности воды. Они могут располагаться на литорали и в верхней сублиторали, включая зону распространения зарослей zostеры.

Возможности современных спутников, предоставляющих фотографии поверхности Земли, сильно различаются. Сенсоры спутника «Landsat», снимки которого часто используются для ландшафтного картографирования, имеют каналы видимого и ближнего инфракрасного диапазонов 30-метрового разрешения (т.е. расстояние на земной поверхности, которое соответствует стороне квадрата, отображаемого одной ячейкой матрицы сенсора — пикселем, равно 30 м). В районе, где выполнялась настоящая работа, применение таких снимков для идентификации литоральных и сублиторальных объектов может дать мало полезной информации. В большинстве случаев ширина литорали и зоны прибрежного мелководья составляет всего несколько десятков метров, а зарослей zostеры — 10–30 м. По той же причине не

\* В других частях Белого моря (например, в приливно-отливной зоне Онежского залива) литораль может быть значительно шире.



Схема расположения эталонных участков, контрольных полигонов и мест обнаружения сублитторальных зарослей zostеры.

использовались и снимки спутника «Spot» с разрешением 10–20 м.

В нашей работе на ББС им. Н.А. Перцова для исследования ландшафтов и сообществ узкой полосы прибрежного мелководья использовались космические снимки спутника «Formosat-2». Этот аппарат имеет четыре канала с разрешением 8 м, что позволяет точнее идентифицировать объекты менее 30 м в длину и ширину. На снимках этого спутника заросли zostеры распознаются так же хорошо, как и наземные зеленые растения, точнее, их скопления. Это объясняется тем, что спектральное разрешение каналов спутника «Formosat-2» полностью перекрывает зеленую часть спектра, а спектр отражения у zostеры такой же, как у наземных зеленых растений, несмотря на то что она растет под водой [11].

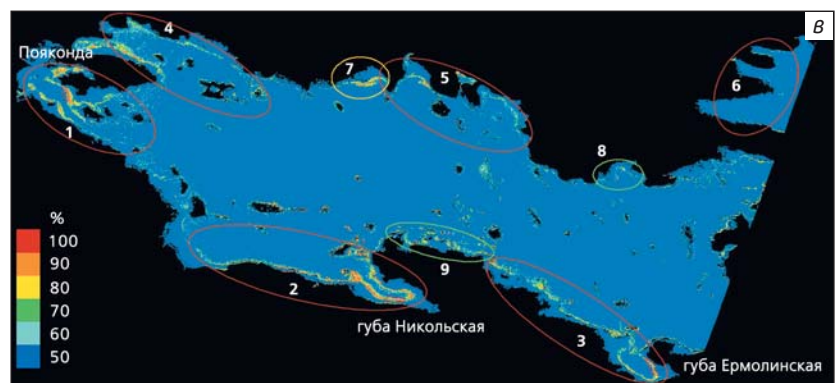
Чтобы увидеть заросли морских трав из космоса, нужно сначала буквально «пощупать» их на берегу и в воде. Иными словами, нужно сначала найти и нанести на карту несколько эталонных участков зарослей zostеры, «привязать» к карте спутниковый снимок и научить компьютерную программу различать спектральные характеристики морской травы. Поиск и картографирование зарослей zostеры произведены в окрестностях ББС в 2011–2012 гг.: однородные заросли обнаружены в верхней части сублиторали в губе Ермолинская, губе Никольская и в самой верхней, кутовой части губы Ругозерская напротив пос. Пояконда. Эти участки и послужили эталонами. Их координаты определили с помощью навигатора «Garmin», а для коли-

чественной оценки зарослей использовали методику проективного покрытия, которую применяют геоботаники. Zostera найдена и в мелководных заливах по северному берегу губы Ругозерская, и по побережью залива Бабье Море. Эти территории стали контролем, который нужен, чтобы проверить, насколько хорошо наша программа «научилась» распознавать заросли zostеры на снимке из космоса. Метод так и называется: «классификация с обучением» [12, 13], а для обработки снимков мы использовали созданный Инженерно-технологическим центром «SkanEx» пакет программ «SkanEx Image Processor», в котором реализован ряд алгоритмов классификации изображений, позволяющих идентифицировать объекты по эталонным участкам. Алгоритм «бинарный классификатор» использует сходство яркостных характеристик пикселей всех каналов с эталонными участками, что позволяет выделить на всем снимке места распространения объектов одного типа. С его помощью можно также оценить оптическую плотность присутствия объекта в каждом пикселе изображения. Кроме того, этот алгоритм позволяет оценить однородность эталонного участка и выявить в нем зоны, обладающие максимальными яркостными характеристиками.

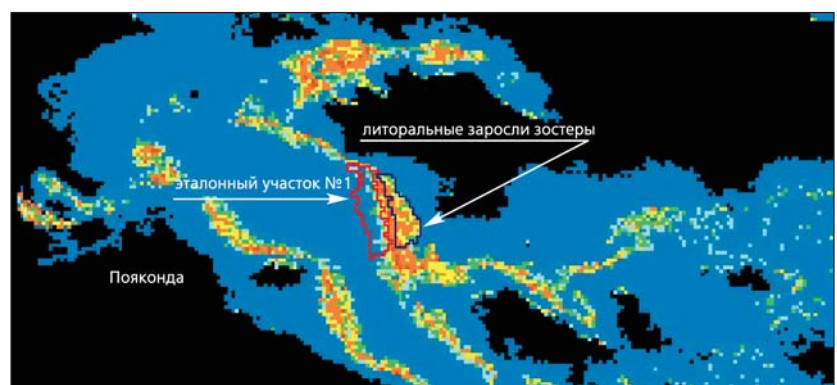
Алгоритм бинарной классификации предполагает использование в каждом расчете только одного эталона для обучения программы. Именно с ним сравниваются характеристики всего изображения: программа оценивает яркость каждого пикселя эталона по всем каналам и находит соот-

ветствующие им пиксели на всем снимке. Цвета шкалы отражают проценты яркости каждого пикселя изображения, что в данном случае можно соотнести с оптической плотностью zostеры и ее проективным покрытием. В результате получают карту, где видно предсказанное распределение sublиторальных зарослей zostеры, которые присутствуют в области, охваченной снимком. Мы провели независимые расчеты с использованием трех разных эталонных площадок. Большая часть выявленных с помощью спутникового снимка участков с зарослями морской травы, куда попали и контрольные полигоны, совпали, но при этом были обнаружены и различия в итоговых картах распределения zostеры, возникающие при использовании разных эталонов. Отчего это происходит? Дело, по-видимому, в том, что в районе наших исследований береговая линия сложной конфигурации, поэтому фазы отлива на разных эталонных участках могут не совпадать, и одновременно в одних местах морская трава окажется на осушке, в других — будет стелиться по поверхности воды, а в третьих — останется покрытой слоем воды. Все это отразится на ее оптических характеристиках, и программа, «обученная» по конкретному участку, лучше «увидит» zostеру, произрастающую в похожих условиях. Но сопоставление разных карт, анализ условий произрастания травы и сопоставление уровня воды в момент снимка на эталонных и контрольных участках позволяют разобраться в картине, найти оптимальный эталон и составить достоверную карту зарослей. Теперь мы знаем, что это осуществимо даже для таких сложных участков побережья, как район БС.

Таким образом, для исследования и мониторинга важнейших прибрежных сообществ открываются совершенно новые возможности. Сейчас накапливается все больше свидетельств



Распознавание sublиторальных зарослей zostеры по обучающим эталонам: вблизи пос.Пояконда (а), а также в Никольской (б) и Ермолинской (в) губах.



Литоральные заросли zostеры, выявленные вблизи пос.Пояконда в результате обработки снимка по обучающему эталону №3 (губа Ермолинская).

того, что луга морских трав в Кандалакшском заливе далеко не достигли того уровня развития, которое было им свойственно до массового отмирания зостеры [1]. Учитывая это обстоятельство, можно будет с помощью снимков со спутников отслеживать год за годом, где и как идет процесс восстановления зостеры на разных участках Кандалакшского залива. А это приблизит нас к пониманию фундаментальной проблемы, далекой на сегодняшний день от окончательного решения, — какие факторы ответственны за динамику морской растительности.

Методы, разрабатываемые сейчас на ББС, могут быть полезны в работе морских заповедников и других особо охраняемых природных территорий. Их задача — не только защищать природные комплексы, но и документировать естественные процессы в экосистемах, где должна быть исключена хозяйственная деятельность человека. Морские акватории или охраняемые зоны есть в 16 российских заповедниках и одном национальном парке. По крайней мере в 10 из них очень важную

роль в прибрежных экосистемах играют сообщества морских трав и другая литоральная и сублиторальная растительность. Однако их мониторинг почти не ведется из-за того, что до последнего времени отсутствовали приемлемые по стоимости методы. К примеру, здесь можно было бы использовать аэрофотосъемку, но она чрезвычайно дорога. Методы исследования морских трав из космоса могут стать инструментарием мониторинга и в морских заповедниках, в прибрежных зонах, находящихся под действием крупных промышленных проектов. На Белом море это влияние пока, к счастью, ограничено районами основных портов, а вот на Черном море и в Приморье охватывает уже целые побережья. Там, кстати, вести мониторинг морской растительности из космоса несколько проще технически, поскольку приливные колебания значительно менее выражены. Но для отработки методики, приспособления ее к местным условиям неизбежно понадобится проведение работ на морских биологических стационарах. ■

## Литература

1. Вехов В.Н. Зостера морская (*Zostera marina* L.) Белого моря. М., 1992.
2. Максимович Н.В., Иванов М.В., Букина М.В. Современное состояние и перспективы промысла морской травы *Zostera marina* L. в прибрежных акваториях карельского берега Белого моря // Проблемы изучения, рационального использования и охраны ресурсов Белого моря. Материалы IX международной конференции 11—14 октября 2004 г., Петрозаводск, 2005. С.208—210.
3. Симакова У.В., Удалов А.А., Кондарь Д.В. *Zostera marina* L. в Бабьем море, распределение и общая характеристика // Отчет о научно-исследовательской работе на территории ФГУ «Кандалакшский государственный природный заповедник» за 2011 г. Ч.1. Первичные данные, авторский раздел «Летописи природы». М., 2012.
4. Кузнецов В.В. Белое море и биологические особенности его флоры и фауны. Л., 1960.
5. Curran R.W. The Utility of digital globe's WorldView-2 satellite data in mapping seagrass in North Carolina estuaries. M.A., East Carolina University, 2011.
6. Paz L. de, Patricio J., Marques J.C. et al. Ecological status assessment in the lower Eo estuary (Spain). The challenge of habitat heterogeneity integration: a benthic perspective // Marine Pollution Bulletin. 2008. №56. P.1275—1283.
7. Casal G., Sánchez-Carnero N., Sánchez-Rodríguez E. et al. Remote sensing with SPOT-4 for mapping kelp forests in turbid waters on the south European Atlantic shelf // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2011. №91. P.371—378.
8. Hochberg E.J. Coral Reefs: An Ecosystem in Transition. 2011. Part 2. P.25—35.
9. Roelfsema C., Phinn S. Integrating field data with high spatial resolution multispectral satellite imagery for calibration and validation of coral reef benthic community maps // Appl. J. Remote Sens. 2010. V.4. №1. 043527. doi:10.1117/1.3430107
10. Rowlands G., Purkis S., Riegl B. et al. Satellite imaging coral reef resilience at regional scale. A case-study from Saudi Arabia // Marine Pollution Bulletin. 2012. V. 64. №6. P.1222—1237.
11. Biber P.D., Paerl H.W., Kenworthy W.J. et al. Atlantic Coastal Ecological Indicator Consortium (ACE INC): Using the EaGLE Center concept to develop bio-optical and physiological indicators for coastal water quality management and seagrass habitat condition. 2005.
12. Лабутина И.А. Дешифрирование аэрокосмических снимков. М., 2004.
13. Трифонова Т.А., Мищенко Н.В., Краснощекоев А.Н. Геоинформационные системы и дистанционное зондирование в экологических исследованиях. М., 2005.