

Р.Р.Станичная, С.В.Станичный, Ю.Н.Горячкин

Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь

МЕТОДИКА АНАЛИЗА ИЗМЕНЧИВОСТИ БЕРЕГОВОЙ ЛИНИИ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

Предложена методика анализа изменений береговой линии по спутниковым данным. Используется комбинация ИК каналов двух разнесенных во времени изображений, которая в итоговом изображении одного и того же района побережья даёт районы отступления и выдвижения берега. Используя данные спутников серии *Landsat*, были выделены зоны с наибольшими изменениями береговой линии в северных районах Черного и Азовского морей за 30-тилетний период.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *изменчивость береговой линии, методика анализа спутниковых изображений, Черное и Азовское море*

Изменения береговой линии, которым в настоящее время подвержено примерно 70 % берегов Мирового океана, представляет потенциальную угрозу пляжам, хозяйственным объектам, транспортным и коммуникационным системам, расположенным в непосредственной близости к границе суша – море. Поэтому количественная оценка процессов отступления – выдвижения береговой черты имеет существенное значение. Кроме широкого круга практических задач, в которых используется информация об изменении берегов, она имеет и большой научный интерес, связанный с проблемой долгосрочного прогноза их эволюции. Изменения очертаний береговой линии (отступление пляжей и клифов, рост аккумулятивных форм и др.) можно выявлять путем сопоставления разновременных спутниковых снимков. Анализ массива архивных космических снимков позволяет получить детальные изменения положения береговой линии, а также их количественные характеристики [1, 2]. При этом наилучшие результаты дают спутниковые снимки со сверхвысоким пространственным разрешением (в настоящее время менее 1 м). Вместе с тем, такие снимки, как правило, отсутствуют в свободном доступе. Немаловажно, что соответствующие спутники были запущены относительно недавно (в нулевых годах XXI в.) и накопили сравнительно короткие ряды наблюдений. Таких недостатков лишены данные спутников серии *Landsat*. Несмотря на существенно меньшую разрешающую способность данных (15 – 30 м на пиксель) архив содержит снимки с 1984 г., что позволяет оценить изменчивость береговой линии за достаточно продолжительное время. Изображения выставлены в открытом доступе на сайте Геологической службы США (<http://glovis.usgs.gov/>). Появление такого рода информации породило целую волну публикаций, где с помощью снимков *Landsat* оценивалось изменение береговой линии не только для отдельных участков побережий океанов и морей, но и озер и водохранилищ.

При этом оценка изменчивости положения береговой линии выполнялась, как правило, визуально или методом накладки монтажа (см., например, [3]). Другой часто используемый метод – это очерчивание прибрежной

части границей, вычисление площади выделенного участка и сравнение ее с площадью данного участка на более позднем спутниковом изображении [4]. Наиболее часто используемые при таком анализе пакеты программ – *ENVI* и *ArcGIS*. Оба метода достаточно трудоемки и малоприменимы для больших участков побережья.

В данной работе предлагается метод *RGB* комбинирования двух разнесённых по времени снимков одной территории, позволяющий довольно просто и надёжно выделить изменения береговой линии. Часть результатов с использованием этого метода нами были приведены в [5].

Для обработки были взяты изображения сканеров *TM (Landsat-5)*, *ETM+* (*Landsat-7*), *OLI (Landsat 8)*, которые представляют собой растровые цифровые изображения в формате *GeoTIFF*, сделанные в различных спектральных диапазонах. Конкретно нами использовался ИК-канал (*B5*), т.к. известно, что излучение инфракрасного участка спектра практически полностью поглощается тонкой пленкой воды, не проникая в глубину, что дает резкий контраст между морем и объектами суши и позволяет уверенно выделить границу между ними.

Процесс построения итоговой карты с изображением районов изменений береговой линии состоит из нескольких шагов. Первым шагом является выбор двух изображений изучаемого района, полученных в разное время. В нашем случае это были снимки: первый – за 1983 – 1988 гг., второй – за 2009 – 2011 гг. Поскольку в годовом цикле наименьшая изменчивость береговой линии наблюдается летом, то нами выбирались снимки за период июнь – август. Каждое из выбранных изображений интерполировалось на одну и ту же сетку с шагом $0,00045^\circ$ по долготе и $0,0003^\circ$ по широте (что, приблизительно, соответствует разрешению на местности 30×30 м). Трансформация данных на единую сетку позволяет впоследствии их определенным образом комбинировать и сравнивать.

Из полученных снимков строилось *RGB* изображение, где на *red* (красный) канал подавалось изображение за 2009 – 2011 гг., а на *blue* (голубой) и *green* (зеленый) каналы – второй снимок за 1983 – 1988 гг. Такой метод построения *RGB* изображения дает возможность выделить в цвете изменения береговой линии, причём отступление береговой линии будет давать в итоговом изображении области, окрашенные голубым цветом, а выдвижение – красным.

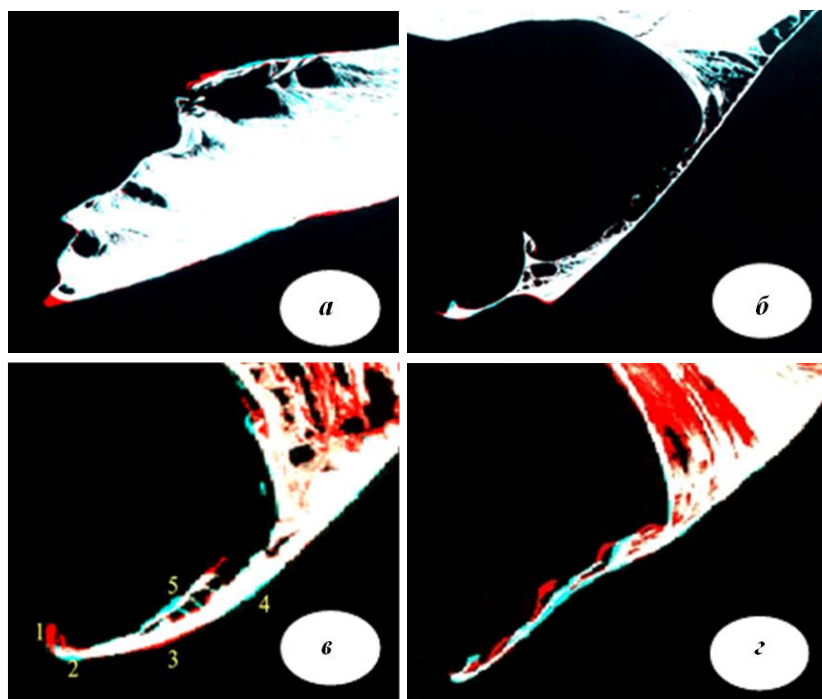
Для проверки работоспособности метода были обработаны изображения в районе Бакальской косы (северо-западное побережье Крыма). Выбор района был вызван тем, что это хорошо изученный участок побережья. Ранее здесь были получены изменения береговой линии с использованием данных *Landsat* с применением пакета *ArcGIS*, обработки данных спутников сверхвысокого разрешения, аэрофотосъемки, топографических и маршрутных контактных *GPS*-съемок измерений, выполнявшихся Морским гидрофизическим институтом на протяжении ряда лет [6]. Полученные нами результаты полностью подтвердили ранее сделанные выводы, как качественно, так и количественно, что свидетельствует о работоспособности предложенного метода обработки спутниковых изображений.

На рис.1 заметно, что береговая линия западной части Бакальской косы сместилась на восток примерно на 150 – 200 м, дистальная часть косы пере-



Р и с . 1 . Изменения береговой линии Бакальской косы, области отступления показаны голубым, нарастания – красным.

местилась на северо-восток на величину около 325 м, отделилась от тела косы, и образовался остров, который на ноябрь 2015 г. существует уже 5 лет. Хронология и причины этого процесса подробно рассмотрены в [6]. Здесь мы только отметим, что существующие планы добычи песка на Бакальской банке не оставляют надежду на природное восстановление косы в будущем, поскольку одна из причин образования острова – наблюдавшийся в последние годы дефицит наносов. Можно также сказать, что образование острова имеет скорее положительную сторону, чем отрицательную. По нашему мнению, во-первых, существенно увеличился водообмен между мелководной Бакальской бухтой и открытым морем, тем самым создались условия для улучшения её неблагоприятного экологического состояния, а, во-вторых, гнездование птиц на дистальном окончании косы (ныне острова) сделало это место малодоступным для человека.



Р и с . 2 . Изменения береговой линии Азовских кос: Бирючий о-в, 1988 – 2011 гг. (а); Бердянская, 1988 – 2010 гг. (б); Белосарайская, 1986 – 2011 гг. (в); Кривая, 1986 – 2011 гг. (г). Области отступления показаны голубым цветом, нарастания – красным.

Приведем некоторые результаты, полученные с использованием данной методики, на примере аккумулятивных кос так называемого «азовского типа», расположенных на северном побережье Азовского моря и имеющих ряд общих особенностей строения и литодинамики [7]. Все косы имеют одинаковое простирание – с северо-востока на юго-запад.

Коса Бирючий о-в до 1929 г. была отделена от Федотовой косы узким проливом. В настоящее время они вместе образует полосу суши длиной около 45 км и отделяют Утлюкский лиман от Азовского моря. На рис.2, а представлены результаты обработки спутниковых изображений за 1988 – 2011 гг. За это период юго-западная оконечность косы о-во Бирючий увеличилась в длину на величину около 300 м с увеличением площади на 20,4 га. К северо-востоку от мыса на восточном берегу отмечается чередование участков с отступанием и выдвиганием берега, с характерными величинами 90 – 120 м, с некоторым преобладанием тенденции к отступанию. В северной части косы наиболее значительные изменения выделяются в районе залива Оленя, выдвигание в сторону моря порядка 200 м.

Бердянская коса отделяет Бердянский залив от моря, своим возникновением она обязана реке Берда, впадающей в море восточнее основания косы. Юго-западная оконечность косы выдвинулась в море почти на 390 м с увеличением площади на 5,2 га (рис.2, б). В северной части оконечность косы уменьшилась на примерно 200 м, ее площадь соответственно сократилась на 12,8 га. На самой южной точке оконечности косы наблюдается выдвигание до 100 м. На других участках также наблюдается чередование зон выдвигания – отступления береговой линии с характерными величинами от 30 до 150 м.

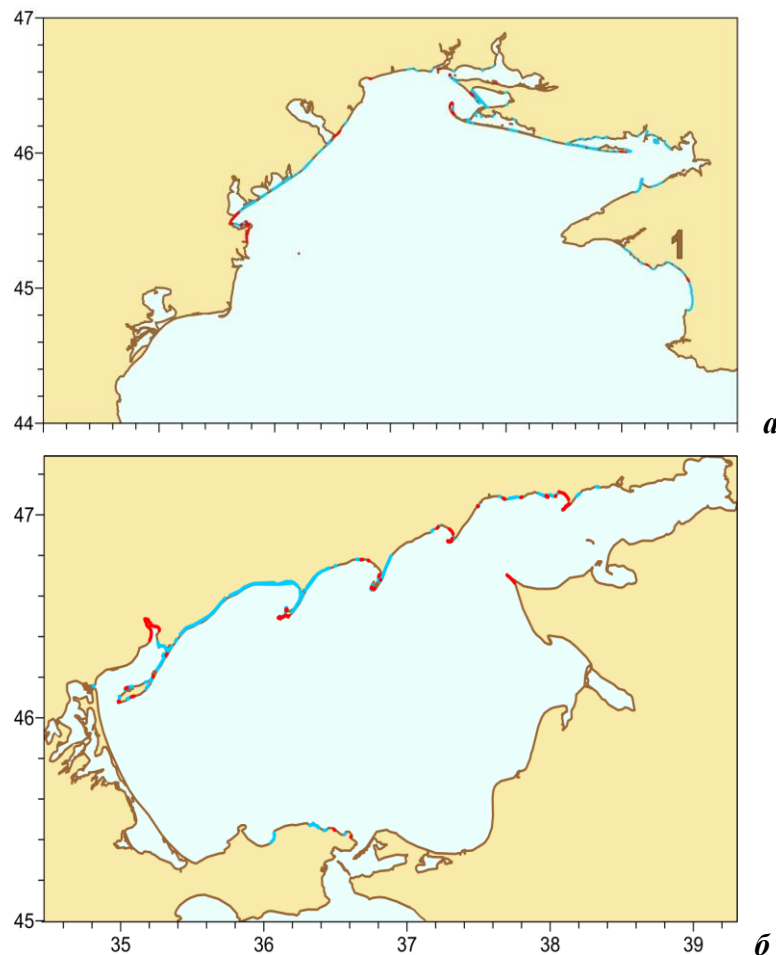
Белосарайская коса расположена в 25 км к западу от Мариуполя. Она примыкает к вершине Белосарайского залива, бух.Тараньей, которая имеет статус заповедника, однако находится в неблагоприятном состоянии из-за сокращения пляжей и заиливания дна. В южной части косы, отмеченной цифрой 1, наблюдается образование нового участка суши площадью 7,4 га, вытянутого с юга на север (рис.2, в). В самой южной точке, отмеченной цифрой 2, берег, наоборот, отступил примерно на 100 м к северу. На участке 3 берег выдвинулся от 25 до 65 м. На участках 4 и 5 суша отступила на 40 – 140 м.

Коса Кривая находится примерно в 50 км к востоку от Мариуполя, вдаваясь в море на 9 км. За период 1986 – 2011 гг. размеры и форма косы претерпели значительные изменения. С северо-западной стороны к косе причленилось несколько кос второго порядка, образуя полуострова, вытянутые с юго-запада на северо-восток (рис.2, г). Их длины составляют от 700 до 1200 м. Одновременно отмечается уменьшение ширины тела основной косы Кривая на величину до 130 м. При этом её типичная ширина в настоящее время составляет всего 20 – 40 м.

Таким образом, показано, что в динамически активных зонах северного побережья Азовского моря в условиях значительных изменений береговой линии открываются возможности изучения межгодовой изменчивости даже за относительно небольшие промежутки времени порядка 3 – 5 лет. При этом, для участков побережья с относительно небольшими изменениями, однако имеющими важное хозяйственное значение, для такого рода исслед-

дований предпочтительно использовать спутники с сенсорами сверхвысокого разрешения.

Ещё одним преимуществом предлагаемого метода является сравнительно простой охват значительных по протяженности участков побережья. Так, с помощью описанного выше метода были рассчитаны и построены карты изменений положения береговой линии для северного побережья Черного и Азовского морей (рис.3). Линии красного и голубого цвета указывают на районы побережья, где за последние 27 – 30 лет произошли значительные изменения береговой линии на величину порядка 30 м или более. На Крымском п-ове выделяется район западного побережья от техногенного залива Донузлав до м.Лукулл, где отмечается значительное отступление суши. Диапазон изменений почти по всей длине берега данного района находится в пределах 30 – 45 м. Только на двух участках зафиксировано выдвигание берега (в районах строительства поперечных гидротехнических



Р и с . 3 . Области отступления (голубой) и нарастания (красный) береговой линии в Черном (а) и Азовском (б) морях по данным обработки изображений, полученных со спутников серии *Landsat*.

сооружений). Более подробное описание литодинамических процессов в этом районе приведено в [6]. Кроме этого, на полуострове выделяются уже упомянутый выше район Бакальской косы и северного побережья Керченского п-ова. В остальных районах отмечены изменения менее 30 м.

Значительная часть северного побережья Черного моря представляет собой зону отступающего берега. Только на отдельных участках наблюдается выдвижение береговой линии. Здесь можно выделить существенный рост дистальных частей Тендровской косы (особенно западной её оконечности), выдвижение берега к северу от Днестровского лимана и большие изменения обоих знаков в районе дельты Дуная. На карте также заметны и районы, где за 30 лет отмечены изменения менее 30 м. Однако такие берега вряд ли можно отнести к стабильным, поскольку изменения около 1 м/год представляют собой очень существенную величину. На карте северного побережья Азовского моря изображена несколько иная картина. Практически всё его протяжение отмечено сплошной полосой либо голубого, либо красного цвета. Особенно это касается западной части побережья. Если выделить наиболее главную особенность, то это рост дистальных оконечностей кос и их северо-западных частей на фоне значительного отступления береговой линии в её вогнутостях.

В заключение отметим, что предлагаемая методика обработки двух снимков одного и того же региона, сделанных в разное время, позволяет достаточно быстро и точно оценить изменения береговой линии. Она позволяет фактически в экспресс режиме выделить районы с большими изменениями береговой линии по данным изображений спутников серии *Landsat* открытого доступа. После этого можно детально исследовать район с помощью снимков сверхвысокого разрешения. Методика применима к водоемам любого типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лабутина И.А.* Дешифрирование аэрокосмических снимков.– М.: Аспект Пресс, 2004.– 184 с.
2. *Ruiz L.A., Pardo J.E., Almonacid J., Rodriguez B.* Coastline automated detection and multiresolution evaluation using satellite images // Proc. coastal zone 07.– Portland: Oregon, 2007.– P.201-224.
3. *Брыксина Н.А.* Изучение динамики береговой зоны Балтийского моря с использованием космических снимков // Естественные науки (биология, география).– 2014.– вып.1.– С.50-59.
4. *Сухачева Л.Л., Кильдюшевский Е.И., Смирнова И.О.* Возможности и перспективы мониторинга береговых зон на основе использования данных дистанционного зондирования // Мониторинг состояния геологической среды береговой зоны морей, крупных озерных водоемов и рек. «НИИКАМ» – филиал ФГУП ЦНИИмаш. 22-23 мая 2013 г.– СПб: ВСЕГЕИ, 2013
5. *Современное состояние береговой зоны Крыма* / Под ред. Ю.Н.Горячкина.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2015.– 252 с.
6. *Горячкин Ю.Н., Иванов В.А., Удовик В.Ф., Харитонов Л.В., Шутов С.А.* Современное состояние и эволюция Бакальской косы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012.– вып.26, т.1.– С.8-15.

7. *Давыдов А.В.* Современная морфодинамика береговой зоны кос «Азовского типа», расположенных в пределах Украины // XXIV Междунар. береговой конф., посвященной 60-летию со дня основания Рабочей группы «Морские берега» «Морские берега – эволюция, экология, экономика». Туапсе, 1-6 октября 2012 г.– Краснодар: Издательский дом – Юг, 2012.– т.1.– С.117-121.

Материал поступил в редакцию 02.11.2015 г.

R.R.Stanichnaya, S.V.Stanichny, Yu.N.Goryachkin

METHOD OF SATELLITE DATA ANALYSIS FOR COASTLINE CHANGES

The method of analysis of coastline changes based on satellite data is suggested. The combination of IR channels for two separated in time images is used, this gives in the final image of the same area of the coast districts retreat and extensions coast. Landsat data allow detecting the zones with the significant changes in the coastline for the northern areas of the Black Sea and the Sea of Azov during the last 30 years.

KEYWORDS: изменчивость береговой линии, методика анализа спутниковых изображений, Черное и Азовское море