

Ю.Н.Горячкин, Л.В.Харитонова

Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь

ДИНАМИКА БЕРЕГОВОЙ ЛИНИИ В РАЙОНЕ БАКАЛЬСКОЙ КОСЫ

На основе анализа космических снимков, исторического ряда географических карт и натурных наблюдений рассмотрена динамика береговой линии в районе северо-западного Крыма (Бакальская коса). Показано, что в течение последних 200 лет западная ветвь Бакальской косы смещалась к востоку. В период с 1984 по 1997 гг. происходили небольшие смещения положения береговой линии, связанные с сезонными изменениями штормового режима. Первое отделение дистальной части от основного тела косы произошло в 1997 г. Далее эволюция дистальной оконечности Бакальской косы характеризовалась циклами отделения-восстановления перешейка с уменьшением его ширины и изменением конфигурации. В 2010 г. произошло окончательное отделение дистальной части от основного тела косы и превращение её в остров. До 2014 г. ширина разделившего косу пролива быстро увеличивалась, достигнув в 2014 г. 1 км. За период 2010 – 2018 гг. площадь образовавшегося острова сократилась более чем на 0,2 км². Сокращение площади острова происходило за счет размыва западной его части, одновременно сам остров смещался к северо-востоку.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *динамика береговой линии, спутниковые снимки, Бакальская коса, Крым*

doi: 10.22449/2413-5577-2018-4-22-30

Введение. Вопрос о современной изменчивости береговой линии в районе Бакальской косы продолжает оставаться актуальным как в научном, так и в практическом плане. Первый связан с необходимостью более глубокого понимания современных тенденций изменений берегов в Черном море в условиях изменяющегося климата (прежде всего, ветро-волновых условий и уровня моря), а также возможностью проверки адекватности математических моделей, воспроизводящих литодинамические процессы, на примере района, отличающегося ускоренным их ходом. После отделения дистальной части косы и превращения её в остров возник и практический вопрос, связанный с изменением водообмена Бакальской бухты с открытым морем и экологической ситуации на существующих здесь особо охраняемых природных территориях [1].

Описание эволюции Бакальской косы в период 1986 – 2009 гг. на основе анализа спутниковых снимков высокого разрешения позволило сделать следующие основные выводы [2]:

1) дистальная часть косы сместилась в северо-восточном направлении на 300 м со средней скоростью 13 м/год, при этом положение корневой части было относительно стабильным;

2) наблюдалось уменьшение ширины косы в районе перешейка, соединяющего основное тело косы с дистальной частью;

3) западная часть перешейка косы сместилась к востоку на 160 м, восточ-

© Ю.Н.Горячкин, Л.В.Харитонова, 2018

Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. вып.4. С.22-30.

ная – на 100 м. Прослеживалось надвигание пересыпи на акваторию Бакальского озера. На самой пересыпи неоднократно образовывались прораны;

4) дистальная часть неоднократно отделялась от основного тела косы промоинами шириной до 50 – 100 м. В 2007 – 2009 гг. это процесс активизировался.

Отдельные сведения об изменчивости береговой линии в районе Бакальской косы содержатся в [3 – 7].

В данной работе мы ставим целью рассмотреть в исторической ретроспективе эволюцию береговой линии Бакальской косы, в том числе образовавшегося о-ва Песчаный, и прилегающих участков побережья. Мы считаем такое название острова естественным, поскольку на навигационных картах крайний мыс на бывшей дистальной части косы обозначался как Песчаный.

Материалы и методы исследований. В работе использовался исторический ряд географических карт, начиная с 1787 г. Их анализ носит качественный характер, но дает информацию об эволюции береговой линии за длительный период. Кроме этого, использовались данные аэрофотосъемки, сделанной в 90-х гг. XX в., в 2017 и 2018 гг.

В последнее десятилетие появился ряд сервисов, на которых в открытом доступе размещены космические снимки в высоком (например, сайт Геологической службы США [8]) и сверхвысоком разрешении (например, сайт *Google Earth*). Преимуществами первого являются значительный временной интервал накопленных снимков (с 1984 г.), периодичность наблюдения одной и той же территории (16 дней), относительно высокое разрешение снимков (от 15 до 30 м на пиксел); преимущество второго – существенно лучшее разрешение снимков (до 0,5 м на пиксел). Развитие базы спутниковых снимков открытого доступа (появление более удобного пользовательского интерфейса и количества размещенных снимков в [8]) позволило более подробно проанализировать процесс эволюции дистальной части Бакальской косы и образования пролива и о-ва Песчаный.

Для анализа изменений положения береговой линии района Бакальской косы нами использовалась процедура географической привязки и преобразования снимков и карт [2, 4]. Для наиболее четкого выделения границы суша – море комбинирование изображений спутниковых снимков серии *Landsat* проводилось в спектральном диапазоне красного видимого (0,63 – 0,69 мкм), ближнего (0,78 – 0,89 мкм) и среднего (0,90 – 1,57 мкм) инфракрасных каналов. Полевое дешифрирование снимков проводилось по данным, полученным в ходе экспедиций в северо-западный Крым в июне 2017 и июне 2018 гг. Кроме этого, нами использовались материалы натуральных наблюдений, полученные в ходе экспедиций Морского гидрофизического института РАН и Института океанологии им. П.П.Ширшова РАН.

Анализ и обсуждение результатов. Интересно проследить развитие косы, последовательно просмотрев исторический ряд географических карт. Так, впервые Бакальская коса отчетливо видна на карте 1787 г. На ней же нынешние Лебяжьи (прежде Сары-Булат) о-ва также показаны в виде косы. На карте 1817 г. коса показана достаточно подробно в виде отростка, утончающегося к дистальной части. Это самая ранняя из известных карт Крыма, которая была сделана на основе топографических съемок. На месте совре-

менных Лебяжьих о-вов находится один остров, отделенный от суши небольшой протокой. На карте 1842 г. Бакальская коса показана с уже загнутой в виде крючка дистальной частью. Остров на месте Лебяжьих о-вов разделился на два: один крупный и один небольшой вблизи берега. Карта имеет хорошую точность даже по современным меркам. Примерно так район выглядит и на картах 1847 г. и 1862 г. На карте-трехверстовке 1865 г. дистальная часть Бакальской косы показана в виде утончающегося крючка, загнутого под 45° к основному телу косы. По-прежнему существует один большой Лебяжий о-в и один маленький, однако отчетливо видна тенденция к разделению большого на 3 – 4 острова. На карте 1897 г. впервые коса названа Бакальской, а её оконечность Песчаным носом (Кьян-Мурун). На картах (точнее схемах) 20-х гг. XX в. на западной части косы показаны соляные промыслы, а на восточной – рыбный завод. На карте РККА (Рабоче-Крестьянской Красной Армии) первого издания 1938 г. Лебяжьи о-ва состоят из трех отдельных. На карте-километровке РККА 1941 г. дистальная часть Бакальской косы впервые показана не в виде сужающейся стрелки, а в виде каплеобразного полуострова, загнутого к востоку. Примерно так она изображается и на всех последующих картах, вплоть до самой подробной на сегодняшний день топографической карты Крыма в масштабе 1 : 200 000, которая показывает полуостров по состоянию местности на 1989 г. Карта составлена по материалам аэрофотосъемки, проводившейся с 1955 по 1975 гг., которая уточнялась в последующие годы. На ней Лебяжьи о-ва включают уже 5 островов, из них два малых. Мы не случайно проследили эволюцию Лебяжьих о-вов. Не исключено, что и Бакальская коса в дальнейшем будет развиваться по сценарию бывшей Сары-Булатской косы. Качественный анализ в целом показывает, что в течение рассматриваемого периода западная ветвь Бакальской косы смещалась к востоку. Это подтверждается и геоморфологическими данными, в частности, находками озерного ила на урзе западной части косы в 1945, 2007 и 2010 гг. [6, 11]. Восточнее косы вплоть до пос. Аврора имеются признаки нарастания берега.

Более подробный анализ космических снимков высокого разрешения по сравнению со сделанным нами в [2] показал, что в период с 1984 по 1997 гг. происходили небольшие смещения положения береговой линии Бакальской косы (флуктуации ширины перешейка, связывающего основное тело косы с оголовком, незначительные изменения конфигурации береговой линии оголовка косы), связанные с сезонными изменениями штормового режима.

Первое отделение острова от основного тела косы, зафиксированное на спутниковом снимке *Landsat 4-5*, произошло в декабре 1997 г. Промоина образовалась в период осенних штормов; определить точные даты не представляется возможным, так как спутниковые изображения в период с 6 августа по 17 декабря 1997 г. отсутствуют. Тогда остров площадью $0,43 \text{ км}^2$ просуществовал вплоть до мая 1998 г., максимальная ширина промоины составила 760 м, полное закрытие прорана отмечено на снимке от 5 июня 1998 г. В продолжение следующих месяцев ширина перешейка увеличивалась, однако, он имел нестабильную S-образную форму. В мае 1999 г. образовался новый проран в теле косы шириной до 170 м, он просуществовал два месяца, уже к 26 июля коса соединилась с островом перешейком S-образной

формы. В следующие месяцы до ноября 1999 г. форма перешейка мало менялась. Состояние косы в зимние месяцы не известно в виду отсутствия спутниковых снимков. На снимке 6 марта 2000 г. снова зафиксировано отделение острова промоиной, ширина которой составила 150 м, также отмечено смещение направления простираения оконечности перешейка к северо-востоку. Впервые остров просуществовал более полугода, площадь его составляла около 0,45 км². Практически полное закрытие прорана зафиксировано на снимке от 26 декабря 2000 г., восстановление конфигурации оконечности косы отмечено лишь к 9 марта 2001 г. В продолжении последующих двух лет конфигурация и положение дистальной оконечности косы оставались относительно стабильными.

Новый этап реформирования дистальной оконечности косы начался в промежутке между 17 мая и 21 июля 2003 г. За этот период произошло перемещение наносов с запада на северо-восток оголовка косы, перешеек снова стал приобретать нестабильную S-образную форму. Следующие семь лет эволюция дистальной оконечности Бакальской косы характеризовалась истончением ширины перешейка с дестабилизацией формы (попеременные изменения формы с прямолинейной на изогнутую) и изменением конфигурации оконечности косы (размыв с северо-запада, нарастание аккумулятивных форм к северо-востоку и юго-востоку с последующим их размывом).

Постепенное уменьшение ширины перешейка привело к снижению устойчивости узкой полоски суши перед штормовыми воздействиями. В период между 10 и 17 мая 2009 г. образовался проран в центральной части перешейка шириной до 110 м, просуществовавший менее двух месяцев. Следующий размыв перешейка произошел в период между 17 ноября 2009 г. и 6 февраля 2010 г. На этот раз промоина имела ширину около 840 м. Частичное восстановление перешейка зафиксировано на спутниковых изображениях в периоды с 6 июня по 16 августа и 26 сентября 2010 г.

Контактные наблюдения, сделанные нами с помощью геодезических GPS систем, показывали, что каждый раз после цикла отделения-восстановления перешеек восстанавливается, но его ширина уменьшается [7]. К лету 2010 г. ширина перешейка составляла всего 10 – 12 м, а сам он принял резко выраженную S-образную форму (рис.1).

Наконец в сентябре – октябре 2010 г. произошло окончательное отделение дистальной части и превращение её в остров [9]. Ширина образовавшегося пролива быстро нарастала и составила по данным серии снимков спутника *Landsat*: 190 м (12 октября 2010 г.), 360 м (13 ноября 2010 г.), 640 м (31 декабря 2010 г.), 770 м (21 марта 2011 г.), 850 м (22 апреля 2011 г.). Эхолотный промер, проведенный нами в сентябре 2011 г. показал, что максимальная глубина в промоине достигала 3 м.

До 2014 г. ширина разделившего косу пролива быстро увеличивалась за счет размыва песчаного перешейка, достигнув значения более 1 км. В последнее пятилетие это расстояние варьирует и составляет около 900 – 1000 м (табл.1). Эхолотный промер, проведенный в июне 2018 г., показал, что ширина промоины составляет около 1 км, а глубина 3 – 6 м, площадь острова по данным аэрофотосъемки дроном 0,31 км² [10]. Однако длина и конфигурация новой оконечности косы быстро меняется. Так, уже в июле 2018 г. она увеличилась на 150 м.



Р и с . 1 . Вид S-образного перешейка между дистальной частью (*нижняя часть снимка*) и основным телом (*верхняя часть*) Бакальской косы 16 июня 2010 г.

По спутниковым снимкам серии *Landsat* нами произведен расчет значений площадей о-ва Песчаный в период с 2010 по 2018 гг. (табл.1). За проанализированные 8 лет площадь острова сократилась более чем на 0,2 км², или на 36 % от площади острова на 17 сентября 2010 г. Наиболее активная деградация площади острова произошла в 2011 и 2017 гг., когда ежегодное сокращение площади острова составляло около 0,06 км². Стоит отметить, что в период между 2012 и 2016 гг. процесс деградации острова несколько приостановился и в среднем составил около 0,024 км². В период с 17 августа 2013 по 20 августа 2014 гг. было даже зафиксировано увеличение площади острова на 0,019 км². Необходимо отметить, что сокращение площади острова происходит за счет размыва, главным образом, западной его части. Одновременно сам остров смещается к северо-востоку. Подтверждением этого

Таблица 1. Морфометрические характеристики дистальной оконечности Бакальской косы в период с 2010 по 2018 гг.

дата	ширина промоины, м	площадь острова, км ²
17 сентября 2010 г.	350	0,56
28 августа 2011 г.	650	0,50
6 августа 2012 г.	680	0,46
17 августа 2013 г.	860	0,43
20 августа 2014 г.	1050	0,45
23 августа 2015 г.	880	0,42
9 августа 2016 г.	900	0,38
28 августа 2017 г.	1000	0,37
30 августа 2018 г.	950	0,36

является и тот факт, что маячный знак в виде железной фермы высотой 15 м в 2007 г. находился в 58 м от уреза, в декабре 2013 г. он находился уже в море в 16 м от уреза, а в 2015 г. был опрокинут и разрушался (рис.2).

Что касается корневой части Бакальской косы, то по данным снимков сверхвысокого разрешения в западной части в месте примыкания косы к активному глинистому клифу наблюдается активное отступление берега. Точная привязка снимков по сохранившемуся железобетонному строению и проселочным дорогам в этом районе показывает,



Рис. 2. Маячный знак на дистальной части Бакальской косы 29 августа 2007 г.

но. В нашем распоряжении было всего два снимка сверхвысокого разрешения и однозначного вывода из них сделать невозможно. Анализ спутниковых данных *Landsat* тоже не показывает выраженных изменений. Учитывая разрешение этих снимков, можно сказать, что изменения, видимо, относительно невелики и не имеют в настоящее время какой-либо устойчивой тенденции.

Однако к востоку от корневой части восточной ветви такая тенденция хорошо заметна. За последние 10 лет здесь обнаруживаются явные признаки нарастания берега. С 2007 г. на берегу Бакальской бухты резко возросло количество отмерших водорослей. В последующие годы их накопление продолжалось, очищение залива и берега не происходило даже в зимний период.

что в максимуме между 2003 и 2016 гг. здесь берег отступил на 75 м, т.е. средняя скорость размыва составила 5,6 м/год, что является исключительно большой величиной. Скорость размыва уменьшается по мере продвижения к юго-западу от косы, что хорошо заметно на рис.3.

В целом, потеря площади в корневой части косы на протяжении около 700 м за 13 лет (2003 – 2016 гг.) составила около 26 000 м², а среднее отступление 37 м (2,8 м/год). Юго-западнее косы на глинистом клифе скорость отступления за тот же период значительно меньше – около 0,7 м/год, что фактически совпадает с более ранними оценками, сделанными в [11, 12].

Что касается восточной ветви косы, то здесь количественно определить изменения береговой линии затруднительно.



Рис. 3. Береговая линия в корневой части западной ветви Бакальской косы в июне 2003 г. (красная) на фоне снимка из космоса (июнь 2016 г.)



Рис. 4. Вид берега, примыкающего к восточной ветви Бакальской косы, в июне 2008 г. (а), в июне 2018 г. (б).

Частичное перегнивание водорослей, перемешивание их с донными наносами и уплотнение образовали субстрат для заселения его галофитной растительностью. На участках берега, где периодическая очистка пляжа от водорослей перестала проводиться, за последнее десятилетие ширина аккумулятивного берега увеличилась более чем на 20 м (рис.4).

Заключение. На основании вышеизложенного можно сделать следующие основные выводы:

- в течение последних 200 лет западная ветвь Бакальской косы смещалась к востоку;
- в период с 1984 по 1997 гг. происходили небольшие смещения положения береговой линии Бакальской косы, связанные с сезонными изменениями штормового режима;
- первое зафиксированное на спутниковых снимках серии *Landsat* отделение дистальной части от основного тела косы произошло в декабре 1997 г.;
- в период 2003 – 2010 гг. эволюция дистальной оконечности Бакальской косы характеризовалась циклами отделения-восстановления перешейка с уменьшением её ширины и изменением конфигурации;

- в сентябре – октябре 2010 г. произошло окончательное отделение дистальной части от основного тела косы и превращение её в остров;
- до 2014 г. ширина разделившего косу пролива быстро увеличивалась, достигнув значения более 1 км. В последнее пятилетие это расстояние варьирует и составляет около 0,9 – 1,0 км;
- за период 2010 – 2018 гг. площадь образовавшегося острова сократилась более чем на 0,2 км². Сокращение площади острова происходит за счет размыва западной его части. Одновременно сам остров смещается к северо-востоку;
- в западной части, в месте примыкания косы к активному глинистому клифу наблюдается активное отступление берега. В период 2003 – 2016 гг. берег отступил на 75 м, средняя скорость размыва составила 5,6 м/год. Скорость размыва глинистого клифа уменьшается по мере удаления от косы;
- изменения восточной ветви косы относительно невелики и не имеют в настоящее время какой-либо устойчивой тенденции;
- берег, примыкающий к восточной ветви Бакальской косы, обнаруживает явные признаки нарастания, за последнее десятилетие ширина аккумулятивного берега увеличилась более чем на 20 м;

В заключении отметим, что до сих пор отсутствует прогноз дальнейшей эволюции Бакальской косы и всего окружающего её природного комплекса. Считаем, что такой прогноз должен базироваться на продолжении всесторонних исследований, включающих натурные наблюдения и математическое моделирование природных процессов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект №14-17-00547) и, частично, государственного задания по теме 0827- 2018-0004.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мильчакова Н.А., Александров В.В. Морские охраняемые акватории и проблемы природопользования в Каркинитском заливе (Черное море) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря.– 2018.– вып.4.– С.50-58.
2. Горячкин Ю.Н., Харитонова Л.В. Изменения береговой линии Крыма по спутниковым данным // Причорноморський екологічний бюлетень «Стан та проблеми берегової зони морів України».– 2010.– вип.1 (35), березень.– С.122-129.
3. Горячкин Ю.Н. Изменения береговой линии аккумулятивных берегов Западного Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– 2011.– вып.25, т.1.– С.8-18.
4. Горячкин Ю.Н., Харитонова Л.В., Долотов В.В. Изменчивость береговой линии северо-западного Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– 2009.– вып.19.– С.18-26.
5. Горячкин Ю.Н., Иванов В.А. Современное состояние черноморских берегов Крыма // Доп. НАН України.– 2010.– № 10.– С.78-82.
6. Иванов В.А., Горячкин Ю.Н., Удовик В.Ф., Харитонова Л.В., Шутов С.А. Современное состояние и эволюция Бакальской косы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– 2012.– вып.26, т.1.– С.8-15.
7. Горячкин Ю.Н. Мониторинг изменчивости береговой зоны в районе Бакальской косы // Системы контроля окружающей среды.– 2008.– С.242-244.
8. *glovis.usgs.gov*

9. *Горячкин Ю.Н., Иванов В.А.* Новый остров в Черном море? // Доп. НАН України.– 2013.– № 8.– С.100-104.
10. *Руднев В.И.* Особенности рельефа дна прибрежной зоны Бакальской косы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря.– 2018.– вып.4.– С.15-21.
11. *Зенкович В.П.* Берега Чёрного и Азовского морей.– М.: Изд-во геогр. лит., 1958.– 371 с.
12. *Шуйский Ю.Д., Выхованец Г.Д.* Карта средней скорости абразии и аккумуляции 1960 – 1994 гг. // Атлас охраны природы Черного и Азовского морей.– С.-Пб.: ГУНиО МО Российской Федерации, 2006.– С.44.

Материал поступил в редакцию 9.10.2018 г.
После доработки 2.11.2018 г.

Yu.N.Goryachkin, L.V.Kharitonova

DYNAMICS OF THE SHORELINE IN THE AREA OF THE BAKALSKAYA SPIT

Analyzing the satellite images, the historical geographic maps and field observations, the coastline dynamics of the northwestern Crimea (the Bakalskaya Spit) are considered. It is shown that during the last 200 years, the western branch of the Bakalskaya Spit shifted to east. From 1984 to 1997 there were small shifts in the coastline position due to seasonal changes in the storm regime. The first separation of the island from the main spit body occurred in 1997. Further, the evolution of the Bakalskaya Spit distal was characterized by separation and renewal of an isthmus with a width decrease and a configuration change. In 2010, the distal part was finally separated from the main spit body and was transformed into an island. Until 2014, the width of the strait dividing the spit was rapidly increased, reaching 1 km in 2014. For 2010 – 2018 the formed island area was reduced by more than 0,2 km². The island area is reduced by erosion, its western part; at the same time, the island itself shifts to northeast.

KEYWORDS: coastline dynamics, satellite imagery, the Bakalskaya Spit, the Crimea