

В.В.Долотов, Ю.Н.Горячкин, А.В.Долотов

Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ БЕРЕГОВОЙ ЛИНИИ ПЛЯЖА ПОСЕЛКА ЛЮБИМОВКА

На основе спутниковых изображений участка крымского побережья в районе пос.Любимовка выполнен анализ статистических характеристик смещений береговой линии пляжа за период 2009 – 2014 гг. Использовался модуль *DSAS (Digital Shoreline Analysis System)* в составе геоинформационной системы *ESRI ArcGIS Desktop*. Показано, что в данный период пляж пос.Любимовка в целом отступал со средней скоростью 1,4 м/год. При этом в южной части наблюдалась аккумуляция, в центральной и северной частях пляж испытывал размыв. Береговая линия испытывала значительные межгодовые и сезонные колебания своего положения. Использованный для расчетов модуль *DSAS* показал значительные преимущества в подготовке и анализе данных перед традиционными способами.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *береговая линия, изменчивость, статистический анализ, Любимовка, Крым*

Изменения пространственного положения береговой линии является одним из основных критериев для оценки динамики песчаных берегов. Значительные смещения, особенно однонаправленные тенденции, не связанные с естественными сезонными циклами, наиболее зримо свидетельствуют о состоянии береговой зоны, наличии фазы аккумуляции или размыва. В этом смысле динамика профилей пляжа и подводного берегового склона, обуславливающая изменения положения береговой линии, имеет меньшее практическое значение (например, для оценки рекреационного потенциала) и в данной работе не рассматривается.

Для оценки динамики береговой линии используют различные методы. Помимо контактных, большую популярность в последнее время приобретает анализ спутниковых изображений, в том числе и для берегов Крыма [1]. Преимущества и недостатки этого метода подробно изложены в [2]. Здесь только отметим, что периодичность получения космических снимков дает возможность использовать их серии, что, в свою очередь, позволяет применять статистические методы анализа.

В настоящей работе оценен вариант использования статистического модуля *DSAS (Digital Shoreline Analysis System)* для анализа динамики береговой линии на примере пляжа пос.Любимовка, относящегося к территории города федерального значения Севастополь (рис.1). Интерес к изучению этого объекта вызван, во-первых, тем, что он является наиболее крупной рекреационной зоной региона, а, во-вторых, тем, что он расположен в устье р.Бельбек – единственной почти не зарегулированной реки Крыма (сохраняется около 80 % величины естественного стока), что обеспечивает приток твердых наносов, оцениваемый величиной около 18000 м³/год [3]. Хотя приток и относительно невелик, однако он пока обеспечивает существование самого широкого в регионе пляжа.



Р и с. 1. Пространственное положение пляжа пос.Любимовка.

Формирование баланса пляжеобразующего материала, соответствующие изменения рельефа береговой зоны и положения береговой линии в наибольшей степени определяются поступлением аллювия с твердым стоком р.Бельбек и перераспределением объемов наносов во вдольбереговом направлении. На других реках Западного Крыма, где твердый сток практически иссяк, состояние пляжей, примыкающих к устьям, неблагоприятно. Существующие в настоящее время планы зарегулировать и р.Бельбек только усиливают интерес именно к этому участку побережья.

Пляж пос.Любимовка сложен вблизи уреза воды преимущественно гравийно-галечным материалом, на остальной территории – в основном песком. Длина пляжа составляет около 2,2 км, ширина до 60 м. В район приустьевого взморья, помимо мелкодисперсных фракций, выносятся песок и гравий. Однако поступление аллювия в течение года неравномерно, наибольший приток связан с сильными паводками, при которых возможен вынос крупной гальки [4, 5]. Участок побережья, примыкающий с севера к пляжу пос.Любимовка, представляет собой активно отступающий клиф высотой до 30 м, который выработан в красно-бурых глинах плиоцена. Типичная ширина прислоненных пляжей (15 – 20 м) не позволяет полностью гасить волновую энергию, следствие чего клиф отступает со среднегодовой скоростью около 1 м, однако поступление твердой фракции от его разрушения незначительно. К югу от пляжа пос.Любимовка ранее берег имел такое же строение. Однако в 1976 – 1978 гг. здесь производились работы по выполаживанию и террасированию берега, в результате чего ландшафт берега коренным образом изменился. Клиф исчез, а к концу 1989 г. было закончено строительство шести бун и набережной длиной 600 м. Берегозащитные сооружения позволили предотвратить угрозу обвалов и создать новую зону отдыха, объединенную с пос.Любимовка [6]. Анализ спутниковых снимков (положение входящих углов береговой линии у гравитационных бун) показывает, что преобладающее направление движения донных наносов на этом участке побережья – с севера на юг [4]. Наиболее значительная межгодовая изменчивость положения береговой линии ранее зафиксирована на северном и центральном участках пляжа [7, 8].

В настоящей работе ставилась цель на основе спутниковых данных проверить достоверность полученных ранее выводов о динамике береговой линии пляжа пос.Любимовка и получить новые с использованием специализированного расчетного модуля *DSAS*, оценить его возможности для анали-

за динамики берегов. В работе не рассматривается связь изменения береговой линии с внешними воздействиями, что составляет цель следующего этапа работы.

В качестве источника данных в работе использовались результаты оцифровки космических снимков, размещенных на ресурсе *Google Earth*, за период 2004 – 2014 гг. Снимки до 2009 г. были забракованы вследствие низкой точности пространственной привязки на раннем этапе внедрения ресурса. К дальнейшей обработке было принято 11 снимков за период 2009 – 2014 гг. с разрешением около 0,6 м на один пиксел. Положение оцифрованных береговых линий было скорректировано с использованием двух контрольных объектов – буны в южной части территории и угла забетонированной площадки в северной.

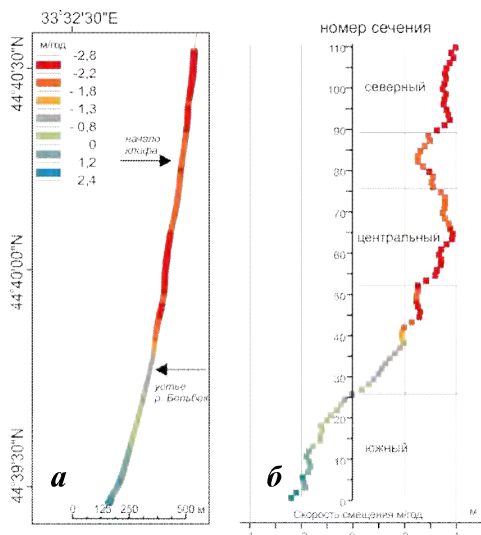
В процессе пространственной корректировки был установлен важный факт, заключающийся в том, что отдельные фрагменты снимков ресурса *Google Earth* могут быть смещены относительно друг друга не только за счет пространственного сдвига, что отмечалось нами и ранее, но и за счет сжатия/растяжения и даже вращения. Так, на исследуемом участке после выполнения пространственного сдвига всех снимков к точке привязки, расположенной на буне, в северной части пляжа оставалось небольшое несовпадение контуров неподвижных объектов, что потребовало дополнительного сжатия и поворота изображений для более корректной их привязки. Процедура совмещения снимков показала, что для точной привязки, соответствующей разрешению снимков, необходимы четкие ориентиры на земной поверхности, что ограничивает возможности использования снимков открытого доступа вне населенных пунктов.

Модуль *DSAS*, использованный нами в процессе анализа, представляет собой расчетную надстройку к геоинформационной системе *ESRI ArcGIS Desktop* [9]. Он позволяет в автоматическом режиме выполнить построение линий поперечных сечений пляжа через заданный интервал и рассчитать статистические характеристики пространственного смещения берега относительно опорной линии с учетом временных меток. Полный алгоритм расчета включает вычисление 13 показателей, из которых три представляют результаты анализа смещений, а остальные характеризуют статистические величины для отдельных сечений. Каждый вид данных оценивается с учетом их возможной погрешности и выражается в виде пространственно связанных таблиц различных статистических характеристик.

Для расчета использовалась сгенерированная модулем *DSAS* серия линий поперечных сечений пляжа с дистанцией в 20 м. Результатом расчетов является таблица статистических характеристик, включающая пространственную привязку точек пересечения сечений с линиями берега, а также оценка первых статистических моментов по каждому сечению.

На рис.2 приведены величины среднего смещения береговой линии пляжа на различных участках по его длине.

Максимальные изменения за весь анализируемый период приходятся на три участка, которые, следуя принятой ранее терминологии [4, 6], можно назвать южным, центральным и северным. Изменения примерно одинаковы по величине (от 2,4 до 2,8 м/год) на южном и центральном участках и несколько



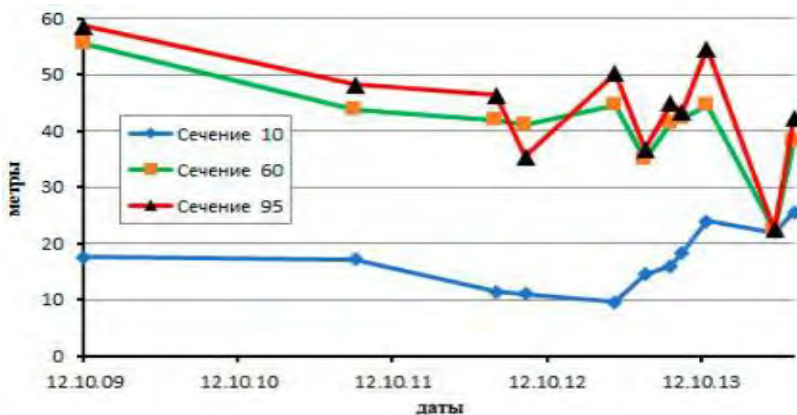
Р и с . 2 . Величины пространственного смещения линии уреза воды пляжа: среднегодовая скорость (отрицательные значения соответствуют отступанию берега) (а); среднегодовая скорость за весь промежуток времени без учета изменчивости внутри периода наблюдений (отрицательные значения соответствуют выдвигению пляжа в море) (б).

меньше (до 2 м/год) на северном. Между ними располагаются участки с меньшими значениями смещений, которые, однако, также достаточно протяженные.

Из рис.2, б видно, что в целом за анализируемый период выдвигение

берега отмечалось только в южной части пляжа, этот участок составляет примерно 25 % общей протяженности береговой линии. Северная граница этого участка соответствует устьевой зоне р.Бельбек. На остальных участках за пятилетний период отмечалось отступление береговой линии. Если брать весь рассматриваемый участок побережья, то для него в период 2009 – 2014 гг. было характерно отступление береговой линии со скоростью около 1,4 м/год. Однако для отдельных участков оно достигало 4 м/год. Из этого примера хорошо видно, какой разброс значений может иметь анализ изменений по контактными данным на отдельных створах.

Приведенные оценки не учитывают межгодовую изменчивость, которая, как видно из рис.3, довольно велика, особенно в центральной части рассматриваемого района. На фоне отрицательного тренда здесь отмечены значительные колебания береговой линии, достигавшие на отдельных отрезках даже величины 30 м. В южной части колебания положения береговой линии на фоне небольшого положительного тренда, как правило, не превышали 15 м.



Р и с . 3 . Временной ход изменений положения береговой линии относительно базовой на южном (синяя кривая), центральном (зеленая кривая), северном (красная кривая) участках.

На первый взгляд создается впечатление, что период 2012 – 2014 гг. характеризовался повышенной динамикой береговой линии. Однако этот факт проще объяснить бóльшим количеством снимков, полученных за это время. Вместе с тем, достаточно очевиден факт, что в этот период, на фоне значительных колебаний береговой линии, в южной части происходило накопление материала и выдвигание береговой линии. Этот же вывод подтверждается статистическими расчетами *DSAS*, представленными графически на рис.4. Так, максимальный разброс между положением линий берега оценивается в 23 м (рис.4, *а*) и приходится на центральный и крайний южный участки, минимальный – на область начала клифа (отмечено красной линией на рис.4, *а, справа вверху*). Средний разброс положения береговой линии составляет около 13 м. Максимальный разброс положения береговой линии между крайними датами отражает направленность процесса за рассматриваемый период (рис.4, *б*).

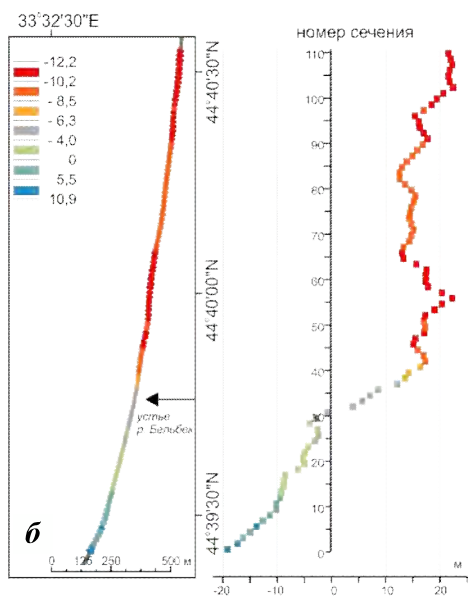
Рис.4, *а*, в отличие от рис.4, *б*, характеризует максимальный разброс положений береговой линии вне зависимости от дат и поэтому представлен лишь положительными значениями. На нем также выделяются указанные выше зоны, при этом минимальные смещения, обозначенные синим цветом, наблюдались по обе стороны от устья р.Бельбек, а также в зоне начала клифа. В целом наибольшие по амплитуде значения смещений приходятся на центральный и южный участки, при этом центральный участок размывается, в то время как на южном хорошо выражена аккумуляция.

Проведенные расчеты также позволяют наглядно представить процесс изменения ширины пляжа во времени (рис.5). Для построения рис.5 на каждом из отрезков из последующей ширины пляжа вычиталось предыдущее по времени значение. Таким образом, была создана матрица (двумерный массив), где по оси абсцисс отложено время, по оси ординат – номера отрезков по всей длине пляжа. Цифры внутри матрицы представляют собой изменения за интервал времени ширины пляжа для каждого отрезка. Из рис.5 видно, что в период 2009 – 2012 гг. по всей длине пляжа отмечалось его умеренное уменьшение со средней величиной до 5 м, более выраженное в северной половине, которое сменилось тенденцией к колебательному процессу в период 2012 – 2013 гг. В этот период в северной половине наблюдалось попеременное выдвигание/отступление пляжа с размахом до 5 м, причем выдвигание, в первом приближении, отмечалось в холодный период, отступление – в теплый. Напротив, в южной части наблюдалась устойчивая тенденция к нарастанию пляжа, которая практически не изменилась и в период зимы 2013 – 2014 гг., когда в северной части было зафиксировано скачкообразное отступление береговой линии на величины до 30 м.

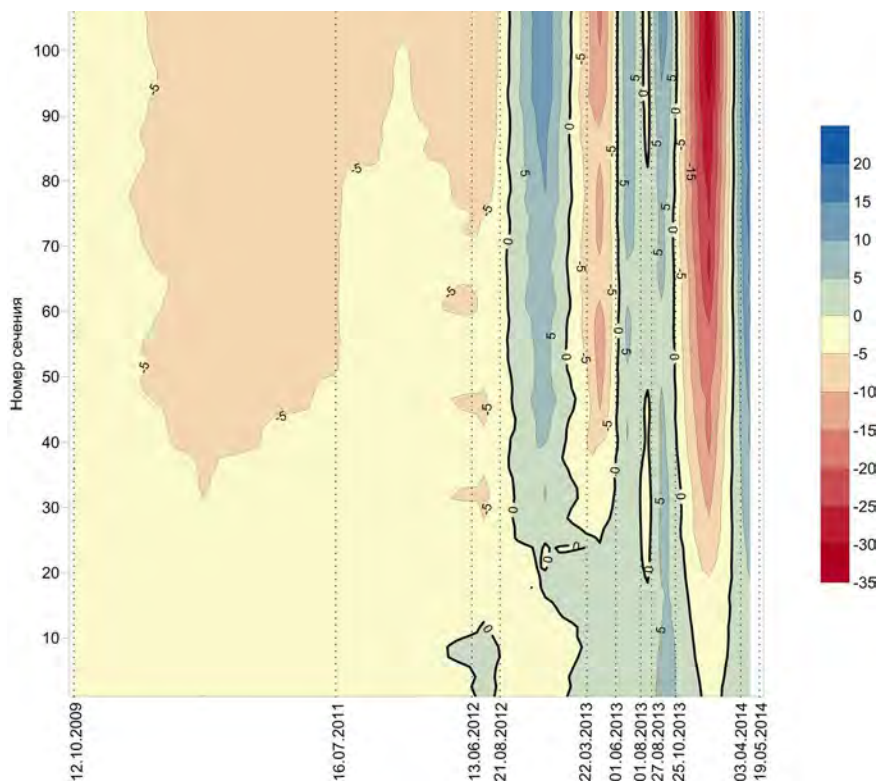
Выводы. 1. Подтверждено ранее сделанное предположение, что пляж пос. Любимовка с точки зрения его динамики можно рассматривать как три отдельных участка. Вместе с тем, они не примыкают друг к другу, как считалось ранее, а напротив, разделены достаточно протяженными переходными зонами с минимальной изменчивостью береговой линии.

2. В период 2009 – 2014 гг. пляж пос.Любимовка в целом испытывал отступление со средней скоростью 1,4 м/год. При этом в южной части наблюдалась аккумуляция, в результате чего пляж выдвинулся в среднем на 10 м;

a



Р и с . 4 . Величины пространственного смещения линии уреза воды пляжа: максимальные смещения между крайними линиями (а); за максимальный интервал времени (б); справа – те же графики относительно последней линии берега.



Р и с . 5 . Смещение береговой линии в период 2009 – 2014 гг. на всем протяжении пляжа пос.Любимовка по отрезкам (м).

в центральной и северной частях пляж испытывал размыв с отступанием в среднем на 15 м.

3. Береговая линия в период 2009 – 2014 гг. испытывала значительные межгодовые и сезонные колебания своего положения. Типичные значения колебаний составляли около 12 м, минимальные – 5 м, максимальные – до 30 м. Наибольшим изменениям были подвержены центральный участок, крайние районы южного и северного участков.

4. Используемый для расчетов модуль *DSAS* показал значительные преимущества перед традиционными способами, главные из которых малая трудоемкость в подготовке и анализе данных и надежность получаемых результатов.

По мере накопления исходной информации необходимость использования такого и ему подобных модулей будет только возрастать. В настоящей работе использовались лишь самые необходимые аналитические инструменты модуля *DSAS*, в то время как его возможности в плане оценки качества данных и их корректировки значительно выше.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2014-0010 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем Черного и Азовского морей на основе современных методов контроля состояния морской среды и гридтехнологий»

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Горячкин Ю.Н., Харитонов Л.В.* Изменения береговой линии Крыма по спутниковым данным // Причерноморский экологический бюллетень.– 2010.– вып.1 (35), «Стан та проблеми берегової зони морів України».– С.122-129.
2. *Горячкин Ю.Н., Долотов В.В.* Опыт использования космических снимков сверхвысокого разрешения открытого доступа для мониторинга динамики берегов Крыма // Девятая открытая Всероссийская конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 14-18.11 2011 г.– М.: ИКИ РАН, 2011.– С.221-222.
3. *Иванов В.А., Миньковская Р.Я.* Морские устья рек Украины и устьевые процессы. Часть 1.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008.– 448 с.
4. *Удовик В.Ф., Долотов В.В.* Современные тенденции динамики береговой зоны в районе пляжа пос.Любимовка // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– 2009.– вып.20. – С.92-99.
5. *Игнатов Е.И., Лукьянова С.А., Соловьева Г.Д.* Типизация берегов Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря.– 2015.– вып.1.– С.20-28.
6. *Современное состояние береговой зоны Крыма / Под ред. Ю.Н. Горячкина.*– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2015.– 252 с.
7. *Долотов В.В., Попова А.В.* Долгопериодная динамика пляжа пос.Любимовка // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– 2014.– вып.28.– С.31-41.
8. *Долотов В.В.* Некоторые результаты изучения динамики морфологического состояния пляжа пос.Любимовка // Всеукр. научно-практич. конф. «Экология городов и рекреационных зон». Одесса, 4-5.06 2009 г.– С.51-54.

9. *DSAS 4.0. Инструкции по установке и руководство пользователя по отношению к версии 4.3 (совместимой с ArcGIS 10). U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey. <http://www.innovateteam.com>*

Материал поступил в редакцию 26.01.2017 г.

V.V.Dolotov, Y.N.Goryachkin, A.V.Dolotov

STATISTICAL ANALYSIS OF VILLAGE LUBIMOVKA BEACH COASTLINE VARIABILITY

The statistical analysis of Lyubimovka village beach coastline displacements, based on satellite images of the Crimean coast during 2009 – 2014 was performed with using DSAS analysis module within the ESRI ArcGIS Desktop application. As a result, it is shown that during this period the coastline has receding in general with an average speed of 1,4 m/year. At the same time in the southern beach part an accumulation was observed, in the central and northern parts an erosion was detected. During 2009 – 2014 coastline position had the considerable interannual and seasonal variations. It is important to note that DSAS unit provides the significant advantages in the data preparation and analysis over the traditional ways.

KEYWORDS: coastline, variability, statistical analysis, Lyubimovka village, Crimea