ОЦЕНКА ДИНАМИКИ УРЕЗА АККУМУЛЯТИВНОГО БЕРЕГА ПРИ ПОМОЩИ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ

В.В. Крыленко, М.В. Крыленко
Южное отделение Института океанологии РАН
г. Геленджик, Россия, krylenko@mail.ru

AN ESTIMATE OF WATER EDGE DYNAMICS AT AN ACCUMULATIVE SHORE BASED ON SATELLITE IMAGES

V.V. Krylenko, M.V. Krylenko
Southern Branch of the Shirshov Institute of Oceanology RAS
Russia, Gelendzhik, krylenko@mail.ru

Abstract. We present the methods and results of investigation of the Anapa bay-bar shoreline dynamics, obtained from the analysis of historical and recent data of satellite imaging and aerial survey for 70 years. It is shown that that in the analysis of the long-term variations in the water edge one has to take into account the following configuration of the shoreline at the moment of each survey and own regime of the short-term water edge dynamics of individual parts. These data clarified the dynamics of the Anapa bay-bar shoreline, which is important for the understanding of lithodynamic processes in the coastal zone and developing the forecast of the further evolution of the bay-bar geosystem.

Keywords: Coastal zone, bay-bar, remote methods, water edge, Black Sea.

Анапская пересыпь – это аккумулятивное песчаное тело, протяженностью около 47 км, расположенное в северо-западной части российского побережья Черного моря. Ширина пересыпи от 80 м в северной части до 1,5 км в южной, она отделяет от Черного моря систему лиманов (рис. 1). Вся пересыпь с песчаными пляжами шириной 50–200 м, особенно её южная часть, активно используется в рекреационных целях.

Анапская пересыпь имеет вид вогнутой дуги (рис. 1) и является полигенетической аккумулятивной береговой формой (сочетающей в своем развитии черты аккумулятивного тела барьерного типа с поперечным движением наносов, и продольного типа – с вдольбереговым движением). Конфигурация берега и рельеф шельфа создали фактически замкнутую литодинамическую систему [4, 5].

Рис. 1. Схема Анапской пересыпи

Первые научные сведения о геолого-геоморфологическом строении пересыпи появились еще в XIX в. В 1838–1865 гг. исследователи Е. Вернейль, И. Гюо и др. рассматривали вопросы геологического строения и строения рельефа Анапского региона [2]. Начиная с 1948 г. в районе Анапской пересыпи работали В.В. Лонгинов, А.А. Попов, Е.Н. Невесский. Одним из наиболее полных морфологических описаний

Анапской пересыпи является работа В.П. Зенковича [1]. Неоднократно к теме изучения Анапской пересыпи обращался Н.А. Айбулатов. В 2005 г. в монографии Я.А. Измайлова [2] на основе анализа геолого-геоморфологических данных произведена палеогеографическая реконструкция истории формирования Анапской пересыпи. В работе [2] приведены результаты определения долговременных изменений береговой линии с использованием материалов аэрофотосъемки 1948, 1972, 1992 и 2000 гг. Во всех исследовательских работах отмечено отступление береговой линии Анапской пересыпи. Однако, не было точных данных по величинам размыва берега и его скорости. Основными недостатками предшествующих исследований динамики береговой линии были большие перерывы между съемками, и малое количество промерных створов. Кроме того, существовавшие ранее методики взаимной «привязки» аэрофотоснимков не позволяли точно сопоставлять линии уреза разных съемок по всей протяженности пересыпи. Изучению динамики уреза и тенденций её изменения с помощью современных методов исследования посвящена настоящая статья.

С 2010 г. сотрудниками Южного отделения Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН проводятся ежегодные комплексные исследования Анапской пересыпи [4, 5]. Целью работ является изучение динамики рельефа пересыпи, оценка его устойчивости к изменениям внешних условий. Поскольку изучаемый участок берега не имеет выраженных ориентиров, были выбраны «виртуальные» точки, расположенные через 1 км друг от друга (рис. 1). Через эти точки проходят поперечные профили, по которым проводятся исследования. Наряду с натурными исследованиями, проводится анализ литературных, архивных, картографических источников. Важная роль отводится анализу фотографических материалов – космических снимков, аэрофотосъемки, любительских фотографий [6]. Именно этот материал, позволяющий выявить динамику береговой линии Анапской пересыпи, стал основой настоящей статьи.

Как уже отмечалось выше, берег пересыпи чрезвычайно динамичен, и для определения долговременных тенденций его развития нужно анализировать данные за максимально возможный срок. Для определения величин многолетней динамики берега Анапской пересыпи, нами был проведен анализ архивных аэрофото- и космоснимков. Были использованы материалы аэрофотосъемки 1941 г. (выполненной германскими ВВС в период Великой Отечественной войны) (табл. 1), и космические снимки 1960-х гг. (выполненные Геологической службой США по программе CORONA) (табл. 2).

Таблица 1

Данные по использованным аэрофотоснимкам Люфтваффе [10]

Код снимка	Дата съемки	Приблизительный масштаб
DT/TM5 - Nr. 185	24.10.1941.	1:43 000
DT/TM5 - Nr. 199	17.11.1941.	1:25 000
DT/TM5 - Nr. 203	09.01.1944	1:9 700

Таблица 2

Данные по использованным космическим снимкам CORONA [9]

DS1009-2056DF113	DS1022-1056DA137	DS1036-2187DA112
Coordinates: 45.09, 38.147 Camera Resolution: Stereo Medium Acquisition Date: 09-SEP-64 Product Description: High Resolution Scanned 70MM X 29.8 in.	Coordinates: 45.09, 38.27 Camera Resolution: Stereo Medium Acquisition Date: 23-JUL-65 Product Description: High Resolution Scanned 70MM X 29.8 in.	Coordinates: 45.03, 37.027 Camera Resolution: Stereo Medium Acquisition Date: 21-AUG-66 Product Description: High Resolution Scanned 70MM X 29.8 in.

Развитие в последнее десятилетие большого количества общедоступных картографических сервисов (Google Earth, Yandex Maps, Nokia, Bing Maps, maps.Kosmosnimki.ru и др.) позволило использовать в научных исследованиях огромный массив космических снимков. Особенно удобен в этом отношении сервис Google Earth, позволяющий работать с разновременными космическими снимками. Всего на разные участки Анапской пересыпи найдено около 40 космических снимков на период с 2003 г. по настоящее время. Наличие серий снимков с разницей между съемками от нескольких недель до нескольких месяцев позволило существенно изменить представления о скоростях и направлении изменения положения уреза.

На перечисленных общедоступных картографических сервисах представлены космические снимки, методика и качество плановой «привязки» которых нам неизвестны. Геометрическая модель сенсора и результаты его калибровки были недоступны. Также отсутствовали RPC (Rational Polynomial Coefficients), представляющие собой коэффициенты полиномов рациональных функций, связывающие координаты точек местности с координатами их изображений на конкретном снимке. Для устранения возможных погрешно-

стей была проведена дополнительная геометрическая коррекция снимков или получаемых с них векторных данных с использованием набора контрольных точек (GCP – Ground Control Points). С использованием инструментов, предоставляемых картографическими сервисами, проводилась оцифровка линии уреза. Одновременно оцифровывался набор контрольных точек или полилиний, используемых в дальнейшем для уточнения «привязки» полученного уреза.

Для космических снимков Согопа 1964–1966 г. и военных аэрофотоснимков 1941 г. отсутствовали параметры строгой модели съёмочных камер. Первичная привязка аэрофотоснимков была произведена с помощью программы OziExplorer. Основной сложностью привязки было малое количество визуально определяемых контрольных точек. Были использованы сохранившиеся до настоящего времени здания, линейные объекты (автодороги), формы рельефа (рис. 2, 3). Определённую сложность также представляла конфигурация пересыпи, не позволявшая равномерно располагать контрольные точки в пределах снимка (обширные акватории моря и лиманов полностью покрывают противоположные диагональные углы снимка). Тем не менее, удалось до минимума свести плановые искажения используемых снимков для всей прибрежной полосы пересыпи. Оцениваемая точность плановой привязки в пределах 5 м.

Рис. 2. Использование в качестве контрольных точек: сверху – элементов старинных фортификационных сооружений (А – снимок 1965 г., Б – 2013 г.); внизу – элементов застройки (В – снимок 1941 г., Г – 1965 г., Д – 2013 г.)

Дальнейшая обработка растров и полученных с космических снимков векторных данных производилась нами с использованием пакета Scanex Image Processor. В зависимости от количества контрольных точек трансформация растра или вектора проводилась по полиномиальной модели второй или третьей степени. В качестве базового снимка, к которому производилась привязка, была взята мозаика аэрофотопланов от 21.11.2013 г. с пространственным разрешением 10 см, положенных на высокоточную цифровую модель рельефа (ЦМР), выполненную по данным воздушного лазерного сканирования (ВЛС).

После окончательной привязки снимков и векторных данных, было произведено снятие количественной информации по динамике уреза. Поскольку, как уже было сказано, отсутствуют жестко закрепленные на местности ориентиры, необходимо было создать базис, относительно которого можно будет измерять расстояние до уреза. В качестве базиса была использована виртуальная базовая полилиния, в плане повторяющая очертания пересыпи. Измерение расстояния от базовой линии до уреза производилось по нормали, проводимой через стандартную опорную точку (через 1 км) и дополнительные, установленные с шагом

0,25 км. Дальнейшая обработка и визуализация данных производилась в программных пакетах Microsoft Excel 2007; Golden Software (Grapher и Surfer).

Рис. 3. Использование в качестве опорных точек элементов рельефа (заметных на цифровой модели рельефа, но плохо читаемых в видимом диапазоне): слева снимок 1966 г., в центре – ЦМР, справа – ортофотоплан 2013 г.

Анализ данных дистанционного зондирования и натурные наблюдения показали, что, в зависимости от текущей и предшествовавшей гидро-литодинамической ситуации, конфигурация береговой линии может изменяться от практически прямолинейной до синусоидальной (рис. 4, 5). Разовые измерения на определенных профилях могут давать весьма значительные отклонения от среднего положения. Поэтому, прежде чем анализировать новые данные по многолетней динамике берега, необходимо было оценить имеющуюся информацию по короткопериодной динамике уреза. Для этого были использованы снимки, временной промежуток между которыми составлял от месяца до года.

Рис. 4. Изменения конфигурации береговой линии пересыпи в районе профилей 07-08: сверху – снимок 13.09.2011 г., внизу – 05.01.2013 г. Штриховая линия нанесена для удобства восприятия

На многих снимках отмечается чередование участков локального размыва или аккумуляции, формирование которых связано с вдольбереговым движением наносов и динамикой подводных валов. Наиболее часто подобная конфигурация наблюдается в центральной части пересыпи. На смежных участках размыва-

аккумуляции амплитуда изменения положения линии уреза достигает 20–30 м, а длина «волны» составляет 350–500 м. Образовавшиеся выступы, как правило, в плане имеют несимметричную (каплевидную) форму, с более крутым изгибом берега в подветренной стороне (рис. 5). Выступы постепенно сглаживаются, происходит выравнивание береговой линии. При наблюдении процесса выравнивания, может сложиться впечатление «продвижения» выступов берега в направлении преобладающего потока наносов. Тем не менее, на рисунке 5 видно, что «наветренный» край выступа практически не изменяет своего положения, при этом «подветренный» край продвигается вдоль берега на десятки метров. Общая скорость выравнивания береговой линии существенно зависит от текущей гидrolитодинамической ситуации, весь процесс занимает период от нескольких месяцев до года. В таблице 3 приведено расстояние от уреза до базовой линии, осредненное по тестовым участкам. Видно, что по мере выравнивания линии уреза берег постепенно выдвигается в сторону моря.

Таблица 3

Среднее расстояние от уреза до базовой линии (м)

Шаг осреднения (м)	Участок осреднения (профили = км)	12.08.2011	13.09.2011	17.12.2012
250	22.0–	192,3	194,2	196,9
100	22.0–	196,0	196,6	197,4
250	20.25–	162,3	163,1	166,3

Рис. 5. Изменения конфигурации береговой линии пересыпи в районе профилей 22–23: сверху – снимок 13.09.2011 г., внизу – 05.01.2013 г. Линиями обозначены положения уреза: черная линия – 12.08.2011 г., белая линия – 13.09.2011 г., пунктирная линия – 05.01.2013 г.

Исследование многолетней динамики береговой линии Анапской пересыпи базировалось на сопоставлении аэрофотоснимка 1941 г. (на 6 км южного края пересыпи), серии космических снимков 1964–1966 гг. (1964 – центральная часть пересыпи, 1965 – южная часть пересыпи, 1966 – вся пересыпь), аэрофотоплана 2013 г., и серии космических снимков периода 2011–2014 гг. Как видно из приведенных выше данных, для анализа долгопериодных изменений положения уреза необходимо учитывать:

1. Конфигурацию береговой линии в момент каждой из съемок. Для оценки возможной погрешности вычислений, связанных с выявленными линейными характеристиками вдольбереговой «волны» размыва-намыва, для тестового участка замер расстояний до базовой линии был произведен с шагом 100 м и 250 м. Сравнение полученных данных замеров (табл. 3) показало, что осреднение, проведенное с разным шагом, дает разницу 0,5–3,7 м, эта разница минимальна для наиболее выровненной береговой линии. Таким образом, погрешность, связанная с изменчивостью конфигурации уреза, достигает несколько м, но может быть снижена увеличением частоты промерных профилей.

2. Оцениваемая точность плановой привязки находится в пределах 5 м для современных снимков (позднее 2003 г.), и в пределах 10 м для снимков 1941 г. и 1964–66 гг. Как правило, это искажение носит линейный характер, поэтому, по-разному сказывается при снятии данных на различно ориентированных относительно направления максимального искажения участках пересыпи. При наихудшем варианте, на от-

дельных участках пересыпи возможно «системное» плановое смещение среднего положения уреза на величину до 10 м. Поэтому, для максимального уточнения результатов желательно отдельно проводить привязку для небольших фрагментов снимков.

3. Как уже было показано выше, каждому конкретному участку пересыпи свойственен свой режим короткопериодной динамики уреза. На рисунке 6 показано, насколько велика отмеченная изменчивость конфигурации уреза по данным съемок, выполненных за сравнительно небольшой период времени (5–10 лет). Реальная изменчивость может быть еще больше. В связи с этим, сравнение двух разовых съемок может давать значительные искажения реальной динамики (при пересечении или наложении участков кратковременного размыва-намыва). В идеальном случае, когда береговая линия выровнена на всем протяжении пересыпи, можно использовать единичный снимок. Как уже было показано, этому состоянию соответствует максимально выдвинутое в море положение береговой линии. В остальных случаях, при наличии более или менее выраженных «волн» размыва-намыва для некоторой компенсации этого искажения необходимо осреднение данных по положению уреза за некоторый период или для определенного участка пересыпи.

*Рис. 6. Изменчивость положения линии уреза в районе профиля 27
(по данным съемок периода 2007–2014 гг.)*

Небольшой участок пересыпи, покрытый съемкой 1941 г., не позволяет оценить динамику берега всей Анапской пересыпи с того времени. Тем не менее, использование этого снимка дает важную информацию о возможном изменении темпов динамики берега после 1966 г. На рисунке 7 видно, что в период 1941–1966 гг. размыв отмечался не по всему участку, и в среднем не превышал 15 м, а в период 1941–2013 гг. захватил почти всю протяженность участка, а средняя величина размыва превысила 37 м. Высокие значения аккумуляции к югу от современного устья р. Анапка, вероятно, объясняются техногенным переносом устья к северу в начале 1960-х гг. В период 1966–2013 гг. на этом участке наблюдался небольшой размыв, несмотря на искусственные отсыпки песка.

Аналогичное сопоставление данных по 21.08.1966 г. и 21.11.2013 г. (рис. 8) показало, что преобладал размыв (на отдельных участках более 70 м), но отмечалась и аккумуляция (более 20 м). Среднее по всему участку смещение линии уреза за 47 лет и 3 месяца составило 23.3 м (в сторону берега).

Для уточнения результатов было проведено осреднение данных по положению уреза в 1964–1966 гг. (3 съемки) и 2011–2013 гг. (6 съемок). Хорошо видно (рис. 8), что общее распределение участков размыва - аккумуляции схоже с сопоставлением разовых съемок 21.08.1966 г. и 21.11.2013 г. Можно отметить некоторое увеличение величин размыва на южном краю Витязевской пересыпи. Среднее по всему участку смещение линии уреза за 47 лет составило 23.0 м (в сторону берега). Эта величина явно выходит за пределы возможных погрешностей, поэтому можно говорить о реальном наличии в пределах всей Анапской пересыпи участков, значительно различающихся литодинамическими условиями. На рисунке 8 видно выделить участки сильного размыва. Центральная часть Анапской пересыпи можно назвать относительно стабильной. Тут перемежаются участки сопоставимого по величине размыва и аккумуляции. Среднее смещение уреза на всем участке 2,1 м (в сторону берега), что находится в пределах погрешности измерений. Отдельно следует указать участок к югу от устья р. Анапка (размыв 6,0 м), где во время штормов наблюдалось отступление берега и неоднократно проводились искусственные отсыпки песка.

Рис. 7. Динамика берега за период 1941_1964-66 (вверху) и 1941_2011-13 (внизу)

Рис. 8. Динамика берега по данным съемок 1966 и 2013 гг. (вверху), по осредненным данным съемок 1964-66, 2011-13 гг. (внизу)

Сопоставление снимков 23.07.1965 г. и 21.08.1966 г. показало, что на отдельных профилях изменение положения уреза превышало 20 м в ту или иную сторону. Такие изменения характерны для межштормовой динамики уреза, и не указывают на размыв или намыв берега. При этом среднее по всему участку смещение линии уреза за 13 месяцев составило всего 0.8 м (в сторону размыва), то есть находится в пределах погрешности измерений.

Таким образом, сравнение наших данных и материалов предшествующих исследований показало, что действительно, на большей части пересыпи наблюдается отступление береговой линии. Показано, что для ана-

лиза долгопериодных изменений положения уреза необходимо учитывать конфигурацию береговой линии в момент каждой из съемок и локальную короткопериодную динамику. По нашим данным, максимальная средняя скорость размыва не превышает 1.6 м в год, что ниже ранее полученных значений [2]. Полученные данные уточнили и детализировали ход динамики береговой линии Анапской пересыпи. Использование современных и архивных материалов спутниковых съемок открывает новые возможности для изучения литодинамических процессов береговой зоны, и для разработки прогноза дальнейшего развития геосистемы пересыпи.

Данная работа была бы невозможна без получения материалов дистанционного зондирования, имеющихся в распоряжении различных государственных и частных организаций многих стран и свободно предоставляемых для научных исследований.

Экспедиционные натурные исследования 2014 г. проведены благодаря финансовой поддержке РФФ, грант №14-50-00095. Камеральная обработка материалов, сбор и анализ литературных и архивных данных проведены благодаря финансовой поддержке РФФ, грант №14-17-00547. Обработка данных и их геодезическая привязка выполнено благодаря финансовой поддержке РФФИ, гранты № 15-05-02654, № 13-05-96510, 13-05-96506.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК REFERENCES

1. Зенкович В.П. Берега Черного и Азовского морей. Москва: Гос. изд. геогр. лит., 1958. 374 с.
Zenkovich V.P. Berega Chernogo i Azovskogo morey [Coasts of the Black Sea and Sea of Azov]. Moscow: Gos. izd. geogr. lit., 1958. 374 p. (in Russian).
2. Измайлов Я.А., Измайлов М.Я., Сидоренко Л.А. О результатах работ по изучению динамики песчаного тела Анапского пляжа. Лазаревское: ГУП «Кубаньгеология», 2005. 205 с.
Izmaylov Ya.A., Izmaylov M.Ya., Sidorenko L.A. O rezultatah rabot po izucheniyu dinamiki peschanogo tela Anapskogo plyazha [About results of works on studying of dynamics of a sand body of the Anapa beach]. Lazarevskoe: GUP "Kubangeologiya", 2005. 205 p. (in Russian).
3. Измайлов Я.А. Эволюционная география побережий Азовского и Черного морей. Сочи: Лазаревская полиграфия, 2005. 174 с.
Izmaylov Ya.A. Evolyutsionnaya geografiya poberezhnykh Azovskogo i Chernogo morey [Evolutionary geography of the Sea of Azov and Black sea coasts]. Sochi: Lazarevskaya poligrafiya, 2005. 174 p. (in Russian).
4. Косьян Р.Д., Куклев С.Б., Крыленко В.В. Хрупкое равновесие Анапской пересыпи // Природа. 2012. № 2. С. 19–28.
Kosyan R.D., Kuklev S.B., Krylenko V.V. Hrupkoe ravnovesie Anapskoy peresyipi [Fragile balance of the Anapa bay-bar], Priroda. 2012. № 2. P. 19–28 (in Russian).
5. Крыленко В.В., Косьян Р.Д., Крыленко М.В., Горячкин Ю.Н., Нгуен М.Х. Комплексные исследования геосистем морских береговых аккумулятивных форм (на примере Анапской пересыпи). Материалы международного семинара «Экология прибрежной зоны внутренних морей». 30 июня–4 июля Геленджик: ООО «Интертехнологии», 2014. С.32-38.
Krylenko V.V., Kosyan R.D., Krylenko M.V., Goryachkin Yu.N., Nguen M.H. Kompleksnyye issledovaniya geosistem morskikh beregovykh akkumulyativnykh form (na primere Anapskoy peresyipi) [Complex researches of geosystems of the coastal accumulative forms (on the example of Anapa bay-bar)]. Materialy mezhdunarodnogo seminar «Ekologiya pribrezhnoy zonyi vnutrennih morey». 30.06–4.07, Gelendzhik: ООО «Intertehnologii», 2014. P. 32–38. (in Russian).
6. Крыленко В.В., Крыленко М.В. Ретроспективный анализ картографического и иллюстративного материала как средство оценки состояния природных объектов. Труды Международной научно-практической конференции «Геосистемы: факторы развития, рациональное природопользование, методы управления». 4–8 октября, г. Туапсе. Издательство «Юг», 2011. С. 294–296.
Krylenko V.V., Krylenko M.V. Retrospektivnyy analiz kartograficheskogo i illyustrativnogo materiala kak sredstvo otsenki sostoyaniya prirodnih ob'ektov [Retrospective analysis of cartographic and illustrative materials as means of an assessment of a condition of natural objects]. Trudy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Geosistemy: faktoryi razvitiya, ratsionalnoe prirodopolzovanie, metody upravleniya». 4–8.10, Tuapse. Izdatelstvo «Yug», 2011. Pp. 294–296. (in Russian).
7. Kosyan R.D., Yu.N. Goryachkin, V.V. Krylenko, V.V. Dolotov, M.V. Krylenko, E.A. Godin Crimea and Caucasus Accumulative Coasts Dynamics Estimation using Satellite Pictures // Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. V. 12. 2012. P. 385–390.
8. Krylenko V.V., Kosyan R.D., Kochergin A.D. Regularities of the Formation of the Granulometric Composition of the Bottom and Beach Deposits of the Anapa Bay Bar // Oceanology, 2011. Vol. 51. №. 6. Pp. 1061–1071.
9. Project CORONA. url:<http://edcsns17.cr.usgs.gov/NewEarthExplorer> (дата посещения 13/03/2014).
10. WWII Aerial Photos and Maps (Series: Captured War Documents). url: <http://www.wwii-photos-maps.com> (дата посещения 10/06/2014).