

Научная статья
УДК 551.435.32 (265)
EDN SAIMZC

Динамика аккумулятивных берегов Юго-Западного Крыма

Ю. Н. Горячкин *, В. В. Долотов

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

* e-mail: yngor@mhi-ras.ru

Аннотация

В связи с проблемой развития рекреационной инфраструктуры города федерального значения Севастополя рассмотрена динамика аккумулятивных берегов вблизи устьев рек Качи и Бельбека. Цель статьи – определить количественные характеристики изменчивости береговой линии. В анализ был включен также пляж микрорайона Учкучевка, имеющий большое рекреационное значение. Использовались данные оцифровки береговых линий из космических снимков сервиса *Google Earth* для периода 2011–2021 гг. и материалы полевых наблюдений Морского гидрофизического института РАН. Установлено, что рассмотренные берега в последнее десятилетие находятся в динамическом равновесии. Значимых трендов изменений среднего положения береговой линии не обнаружено. Отмечено, что ранее береговая линия пляжей претерпела значительные изменения, связанные с антропогенной деятельностью (сокращение твердого стока, добыча песка, строительство берегозащитных сооружений). В каждом из рассмотренных пляжей выделены районы с максимальными и минимальными изменениями береговой линии за последнее десятилетие, приводятся количественные характеристики. Рассмотрена межгодовая изменчивость среднего по длине пляжей положения береговой линии. Показано, что внутригодовые изменения положения береговой линии могут превышать межгодовые. Во избежание ложных выводов рекомендуется при анализе спутниковых данных использовать не только снимки, полученные в крайние даты, а всю совокупность имеющихся изображений. Приводятся данные о динамике аккумулятивных берегов других причерноморских стран в сходных природных условиях.

Ключевые слова: береговая линия, космические снимки, устья рек, пляж, антропогенное воздействие, Черное море

Благодарности: работа выполнена в рамках темы государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ FNNN-2021-0005.

Для цитирования: Горячкин Ю. Н., Долотов В. В. Динамика аккумулятивных берегов Юго-Западного Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 3. С. 55–70. EDN SAIMZC.

© Горячкин Ю. Н., Долотов В. В., 2023



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Dynamics of Accumulative Shores of South-Western Crimea

Yu. N. Goryachkin *, V. V. Dolotov

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

* e-mail: yngor@mhi-ras.ru

Abstract

In connection with the problem of developing the recreational infrastructure of the federal city of Sevastopol, the paper considers the dynamics of accumulative banks near the mouths of the Kacha and Belbek Rivers. The purpose of the article is to determine the quantitative characteristics of the coastline variability. The analysis also included the beach of the Uchkuevka microdistrict, which is of great recreational importance. We used data from the digitization of coastlines of space images from the Google Earth service for 2011–2021 and materials of field observations of Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences. It is established that the considered coasts have been in a dynamic equilibrium in the last decade. Significant trends in changes in the average position of the coastline were not found. It is noted that earlier the coastline of the beaches underwent significant changes associated with anthropogenic activities (reduction of solid runoff, sand mining, construction of coastal protection structures). In each of the considered beaches, areas are identified with the maximum and minimum range of changes in the coastline over the past decade, and quantitative characteristics are given. The interannual variability of the coastline position averaged over beach length is considered. It is shown that intra-annual changes in the coastline position can exceed interannual ones in magnitude. To avoid false conclusions, when analyzing satellite data it is recommended not to use the images obtained on the first and last dates of observations, but the entire set of available images. The paper provides data on the dynamics of accumulative shores in other Black Sea countries in similar natural conditions.

Keywords: coastline, space images, river mouths, beaches, anthropogenic impact

Acknowledgments: The work was carried out under state assignment no. FNNN-2021-0005.

For citation: Goryachkin, Yu.N. and Dolotov, V.V., 2023. Dynamics of Accumulative Shores of South-Western Crimea. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 55–70.

Введение

В настоящее время на различных административных уровнях рассматриваются проекты развития рекреационной инфраструктуры города федерального значения Севастополя. Протяженность его береговой линии составляет около 170 км (для сравнения: береговая линия Румынии – 225 км, Болгарии – 300 км). Наиболее населенный и протяженный участок региона (около 73 км) – собственно севастопольские бухты с немногочисленными пляжами – мало пригоден для развития рекреации, поскольку плотно застроен и увеличение пляжной территории здесь практически невозможно. При этом к настоящему времени вследствие антропогенной деятельности здесь сохранилось только 0.3 погонных км или 10 % от ранее существовавших наиболее ценных песчаных пляжей [1].

Южное побережье от м. Херсонес до м. Святого Николая (около 72 км) представляет собой гористую местность с немногочисленными прислоненными валунно-галечными пляжами, опасными из-за обвалов и оползней. Рекреационный потенциал находящейся на этом участке побережья бухты Ласпи почти исчерпан. Поэтому не удивительно, что внимание администрации и инвесторов обращено на северную часть региона – побережье от м. Тюбек до м. Коса Северная (около 26 км). Однако и здесь большая часть побережья, хотя и имеет относительно широкие пляжи, вместе с тем является обвало- и оползнеопасной, тут неоднократно фиксировались несчастные случаи. Тем существеннее значение, которое приобретают аккумулятивные пляжи полного профиля, расположенные в долинном понижении приустьевых участков рек Качи и Бельбека. Еще один пляж неполного профиля расположен у микрорайона Учкучевка. Все три пляжа занимают 20 % побережья и имеют большое рекреационное значение ввиду хорошей транспортной доступности (рис. 1).

Антропогенное воздействие на береговую зону Крыма и Севастополя в последнее время возрастает. Освоение берегов, к сожалению, зачастую сопровождается негативными последствиями (вплоть до утраты пляжей). Как



Рис. 1. Пляжи северной части Севастопольского региона: 1 – близ с. Орловка; 2 – в микрорайоне Любимовка; 3 – в микрорайоне Учкучевка

Fig. 1. Beaches in the northern Sevastopol area: 1 – near the village of Orlovka; 2 – in the microdistrict of Lyubimovka; 3 – in the microdistrict of Uchkuevka

правило, они возникают вследствие недостатка знаний о динамике береговой зоны, которые необходимы при определении влияния реализации различных хозяйственных проектов на изменение состояния берегов, обосновании схем берегозащиты и при решении ряда других задач. Это особенно актуально, поскольку администрацией Севастополя подписано соглашение о строительстве крупного рекреационного кластера стоимостью 15 млрд. рублей в районе пляжа вблизи устья р. Бельбек.

Ранее в литературе в основном рассматривалась динамика песчаного пляжа в устье р. Бельбек [2–4]. Так, в работе [2] на основании анализа натуральных наблюдений в 2007 и 2009 гг. было показано, что наиболее значительная межгодовая изменчивость положения береговой линии характерна для северного и центрального участков, где размах смещения достигал 20 м. На южном участке было отмечено некоторое выдвигание линии уреза воды в сторону моря. В [3] сравнивались космические

снимки 1966 г. и первого десятилетия XXI в. Отмечено, что за этот период береговая линия на южном участке выдвинулась в сторону моря приблизительно на 20–40 м. В [4] на основе анализа космических снимков за 2009–2014 гг. отмечалось, что пляж в районе устья р. Бельбек в целом отступал со средней скоростью 1.4 м/год. В южной части наблюдалась аккумуляция, при этом пляж выдвинулся в среднем на 10 м. В центральной и северной частях пляж отступил в среднем на 15 м. Там же отмечено, что типичные значения межгодовых колебаний составляли около 12 м, минимальные – 5 м, максимальные – до 30 м, наибольшим изменениям был подвержен центральный участок. В работе, посвященной состоянию морских берегов Севастополя на основе сопоставления топографической карты 1955 г. и космического снимка 2014 г., делается вывод, что «аккумулятивный берег в долине Качи отступает со скоростью до 5 м в год!» [5, с. 241].

К настоящему времени накоплен значительный массив космических снимков, позволяющий провести более обоснованный анализ изменений положения береговой линии во времени. Цель данной работы – определить на основе космических снимков количественные характеристики межгодовой изменчивости береговой линии аккумулятивных берегов, прилежащих к устьям рек Качи и Бельбека. Кроме этого, в анализ был включен пляж микрорайона Учкучевка, который находится в пределах абразионно-оползневого берега и имеет большое рекреационное значение.

Материалы и методы исследования

В работе использовались данные оцифровки береговых линий на космических снимках сервиса *Google Earth* для периода 2011–2021 гг. и спутниковый снимок США, сделанный в 1966 г. для *United States Geological Survey (USGS)*. При наличии нескольких снимков за год выбирался снимок с максимальной детализацией. Почти все снимки (9 из 11) относились к теплomu периоду года.

После создания соответствующих снимкам цифровых массивов и загрузки их в ГИС визуально отмечалось искажение линейных структур, обусловленное погрешностями, порожденными в процессе генерирования непрерывных снимков. Последние состоят из тайловых массивов различного разрешения, являющихся основой технологии создания картографических сервисов^{1), 2)} [6, 7]. Используемый в работе сервис *Google Maps* позволяет выполнять векторную прорисовку интересующих объектов с достаточно высокой точностью. Этому способствовали дополнительно еще два фактора: незначительная абсолютная высота большинства объектов в прибрежной зоне и расположение линий уреза воды в горизонтальной плоскости. Для дополнительной коррекции искажений выполнялась привязка оцифрованных линий к неподвижным объектам, в качестве которых чаще всего выбирались угловые точки бетонных бун.

¹⁾ Лабутина И. А., Балдина Е. А. Использование данных дистанционного зондирования для мониторинга экосистем ООПТ. Москва, 2011. 88 с.

²⁾ Малышева Н. В. Автоматизированное дешифрирование аэрокосмических изображений лесных насаждений. Москва : Изд-во Московского государственного университета леса, 2012. 151 с.

Для дальнейшего анализа использовались основные расчетные алгоритмы, описанные в модуле *DSAS*³⁾. Модуль выполняет построение серии линий поперечных сечений пляжа от условной линии, принятой за базовую через заданное расстояние. С учетом протяженности пляжей и желаемой детализации поперечные сечения для всех трех пляжей проводились через 20 м. В дальнейшем расстояния от базовой линии до линий уреза воды для каждого сечения сводились в электронную таблицу, средствами которой вычислялись максимальные отклонения (положительные значения размаха, независимые от даты) и расстояния между двумя линиями, соответствующими крайним датам (результатирующие смещения). Графики смещения береговой линии построены на двунаправленной оси абсцисс, при этом направление влево соответствует выдвиганию берега в сторону моря, т. е. в западном направлении. Кроме спутниковых данных, нами использовались материалы полевых наблюдений Морского гидрофизического института РАН.

Результаты и обсуждение

Аккумулятивный берег в районе устья р. Качи. Протяженность пляжа в этом районе около 1.4 км, с южной стороны имеются два участка с перпендикулярными берегу каменными набросками. С учетом этого для расчетов длина принималась равной 1.2 км.

Ширина пляжа, сложенного хорошо сортированным среднезернистым песком с мелкой галькой, в настоящее время составляет от 30 до 50 м. Тыловую границу пляжа на ряде участков выделить сложно, поскольку здесь расположены волноотбойная стенка (построена в 2009 г.), искусственный вал и некоторые другие объекты. Устьевая зона сформирована аллювием с преобладанием глин и песков. Геологическое строение свидетельствует о том, что на этом месте ранее располагался лиман, заполненный впоследствии аллювием⁴⁾.

Естественный гидрологический режим р. Качи сильно изменен. На реке сооружены два крупных водохранилища – Бахчисарайское (6.9 млн. м³, построено в 1934 г.) и Загорское (27.8 млн. м³, 1975 г.), что наряду с отбором воды на хозяйственные нужды привело к значительному сокращению твердого стока реки. В настоящее время сток реки даже в период интенсивных атмосферных осадков незначителен (рис. 2).

При заполнении прудов, расположенных в приустьевом участке, в отдельные периоды сток близок к нулю. Место впадения реки в море изменяется только в пределах полосы пляжа в обе стороны, в основном до 100 м, в более редких случаях – до 250 м от среднего положения. Иногда устье не соприкасается непосредственно с морем, а образует небольшую лагуну, параллельную береговой линии и отчлененную волноприбойным валом, через который вода фильтруется в море.

³⁾ URL: <https://www.usgs.gov/centers/whcmssc/science/digital-shoreline-analysis-system-dsas> (date of access: 07.09.2023).

⁴⁾ *Зенкович В. П.* Морфология и динамика советских берегов Черного моря. Москва : Изд-во АН СССР, 1958. Т. 1. 187 с.



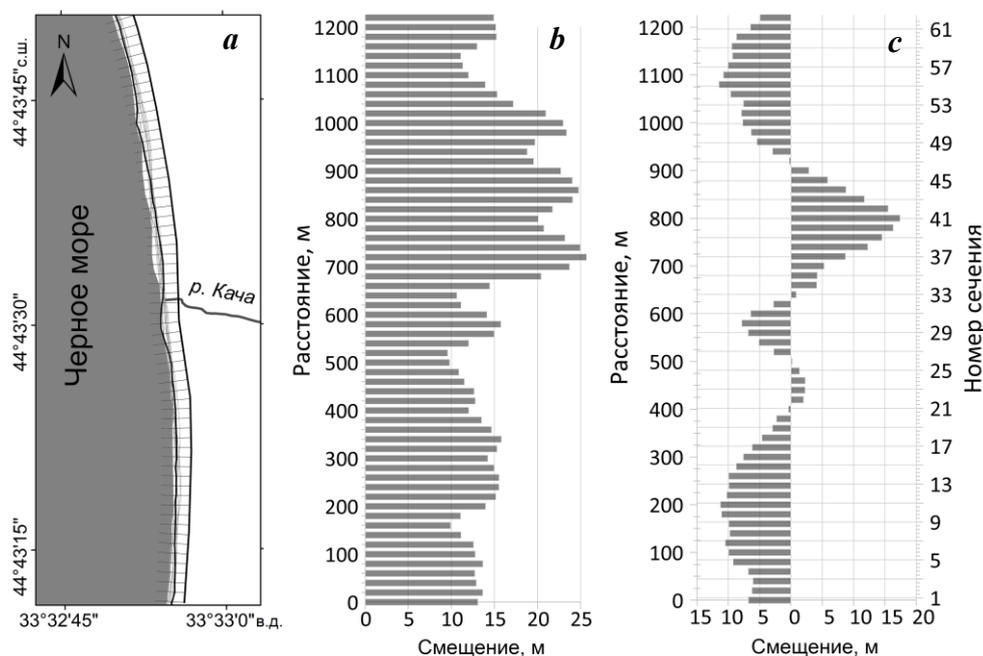
Рис. 2. Вид на устье р. Качи с юга в период сильного паводка 19 июня 2021 г.

Fig. 2. View of the Kacha River mouth during a strong freshet, 19 June 2021

Для определения динамики береговой линии использовались 62 поперечных сечения пляжа (рис. 3). Анализ показал, что наибольший максимальный размах смещения положения береговой линии характерен для участка к северу от устья р. Качи, где он достигает 26 м при среднем значении 20 м. Только в северной части, примыкающей к клифу на протяжении 200 м, среднее значение смещения уменьшается до 13 м при максимальном 16 м.

На участке южнее устья р. Качи максимальный размах смещения уменьшается до 16 м, а средний до 13 м. Если брать изменения между крайними датами (2011–2021 гг.), то обнаруживается другая картина. За указанный период половина участка к северу от устья выдвинулась в сторону моря на расстояние до 10 м (в среднем на 6 м), а другая половина, примыкающая к устью, отступила до 15 м (в среднем на те же 6 м). Другими словами, на этом участке изменилась конфигурация берега. Участок же южнее устья в целом, за небольшим исключением, выдвинулся в сторону моря в среднем на расстояние до 5 м при максимуме 11 м.

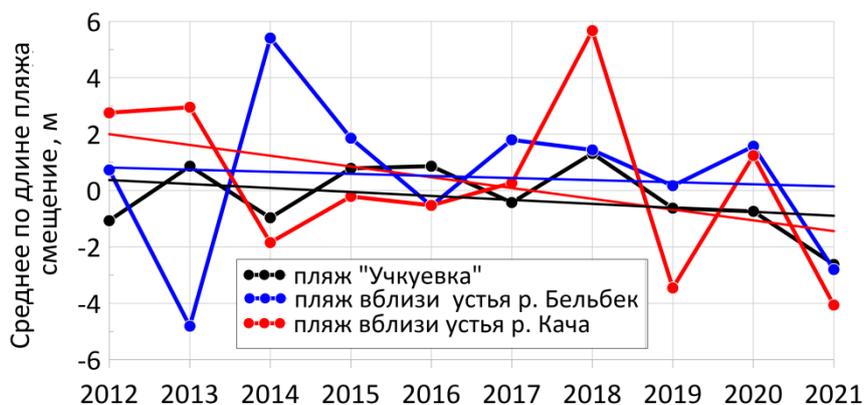
Из анализа видно, что максимальный размах смещения существенно больше почти по всей протяженности пляжа, чем значения смещения за рассматриваемый период. Это говорит о том, что при анализе тенденций изменения береговой линии нужно учитывать межгодовую изменчивость. Несомненно, что необходимо также учитывать и сезонную изменчивость, однако имеющееся в настоящее время количество снимков в течение года не позволяет это сделать. В нашей работе до некоторой степени эта проблема снимается использованием снимков, сделанных в теплый период года, когда изменчивость береговой линии минимальна.



Р и с . 3 . Схема сечений на пляже вблизи устья р. Качи (а); размах смещений береговой линии за весь период (b); итоговые смещения береговой линии между крайними датами (с)

F i g . 3 . Map of transects on the beach near the Kacha River mouth (a); coastline displacement span for the whole period (b); resulting coastline displacements between the first and last dates of observations (c)

На рис. 4 приведена межгодовая изменчивость береговой линии, рассчитанная по всей длине пляжа. Из него видно, что на фоне небольшого отрицательного тренда (отступления берега на 0.38 м/год) наблюдаются колебания с размахом до 10 м, особенно выраженные с 2017 г. Сравнение береговых линий 1966 г. и 2021 г. показало, что в северной части пляжа суммарное отступление составило 15–20 м, а в южной – до 40 м. Факт отступления можно связать со значительным сокращением поступления твердых наносов р. Качи, вызванным вводом в эксплуатацию Загорского водохранилища. Необходимо также отметить: в работе [5] показано, что на месте ранее выровненного берега сейчас образовалась вогнутость береговой линии, совпадающая с пляжем в устье р. Качи. Действительно, такая тенденция прослеживается, однако автор относит это к периоду после 1985 г., из чего делает неверный вывод, что пляж отступает скоростью 5 м/год. Нет сомнений, что ранее пляж испытал значительное отступление, вызванное, во-первых, добычей песка, которая проводилась на расстоянии около 200 м от берега рефулерами в течение 1950-х гг. (месторождение «Севастопольский»), а во-вторых, из-за сокращения твердого стока в результате зарегулирования реки. Однако имеющиеся данные не позволяют количественно оценить отступление береговой линии из-за этих факторов.



Р и с . 4. Межгодовая изменчивость среднего по длине пляжей положения береговой линии. Прямые линии – линейные тренды

Fig. 4. Interannual variability of the coastline position averaged over beach length. The straight lines are linear trends

Строительство поперечной каменной наброски в южной части пляжа значительно повлияло на его динамику. По нашим наблюдениям, при южных и юго-западных штормах, когда движение донных наносов направлено к северу, здесь наблюдаются явления низового размыва. Несколько таких случаев зафиксировано и на спутниковых снимках. Отступление берега в районе каменной наброски может достигать 10–20 м. При этом затяжные штормы могут угрожать целостности прибрежных строений, так как расстояние до них от уреза сокращается до 10 м, что явно недостаточно для эффективного гашения волновой энергии.

Аккумулятивный берег в районе устья р. Бельбек. Пляж полного профиля микрорайона Любимовка, незадернованная часть которого имеет ширину до 70–80 м при протяженности 1.1 км, расположен в устье р. Бельбек. Он сложен преимущественно песчаным материалом, а непосредственно вблизи уреза воды – гравийно-галечным. Примыкающий к нему с юга участок бывшего абразионного обвального-оползневого берега в конце 1970-х гг. был террасирован. Тогда же там было построено берегозащитное сооружение, состоящее из набережной, подпорной стены и системы из шести бун, что привело к частичной блокировке вдольберегового потока наносов. К северу от пляжа полного профиля расположен прислоненный к глинистому клифу и такой же по вещественному составу пляж шириной 25–40 м. Оба пляжа относятся к одной литодинамической ячейке. Северной ее границей является южная граница Большого Любимовского оползня [8], южной – северная буна вышеупомянутой системы из шести бун. Так же, как и на р. Каче, ранее на месте пойменной долины существовал лиман, впоследствии перекрытый сверху аллювием⁴⁾.

Бельбек – самая полноводная река Крыма. К настоящему времени после окончания строительства в 1964 г. трех водохранилищ общим объемом более 12 млн. м³ зарегулировано всего 20 % ее стока. Поступление аллювия в течение года крайне неравномерно. Формирование бюджета пляжеобразующего

материала и соответствующие изменения в динамике береговой линии в наибольшей степени определяются перераспределением объемов наносов во вдольбереговом направлении и поступлением аллювия с твердым стоком р. Бельбек. Другой источник поступления материала – береговая и донная абразия. Вклад последней в бюджет наносов из-за отсутствия наблюдений остается дискуссионным вопросом. Особенностью этого района побережья является существование направленного с севера на юг результирующего за год потока наносов.

После сильных штормов в прибойной зоне образуется волноприбойный вал, запирающий устье, при этом речные воды поступают в море, фильтруясь через этот вал. По нашим наблюдениям, для его образования необходимы два основных условия: сильный и продолжительный фронтальный западный шторм и слабое течение реки. При юго-западных штормах устье обычно отклоняется вправо, и в этом случае течение реки направлено параллельно берегу на расстоянии до 200 м. При северо-западных штормах устье ранее аналогичным образом отклонялось влево. В критических случаях с помощью бульдозеров прорывали искусственное русло реки.

В 2010 г. южнее устья для защиты пляжа была построена буна из каменной наброски, ступенчатым сооружением укреплен левый берег устья. Угол наклона буны в сторону моря составляет около 3° и равен естественному уклону пляжа. Пляж покрыл буну сверху песком и стабилизировался в течение первых трех лет после строительства. После окончания работ устье реки стало смещаться только вправо, к северу. В настоящее время верхняя часть буны обнажается только после сильного и продолжительного шторма с быстрым затуханием до первого шторма с медленным затуханием. В период катастрофического паводка в июне 2021 г. сильным течением реки отмыло только небольшую часть сооружения, которая затем в течение нескольких дней опять покрылась песком.

Анализ изменения береговой линии показывает, что формирование пляжа на значительной площади центрального участка пляжа ранее происходило в результате меандрирования устья р. Бельбек в обоих направлениях от устья. После строительства берегозащитного сооружения, которое исключило поворот устья реки в южном направлении, влияние этого фактора на конфигурацию береговой линии в северной части резко возросло. В результате паводков неоднократно наблюдался прорыв реки вдоль берега параллельно береговому валу в северном направлении на расстояние до 400 м, образование основных и вторичных валов. Это сопровождалось разрушением береговых построек, подмывом клифа и другими негативными последствиями. В период очень сильных паводков на протяжении до 200 м пляж может сильно размываться, однако после уменьшения стока довольно быстро восстанавливается (рис. 5).

Для определения динамики береговой линии использовались 105 поперечных сечений пляжа (рис. 6). Из рисунка видно, что наибольший размах смещения береговой линии характерен для короткого участка к северу от устья р. Бельбек протяженностью 260 м. Здесь максимальная величина составляет 30 м при среднем значении 20 м. К северу от этого участка на протяжении 900 м до северной границы пляжа максимальные значения составляют 13 м при среднем 8 м. К югу от устья реки значения несколько выше: максимальные



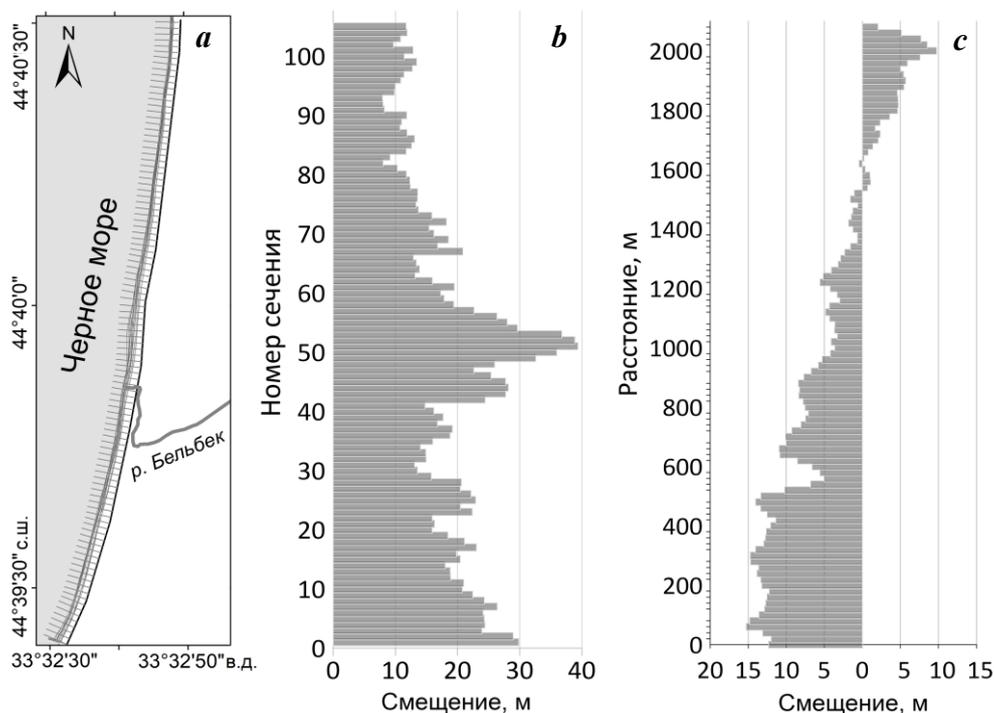
Рис. 5. Вид на устье р. Бельбек с юга в период сильного паводка 19 июня 2021 г.

Fig. 5. View of the Belbek River from south during a strong freshet, 19 June 2021

до 23 м, а средние по этому участку 14 м. Необходимо отметить, что наиболее высокие значения размаха смещения выделяются в узкой зоне протяженностью 60 м, примыкающей к буне на южной границе пляжа, у которой происходит, в зависимости от направления вдольберегового движения наносов, попеременно размыв или аккумуляция пляжного материала.

Изменения между крайними датами (2011–2021 гг.) относительно невелики. К северу от устья р. Бельбек пляж в этот период оставался относительно стабильным, с небольшими смещениями в пределах $\pm 5 \dots 8$ м. В южной же части по всей длине наблюдалось выдвигание берега на расстояние в среднем до 10 м. График межгодовой изменчивости среднего по длине положения береговой линии показывает статистически незначимый тренд (-0.07 м/год) на фоне межгодовых колебаний до 9 м (2013–2014 гг.). Можно отметить, что после этого периода межгодовые изменения были крайне малы – $1 \dots 4$ м (рис. 4). Ранее проведенные нами тахеометрические измерения показали, что внутригодовые изменения достигали 20 м [2].

Если брать период 1966–2021 гг., то в целом за 55 лет зафиксировано выдвигание береговой линии в южной части пляжа, величина которого в среднем составила 30 м, или 0.5 м/год. В северной части, где расположен клиф, наблюдалось отступление уреза на 10–20 м с увеличением к северу, или в среднем 0.3 м/год. Вместе с тем большая часть изменений произошла между 1966 и 2005 гг. [3]. Вероятнее всего, этот период еще меньше, однако имеющиеся данные не позволяют сделать более обоснованный вывод. Мы связываем эти изменения со строительством набережной длиной 600 м и шести бун длиной 65 м каждая на южной границе пляжа, которое было начато в 1982 г. и завершено в 1989 г. Как известно, поперечные гидротехнические сооружения способствуют накоплению пляжевого материала или размыву.



Р и с . 6 . Схема сечений на пляже вблизи устья р. Бельбек (а); размах смещений береговой линии за весь период (b); итоговые смещения береговой линии между крайними датами (с)

F i g . 6 . Map of transects on the beach near the Belbek River mouth (a); coastline displacement span for the whole period (b); resulting coastline displacements between the first and last dates of observations (c)

Наши наблюдения показали, что накопление здесь выражается не только в выдвигании берега, но и в увеличении вертикальной мощности пляжа, при этом избыточный материал даже перебрасывается через гребень бун.

В заключение отметим, что в 2021 г. в районе с. Верхнесадовое на р. Бельбек был построен водозабор. Первый год эксплуатации показал, что в бетонном ложе русла реки по длине сооружения очень быстро накапливаются наносы. Это требует периодической очистки, в результате чего поступление наносов в пляжную зону будет уменьшаться.

Пляж Учкеевка. Границами пляжа микрорайона Учкеевка на севере можно считать безымянный мыс к югу от отмеченного выше берегозащитного сооружения из набережной и шести бун, на юге – другой безымянный мыс. Пляж имеет длину 1.2 км, ширина его от 20 до 50 м при типичной около 30 м. Пляж прислоненный, сложен хорошо сортированным песком с включениями мелкой гальки, в тылу пляжа набережная и разнообразные объекты, необходимые для его эксплуатации. Пляж является одним из основных рекреационных объектов г. Севастополя. Питание пляжа ранее осуществлялось за счет перемещения материала из устья р. Бельбек в южном направлении и продуктов разрушения существовавшего здесь до террасирования клифа. После сооружения набережной и бун к северу от пляжа этого источника не стало.

К сожалению, отсутствие хорошо выраженных ориентиров на снимках 1941 г. и 1966 г. не позволяет выполнить приемлемую по точности геопривязку, однако качественный анализ свидетельствует, по-видимому, об относительно небольшой многолетней изменчивости как площади, так и конфигурации пляжа за 80 лет (рис. 7). Можно отметить даже небольшое увеличение ширины пляжа в 1966 г. по сравнению с 1941 г.

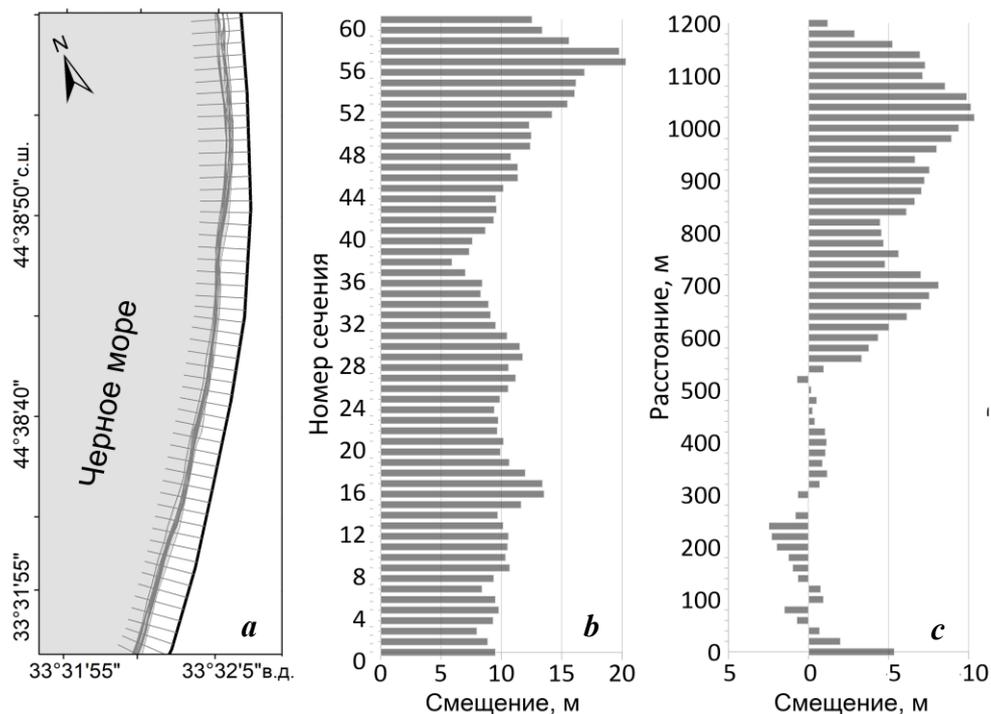
Для определения динамики береговой линии использовались 60 поперечных сечений пляжа (рис. 8). Из рисунка видно, что в целом на большей длине размах многолетних смещений береговой линии относительно невелик и лежит в пределах 6–13 м при среднем значении 9 м. Только на небольшом участке в северной части протяженностью 140 м он возрастает до 15–20 м. Изменения между крайними датами (2011–2021 гг.) относительно невелики. В южной половине пляжа они почти нулевые, а в северной – в среднем 7 м при максимуме 10 м. Межгодовые изменения среднего положения береговой линии крайне малы (рис. 3), они не превышают 1–2 м, линейный тренд статистически не значим (-0.1 м/год).

Вместе с тем, как показывают наши наблюдения, внутригодовые изменения могут быть более значительными. Так, в результате действия шторма редкой повторяемости (главным образом из-за его аномальной продолжительности) 18–19 октября 2013 г. в северной части пляжа на протяжении 360 м пляжные накопления были частично смыты (рис. 9).



Рис. 7. Район пляжа микрорайона Учкюевка – аэрофото 1941 г. (а), спутниковые снимки 1966 г. (b) и 2021 г. (c)

Fig. 7. The beach area of the microdistrict of Uchkuevka – aerial photo dated 1941 (a), satellite images dated 1966 (b) and 2021 (c)



Р и с. 8. Схема сечений на пляже Учкуевка (а); размах смещений береговой линии за весь период (b); итоговые смещения береговой линии между крайними датами (с)

Fig. 8. Map of transects on the beach near Uchkuevka Beach (a); coastline displacement span for the whole period (b); resulting coastline displacements between the first and last dates of observations (c)

В тыловой части пляжа образовался выраженный береговой уступ, возле уреза обнажились валуны, причем значительная часть материала была перемещена к югу. Объем песка и гравия, перемещенного к югу и вынесенного на глубину с одного погонного метра пляжа и подводного склона, оценивался нами в пределах от 20 до 35 м³. Общий объем уменьшения пляжа в северной части составил около 10 тыс. м³. Ширина пляжа в северной части уменьшилась на 5–10 м, на такую же примерно величину выдвинулся берег в южной части вплоть до безымянного мыса. На южной половине на участке берега протяженностью 550 м объем пляжного материала увеличился на 5–6 тыс. м³, а около половины смытого в северной половине материала ушло на глубину. К апрелю – маю 2014 г. положение уреза почти восстановилось, однако вплоть до 2017 г. в северной части отмечалась нестабильность. Периодически берег отступал или выдвигался на 10–15 м, позже стал более устойчивым, однако прежний профиль пляжа не восстановился. Характерно, что, поскольку это событие зафиксировано в промежуток между снимками, оно никак не проявилось на графике межгодовой изменчивости средней ширины пляжа (см. рис. 3). Интересно сравнить динамику рассмотренных выше пляжей с динамикой аккумулятивных берегов в сходных природных условиях других причерноморских стран.



Р и с . 9 . Северная часть пляжа Учкучевка 18 октября 2010 г. (а), 2 ноября 2013 г. (б)

Fig. 9. The northern Uchkuevka beach on 18 October 2010 (a), 2 November 2013 (b)

В настоящее время из общей длины береговой линии дельты Дуная более половины подвержено размыву, на 30 % отмечается аккумуляция, 15 % находятся в динамическом равновесии и относительно стабильны, типичные скорости размыва до 5–25 м/год [9]. Такое соотношение румынские ученые связывают со строительством плотин для гидроэнергетических целей, сооружением различных насыпей, спрямлением русла и другими гидротехническими работами в нижнем течении Дуная, в результате чего годовой сток наносов сократился вдвое [10, 11]. Проблемным является знаменитый пляж Мамай в Румынии. Имевший еще в 1960-х гг. ширину 100 м, к 1985 г. он уменьшился до 50 м. В последующие 15 лет пляж продолжал уменьшаться со средней скоростью 2.25 м/год. Причина – гидротехническое строительство, из-за которого был заблокирован вдольбереговой перенос наносов [12]. В 1980-х гг. в Варненском заливе (Болгария) была построена прибрежная дамба и система непроницаемых бетонных бун, из-за заносимости фарватеров регулярно проводилось дноуглубление. Кроме этого, в последние десятилетия практиковалось строительство зданий непосредственно на пляжах. Вся эта деятельность привела к нарушению естественных динамических процессов, а береговая линия Варненского залива была необратимо изменена. Так, до вмешательства человека пляж Аспарухово постоянно рос из-за разгрузки здесь двух встречных потоков наносов, а в настоящее время длина его уменьшилась на 800 м. В результате нарушения естественного питания прилегающих песчаных пляжей отдельные пляжи или исчезли, или существенно сократились [13–15].

Заклучение

На основании вышеизложенного можно сделать следующие основные выводы.

1. Аккумулятивные берега в долинных понижениях рек Качи и Бельбека также, как и пляж Учкучевка, в последнее десятилетие (2011–2021 гг.) находятся в динамическом равновесии. Значимых трендов изменений среднего положения береговой линии для периода 2011–2021 гг. не обнаружено. Ранее пляжи испытали значительные изменения береговой линии, связанные с антропогенной деятельностью (сокращение твердого стока, добыча песка, строительство берегозащитных сооружений).

2. Наибольший максимальный размах смещения береговой линии в период 2011–2021 гг. характерен для участка к северу от устья р. Качи – 26 м при среднем значении 20 м. На участке южнее устья р. Качи максимальный размах смещения уменьшается до 16 м, а средний до 13 м.

3. Наибольший размах смещения положения береговой линии в период 2011–2021 гг. характерен для участка протяженностью 260 м к северу от устья р. Бельбек – 30 м при среднем значении 20 м. К северу от этого участка, на протяжении 900 м до северной границы пляжа, максимальные значения составляют 13 м при среднем 8 м. К югу от устья реки максимальные значения 23 м, а средние 14 м. Наиболее высокие значения размаха смещения выделяются в узкой зоне протяженностью 60 м, примыкающей к буне на южной границе пляжа, у которой наблюдается, в зависимости от направления вдольберегового движения наносов, попеременно размыв или аккумуляция.

4. На большей длине пляжа Учкучевка в период 2011–2021 гг. размах многолетних смещений береговой линии относительно невелик и лежит в пределах 6–13 м при среднем значении 9 м. Только на небольшом участке в северной части протяженностью 140 м он возрастает до 15–20 м.

5. Максимальная межгодовая изменчивость среднего по длине положения береговой линии достигает 10 м для пляжей в устьях рек Качи и Бельбека, до 2 м для пляжа Учкучевка.

6. Внутригодовые изменения положения береговой линии по величине могут превышать межгодовые. При анализе спутниковых данных для определения динамики береговых линий необходимо использовать не только снимки, полученные в крайние даты, а всю совокупность имеющихся изображений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ефремова Т. В., Горячкин Ю. Н.* Морфодинамика севастопольских бухт под воздействием антропогенной деятельности // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 1. С. 31–47. EDN THAAMX. doi:10.29039/2413-5577-2023-1-31-47
2. *Удовик В. Ф., Долотов В. В.* Современное состояние и тенденции динамики береговой зоны в районе пляжа пос. Любимовка // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. Вып. 20. С. 92–99. EDN XCIVOL.
3. *Долотов В. В., Попова А. В.* Оценка долгопериодной динамики пляжа пос. Любимовка // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014. Вып. 28. С. 31–41. EDN VBFSNV.
4. *Долотов В. В., Горячкин Ю. Н., Долотов А. В.* Статистический анализ изменений береговой линии пляжа поселка Любимовка // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2017. № 1. С. 40–47.
5. *Луговой Н. Н.* Современное состояние морских берегов Севастополя // Теория и методы современной геоморфологии : Материалы XXXV Пленума Геоморфологической комиссии РАН. Т. 1. Симферополь, 2016. С. 241–245.
6. *Земсков В. Ф., Заичко В. А., Зайченко Ю. В.* Оценка геометрической точности космических снимков, получаемых системами дистанционного зондирования Земли в различных диапазонах электромагнитного спектра // Известия вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 7. С. 576–583. doi:10.17586/0021-3454-2018-61-7-576-583

7. О точности создания ортофотопланов по снимкам QuickBird / В. Н. Андров [и др.] // Геопрофи. 2005. № 6. С. 21–24.
8. Горячкин Ю. Н., Федоров А. П. Оползни Севастопольского региона. Часть 1. Северная сторона // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. № 1. С. 4–12.
9. Danube Delta Coastline Evolution (1856–2010) / A. Vespremeanu-Stroe [et al.] // Landform Dynamics and Evolution in Romania. Cham : Springer, 2017. P. 551–564. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32589-7_23
10. Stanica A., Dan S., Ungureanu V. G. Coastal changes at the Sulina mouth of the Danube River as a result of human activities // Marine Pollution Bulletin. 2007. Vol. 55, iss. 10–12. P. 555–563. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2007.09.015>
11. Ungureanu Gh., Stanica A. Impact of human activities on the evolution of the Romanian Black Sea beaches // Lakes & Reservoirs: Research and Management. 2000. Vol. 5, iss. 2. P. 111–115. <https://doi.org/10.1046/j.1440-1770.2000.00105.x>
12. Beach Erosion and Coastal Protection Plan along the Southern Romanian Black Seashore / K. Kuroki [et al.] // Coastal Engineering: proceedings of the 30th International Conference, San Diego, California, USA, 3–8 September 2006. World Scientific Publishing Co Pte Ltd., 2007. Vol. 5. P. 3788–3799. https://doi.org/10.1142/9789812709554_0318
13. Longshore sediment transport at Golden Sands (Bulgaria) / H. Nikolov [et al.] // Oceanologia. 2006. Vol. 48, iss. 3. P. 413–432.
14. Дачев В. Ж. Генезис и эволюция на центральный пляж на град Варна // Трудове на Института по океанология. 2003. Т. 4. С. 74–82.
15. Ефремова Т. В., Горячкин Ю. Н. Антропогенное воздействие на литодинамику береговой зоны южного и западного побережий Черного моря (обзор) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 2. С. 5–29. [doi:10.22449/2413-5577-2021-2-5-29](https://doi.org/10.22449/2413-5577-2021-2-5-29)

Поступила 1.05.2023 г.; одобрена после рецензирования 2023 г.; принята к публикации 2023 г.; опубликована 2023 г.

Об авторах:

Горячкин Юрий Николаевич, главный научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), доктор географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-2807-201X**, **ResearcherID: I-3062-2015**, yngor@mhi-ras.ru

Долотов Вячеслав Валентинович, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), кандидат химических наук, **ORCID ID: 0000-0002-1485-2883**, **ResearcherID: E-5570-2016**, dolotov_v_v@mhi-ras.ru

Заявленный вклад авторов:

Горячкин Юрий Николаевич – постановка проблемы, обработка и анализ данных, подготовка текста статьи

Долотов Вячеслав Валентинович – обработка и анализ данных, подготовка текста статьи и иллюстративного материала

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.