

УДК [502.2:551.435.6](729.1)

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА РАЙОНА МЕЖДУНАРОДНОГО КУОРТА ВАРАДЕРО (КУБА)

Н.Н. Дунаев¹, И.О. Леонтьев¹, Т.Ю. Репкина², Х.Ф. Эррера³

¹ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН; dunaev@ocean.ru, igor.leontiev@gmail.com

² МГУ им. М.В. Ломоносова; t-repkina@ya.ru

³ Институт океанологии АН Кубы, Гавана; gareces@infomed.sld.cu

Представлены результаты экспедиционных исследований авторов с привлечением релевантных опубликованных источников. Рассмотрено геолого-геоморфологическое расположение курорта Варadero — пляжно-купальной рекреационной зоны международного значения, перспектива развития которой по природному сценарию вызывает большую тревогу. Дан анализ его прибрежной морфо- и литодинамики с пояснением применяемой терминологии. Полученные материалы положены в основу моделирования штормовых деформаций профиля берега исследуемой зоны. Предлагаются конкретные мероприятия по защите пляжей курорта от катастрофических размывов.

Ключевые слова: прибрежье, экология, неотектоника, размыв берега, моделирование, искусственный пляж.

GEOECOLOGICAL SITUATION OF THE AREA OF THE INTERNATIONAL RESORT IN VARADERO (CUBA)

N.N. Dunaev¹, I.O. Leont'yev¹, T.Y. Repkina², J.F. Herrera³

¹ Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences

² M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography

³ Instituto de Oceanology de Academia Siensias de Cuba

The results of expedition research of its authors with the involvement of relevant published sources are presented. Reviewed geological and geomorphological location of the resort Varadero — famous beach recreational areas of international importance, the prospect of development on the natural scenario of great concern. At present the beaches in this region are eroded. The analysis of coastal morpho-and lithodynamic with an explanation of the terminology used. The resulting materials form the basis for the simulation of storm deformation of the shore profile of the study area. Proposes specific measures to protect beaches from catastrophic washouts.

Keywords: nearshore zone, ecology, neo-tectonic, coastal erosion, modelling, artificial beach.

Введение

Прибрежные зоны морских акваторий являются наиболее чувствительными индикаторами кинематики морского уровня и климатических изменений. К настоящему времени заметно обострилась экологическая обстановка в их пределах. Поэтому для прогнозирования состояния таких территорий изучение их особенностей в различной географической поясности и секторности представляет актуальную проблему.

Расположенная в условиях тропических широт Республика Куба входит в число малых островных государств, которым уделяется разностороннее внимание

со стороны ООН, Генеральная Ассамблея которой приняла программу по укреплению их потенциала (Барбадос, Бриджтаун, 26 апреля — 6 мая 1994 года). В рамках реализации этой программы предусмотрено международное сотрудничество в различных направлениях. Применительно к Кубе одним из таких направлений являются мероприятия по расширению международного туризма на основе привлекательности прибрежно-морского курортного отдыха. Жемчужиной такого курорта, получившего с 30-х годов XX века международное признание как превосходная пляжно-купальная рекреационная территория с промыслово-прогулочной составляющей, является Варадеро, расположенный в пределах западного побережья полуострова Икакос. Его песчаные пляжи, протянувшиеся примерно на 10 км, входят в пятерку лучших пляжей мира, природная динамика которых вызывает тревогу специалистов современного береговедения. С 70-х годов XX века полуостров, его берега и сопредельный шельф подвергаются всестороннему геолого-геоморфологическому и морфолитодинамическому изучению с целью дать объективную оценку состояния и обосновать прогноз развития его побережья по крайней мере в XXI веке.

Терминология

Для того чтобы дать отчетливое представление об объекте и предмете выполненного исследования, необходимо уточнить некоторые понятия. В настоящее время терминология применительно к территории сопряжения суши и моря продолжает находиться в стадии разработки. Поэтому нередко один и тот же объект этой области именуется по-разному либо одним термином обозначаются разные объекты [2, 3, 5, 6, 13, 14]. Это касается, прежде всего, понятий «береговая зона», «побережье», «прибрежье» и «приморье». Целесообразно рассматривать формирование и развитие данной пограничной полосы как результат процессов, происходящих в единой прибрежной зоне — целостном относительно автономном природно-территориальном комплексе, состоящем из взаимосвязанных непосредственным энергомассобменом приурезовых субаэрального и субаквального сегментов.

По мнению авторов настоящей работы, прибрежная зона (near-shore zone) должна соответствовать *территории при берегу*, достаточно легко определяемой на местности. В этом контексте нет разногласий по определению понятия «берег» (shore). Наземную часть можно идентифицировать с понятием «побережье» (near-sea zone). Это прилегающая к берегу территория суши в виде фронтальной части приморья (seaside zone), экзогенная специфика которой определяется, прежде всего, микроклиматом, повсеместно называемым морским. Здесь наглядно проявляются особенности атмосферных характеристик, микрорельефа, растительности, почвообразования, некоторых форм животного мира. Морская часть (near-land zone) определяется территорией, в пределах которой происходит непосредственный энергомассобмен между акваторией и берегом под влиянием ветровых морских волн как наиболее значимого экзогенного фактора ее состояния. Внешняя граница определяется дальностью выноса в акваторию твердых частиц

формируемого берега вследствие действия штормовых волн данной обеспеченности, где амплитуда волновых деформаций рельефа, затухая с удалением от берега, становится сопоставимой с погрешностью промера глубин дна. Практика показывает, что глубина воды на границе соответствует удвоенной высоте волн данной обеспеченности [21].

Проблемы развития курорта Варадеро и их решение

Исследуемый район охватывает полуостров Икакос, расположенный на севере Кубы (рис. 1). Он протянулся в северо-восточном (70°) направлении на 22 км; ширина его возрастает от 0,5 км у основания до 1,2—2,5 км по мере приближения к дистали. С 1956 г. Икакос практически является островом в результате строительства в его основании канала Paso-Malo, обеспечивающего проход маломерных плавсредств из залива (бухты) Карденас во Флоридский пролив (рис. 1).

Одной из задач геоэкологической оценки какой-либо территории является определение конфликтных природно-антропогенных ситуаций. Основные геоэкологически напряженные ситуации на территории полуострова связаны с расположением в непосредственной близости районов нефтедобычи, расширением селитебной инфраструктуры (строительство отелей, дорог и пр.), строительными и бытовыми отходами, недостаточно бережным отношением к пляжам и сопредельным с ними районам природной подпитки песчаным материалом. Остановимся на одной из них.

Варадеро находится между основными районами нефтедобычи на Кубе: побережье Гавана — Матансас и прилегающая к Варадеро территория мелководной (глубина не превышает нескольких метров) бухты Карденас и ее южного и юго-восточного побережья. Сопутствующие добыче нефти экологические проблемы при всей законодательной строгости этого процесса ставят под угрозу



Рис. 1. Местоположение полуострова Икакос.

На врезке: 1 — лагуна Paso Malo, 2 — канал Paso Malo, 3 — м. Bernardino, 4 — м. Chapelin, 5 — м. Frances, 6 — м. Nicacos, 7 — м. Molas, 8 — канал Кавама.

комфортность туризма. Так, тяжелые высокосернистые сорта нефти насыщают окружающую воздушную среду сероводородом, и запах тухлых яиц при определенных направлениях ветра достигает курорта, отпугивая туристов, которые воздерживаются от повторных его посещений. Между тем, например, в 2015 г. Кубу посетили 3,5 млн иностранных туристов, что увеличило государственный бюджет на \$1,94 млрд. При этом доход от курорта Варадеро составил около 40 % этой суммы. Следует также учесть роль курорта в обеспечении рабочими местами кубинского населения из соседних районов. По прогнозам кубинских социологов, антропогенный прессинг на полуостров будет возрастать, и здесь важно дать своевременную оценку соразмерности территории и ее природных условий, с одной стороны, и предельно возможной численности населения и характера его жизнедеятельности, с другой.

Материалы и методы исследования

Главным объектом исследования было западное побережье полуострова Икакос. Это объясняется тем, что сохранность расположенных здесь пляжей Варадеро вызывает большую тревогу. Для их поддержания в последние десятилетия производится периодическая подсыпка песка — в основном к югу от м. Чапелин — на протяжении примерно 12 км. Так, с 1987 г. здесь отсыпано около 3 млн м³ песка при стоимости примерно 5 кубинских песо за 1 м³.

С целью выявления тектонической позиции п-ова Икакос в новейшей структуре кубинского архипелага был выполнен структурно-геоморфологический анализ мелко- и среднемасштабных топографических карт в соответствии с апробированными на практике методическими приемами [9, 18, 19]. Использовались также геологическая и тектоническая карты Кубы масштаба 1:500 000 (Мара Geologico De La Republica De Cuba, 1985, тектоническая карта Кубы, 1989), а также геоморфологическая карта масштаба 1:1 000 000 (1970). Большой объем информации получен в результате дешифрирования космических радарных изображений масштаба 1:250 000. Для составления картографической модели новейшей тектоники полуострова и сопредельного шельфа привлекались средне- и крупномасштабные топографические и батиметрические карты, данные сейсмоакустического и эхолотного профилирования, аэроснимки за 1957 и 1971 гг., а также снимки со спутника Landsat, размещенные в программе Google Earth (<https://www.google.com/earth/>). Пространственное разрешение последних лучше 1 м. Для проверки дешифрирования использованы фотоизображения с сайта Panoramio (<http://www.panoramio.com>).

Для оценки направления вертикальных движений выделенных блоков привлекались региональные признаки: нарушение зональности в расположении в разной степени галофильной и галофобной растительности по отношению к урезу воды, продвижение молодой поросли мангров в акваторию или обнаружение затопленных пней на подводном склоне, наличие затопленных или поднятых на берегу отложений бич-рока, последовательность в геологическом разрезе аккумулятивных береговых отложений (трансгрессивная или регрессивная), тенденция развития



Рис. 2. Типы берегов п-ова Икакос.

Основа — космический снимок (Landsat, 31 декабря 2003 г.; <https://www.google.com/earth/>).

Условные обозначения: типы берегов: 1 — аккумулятивные пляжевые песчаные; 2 — абразионно-аккумулятивные, с песчаными пляжами и известняковыми бенчами; 3 — абразионные, с береговыми уступами, выработанными в известняковых песчаниках (калькаренитах); 4 — эрозионные, сформированные приливными течениями; 5 — преобладающие направления потоков наносов; 6 — направления реверсивных приливных течений.

прибрежья по аккумулятивному или абразионному сценарию и др. Применительно к берегам были привлечены оригинальные карты: морфогенетическая, демонстрирующая их дискретность (рис. 2), и морфодинамическая (рис. 3), показывающая целостность развития берегов как компонента прибрежной зоны.

Современная динамика берегов оценена путем сопоставления космических снимков за 31 декабря 2003 г. и 15 декабря 2013 г., размещенных в программе Google Earth (<https://www.google.com/earth/>). В версии Google «Timelapse Google Earth» космические снимки Landsat за 1984—2011 гг., представленные в виде анимации (<https://earthengine.google.com/timelapse/>), дают возможность получить представление о тенденциях развития берегов относительно крупных районов. Для заверки дешифрирования использованы фотоизображения с сайта Panoramio (<http://www.panoramio.com>). На абразионных участках берега сравнивалось положение бровки берегового уступа, а на аккумулятивных — основания пляжа.

Рельеф

По форме полуостров Икакос напоминает косу — береговую аккумулятивную форму азовского типа. Его рельеф представлен низкой (в среднем высотой 10 м)



Рис. 3. Динамика западных берегов п-ова Икакос за период 2003—2013 гг.

Основа — космический снимок Landsat (<https://www.google.com/earth/>).

Смещение береговой линии: 1 — незначительное или отсутствует; *отступление*: 2 — менее 1 м/год, 3 — 1—2 м/год; *выдвижение*: 4 — менее 1 м/год, 5 — 1—3 м/год, 6 — 3—10 м/год; 7 — преобладающие направления потоков наносов; 8 — направления реверсивных приливных течений. Линиями показаны границы участков берега с различной динамикой.

абразионно-аккумулятивной равниной с несколькими останцами коренных карбонатных пород, максимальная отметка которых составляет 27 м. На поверхности полуострова выделяются абразионные террасы высотой 2—3, 5—7 и 10—15 м. Восточный берег полуострова наиболее низкий (1—1,5 м) и отличается развитием болот и мангровой растительности. Западный берег характеризуется песчаными пляжами шириной 20—30, местами до 50 м. На трех участках к урезу воды выходят коренные известняковые породы, образуя мысы с хорошо выраженными клифами высотой до 8—12 м. В них выработаны ниши глубиной 1—1,5 м и высотой до 0,5 м. Последние, по-видимому, образовались в результате химической абразии, так как на подводном склоне не обнаружено обломков прочных пород, образующихся вследствие механической абразии. Между мысами Чапелин и Франсез (см. рис. 1) сформировалась аккумулятивная терраса «себоруко», сложенная сцементированными обломками ракуши, рифовых известняков, фораминифер, органометным песком и другими разновидностями пород морского происхождения. В приурезовой полосе на низких террасах широко распространены микроформы морского карста в виде чашевидных понижений (касимбы) и шипов (диенте перро). Возраст таких террас Кубы позднеголоценовый и по данным радиоуглеродных датировок (ГИН-510, ГИН-511) находится в пределах 2—4 тыс. радиоуглеродных лет [8, 24].

Более высокие террасы сформировались в начале позднего неоплейстоцена (сангамонский период). На аккумулятивных участках берега прослеживается древний песчаный вал шириной 20—30 м и высотой до первых метров предположительно сангамонского (Q_3^1) возраста. Основание полуострова представляет собой пересыпь предположительно сангамонского возраста. Его северный берег продвигается на восток, развиваясь по типу косы в волновой тени мыса Франсез в результате разгрузки локального вдольберегового потока наносов северо-восточного направления. Согласно изложенному, возраст рельефа полуострова Икакос молодой, не древнее позднего неоплейстоцена. Его основные черты отражают два уровня — верхний абразионно-денудационный и нижний аккумулятивный.

Сопредельный полуострову западный шельф мелководный. Перегиб к островному склону происходит в среднем на глубине 25—40 м, иногда несколько меньше или больше. Он расширяется от 0,5 км в начале полуострова до 7 км в его придистальной части. Соответственно уклон прибрежной отмели изменяется от 0,011—0,014 до 0,005—0,008. В рельефе шельфа отмечены абразионные террасовые ступени на глубине 5—6, 10—14, 20—25, 30—35 м и уже на островном склоне на глубине 65 м. Высота бровок террас над их тыловым швом часто составляет около 7 м. Отчетливо выделяются две генерации подводных песчаных валов со слабо волнистыми очертаниями, простирающиеся субпараллельно берегу. Первый вал удален от уреза на расстояние 80—160 м при глубине дна около 2 м. Его относительная высота составляет 1 м, а глубина воды над ним 0,3—0,7 м. Второй вал более крупный с относительной высотой 2—2,5 м. Он сформировался на дне на глубине 5—6 м и удален от уреза на расстояние от 200—250 до 700 м и более. Поверхность шельфа осложнена тремя генерациями рифовых построек, образующих прерывистые гряды, удаляющихся от берега в направлении к дистали полуострова на расстояние от 0,7 до 5 км. Ближние к берегу рифы, расположенные на глубине 10—15 м на расстоянии 0,7—2,5 км от берега, — реликтовые, очевидно, сангамонского возраста. На глубине 17—18 м прослеживается средняя гряда. Рифы угнетенные, современные, унаследованно развивающиеся на более древней генерации, вероятно, сангамонского возраста. Таким образом, они являются адерентными (насаженными) формами. Удалены от берега на расстояние 2—3,5 км. Внешняя гряда расположена в пределах изобат 50—60 м и удалена от берега на 1,2—5 км. Рифы активные, их относительная высота составляет 10—15 м. В среднем глубина воды до поверхности рифов составляет 7—28 м [15].

Геологическое строение и тектоника

Геологическое строение полуострова Икакос в своей основе представлено несколькими останцами миоценовых известняковых песчаников (калькаренитов), которые в период сангамонской трансгрессии соединились песчаными пересыпями, образовавшими золианиты. В результате полуостров приобрел близкий к современному вид. Голоценовые отложения с западной стороны представлены морским органогенным песком пляжей и ограниченно органогенной конгло-брекчией террасы «себоруко», а с восточной — преимущественно отложениями болот и

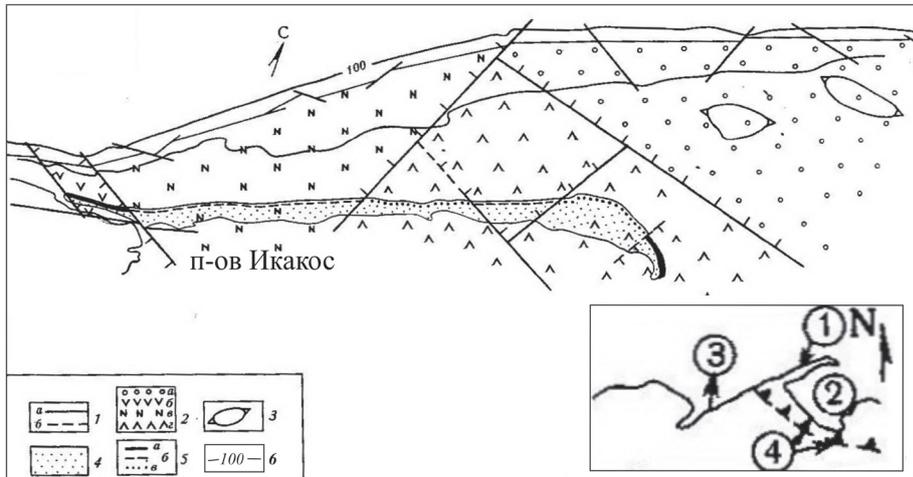


Рис. 4. Карта-схема новейшей тектоники п-ова Икакос и сопредельного шельфа.

- 1 — разрывные нарушения (*a* — выявленные по геолого-геоморфологическим или сейсмоакустическим данным, *б* — предполагаемые по геоморфологическим признакам),
 2 — обобщенное распределение амплитуд поднятий от наименьших (*a*) к наибольшим (*с*),
 3 — локальные поднятия, 4 — суша, 5 — обобщенная характеристика динамического состояния берегов (*a* — квазистатические, *б* — слабого воздымания, *в* — умеренного воздымания),
 6 — изобаты. На врезке: 1 — п-ов Икакос, 2 — бухта Карденас, 3 — залив Матансас, 4 — южная граница прогиба Ремедиос.

небольших мелководных лагун. В состав песков обычно входят бентосные фораминиферы (часто более 50 %), детрит ракуши (20—35 %), чешуйки халимедовых водорослей (15—30 %) и компоненты рифов (1—3 %). Показатель сортировки песка S_0 составляет 1,1—1,43, медианный диаметр M_d равен 0,24—0,55). Голоценовая (фландрская) трансгрессия, как и сангамонская, способствовала дальнейшему объединению выступов коренных пород песчаными пересыпями.

В тектоническом отношении полуостров Икакос представлен разломно-блоковой структурой (рис. 4), осложняющей центриклиналь неотектонического прогиба Ремедиос, ограничивающего с севера о. Куба [7]. Его происхождение, по-видимому, изначально предопределено системой дифференцированных блоковых поднятий, сопутствующих развитию неотектонического регионального разлома северо-восточного простирания левосдвиговой кинематики. Разлом в виде сбросо-сдвига пересекает о. Куба, инициирует образование грабена залива Матансас и ограничивает с запада северный шельф о. Куба, включая его район, прилегающий к п-ову Икакос.

Сбросо-сдвиговые деформации сопровождалась дроблением приповерхностного горизонта земной коры на небольшие блоки с дифференцированными вертикальными движениями на относительно поднятом крыле разлома, осложнившие центриклиналь прогиба Ремедиос. Ориентация разрывных нарушений полуострова подчинена северо-восточному и северо-западному направлениям,

что свойственно кубинскому архипелагу в целом. Локальные поднятия на шельфе полуострова (рис. 4), вероятно, являются фрагментами донеотектонического структурного плана региона, когда доминировала складчатая структура и развивались локальные пликативные дислокации. В плане они продолжают расположенный восточнее островной архипелаг Сабана-Камагуэй, отражающий антиклинические поднятия, ограничивающие с севера прогиб Ремедиос. Начало становления в современном рельефе блоковой структуры полуострова относят к рубежу плиоцен — плейстоцен, когда складчатый тектогенез кубинского антиклинория сменился преимущественно дизъюнктивным [1]. Считается, что минимальный период перестройки глубинных процессов, инициирующих тектонические структурообразующие движения, составляет 10 тыс. лет [4]. Поэтому начало продолжающейся в настоящее время молодой тектонической фазы можно отнести к рубежу поздний неоплейстоцен — голоцен, а начало ее современной стадии — примерно к периоду 2,5—2,0 тыс. лет тому назад, когда заметно проявилось усиление тафрогенного режима развития земной коры [16].

Гидрометеорологические условия

Гидрометеорологические условия исследуемого района во многом определяются северо-восточными пассатами, под воздействием которых образуются морские волны высотой 0,5—1 м, и северо-западными антициклоническими ветрами, скорость которых в штормовые дни (обычно два-три дня) достигает 15—20 м/с; при этом высота генерируемых морских волн, оказывающих разрушительное воздействие на пляжи полуострова, превышает 2 м. При умеренном волнении перестройка пляжей происходит до половины их ширины. Редкие ураганы, проходящие со скоростью 40—55 и до 73 м/с, оказывают катастрофическое воздействие на берега: пляжи размываются полностью, а перестройка аккумулятивного профиля на подводном склоне прослеживается до глубины дна 10 м. В среднем потери песка с пляжей приближаются к 50 тыс. м³/год. Этому способствует специфика регионального пляжеобразующего материала, отличающегося быстрой истираемостью и повышенной флотацией.

Современная кинематика уровня моря в регионе оценивается неоднозначно. Согласно данным постов наблюдений, установленных по берегам Кубы, относительные его колебания изменяются от отрицательных до преимущественно однозначных положительных величин. Это связано с неучтенным влиянием новейшей тектоники мест расположения постов наблюдения. Поэтому, например, за период 1966—2005 гг. скорость повышения уровня зафиксирована в пределах 0,06—2,14 мм/год. По данным Института океанологии Кубы, уровень моря за последние десятилетия повышается со скоростью 2 мм/год, а согласно данным Кубинского агентства по охране окружающей среды, с 1966 по 2015 г. уровень моря повысился на 6,74 см, т. е. средняя скорость его роста составила 1,35 мм/год.

Полевые наблюдения и сопоставление разновременных снимков показали, что большая часть береговой линии стабильна (см. рис. 3), что является, очевидно, следствием искусственной подсыпки песка. Аккумулятивные пляжевые берега

перестраиваются в ходе штормов достаточно интенсивно. Однако такие изменения не повсеместно были необратимыми. Наиболее устойчивы пляжи в средней части полуострова — вероятно, потому что сюда устремляются мигрирующие вдольбереговые потоки наносов как с южной, так и с северной стороны полуострова. Абразионные берега в течение данного отрезка времени не изменили своей позиции. Однако отмеченные непосредственно на урезе воды блоки коренных пород размером до первых метров свидетельствуют о том, что их устойчивость, по крайней мере, на среднемасштабном отрезке времени является проблематичной.

На примере берега в районе м. Франсез причина образования блоков видится в следующем. Изначальное горизонтальное залегание пластов калькаренитов было изменено новейшей тектоникой таким образом, что их простирание стало 220° , т.е. субпараллельно общей ориентации полуострова, а падение 22° . Во время штормов в нишах берега происходит выщелачивание калькаренитов по плоскостям напластования, которое усиливается вследствие бризантного эффекта при ударах волн и давлении сжимаемого воздуха. В результате по наиболее ослабленной плоскости напластования образуются устремленные по восстанию пластов небольшие трещинного вида каналы. В местах выхода их на поверхность происходит выдувание сжатого в нишах воздуха и вынос мелких частиц разрушенных калькаренитов, образующих в устье каналов своего рода blow-hole, насыпные конусовидные микрохолмики диаметром в основании до 20—30 см и высотой до 15—20 см. По ним хорошо прослеживается ориентация плоскости напластования. Со временем по этой поверхности происходит отделение мористой части соответствующего участка берега с образованием глыб коренных пород на линии уреза морского урваня.

Пляжи Варадеро и возможный способ их защиты

Как отмечалось выше, западные берега п-ова Икакос наиболее подвержены деструктивному воздействию со стороны северо-западных тропических циклонов. При этом в районе Варадеро экстремальные штормы протекают, как правило, на фоне высоких штормовых нагонов, вызывающих частичное или полное затопление пляжа. Непосредственное волновое воздействие на пляж и примыкающую авантюну приводит к размывам и выносу значительных объемов песка на подводный склон. Часть песка затем перемещается за бровку шельфа, расположенную достаточно близко к берегу, и безвозвратно для берега теряется. Волны данного направления подходят к берегу п-ова Икакос под углом, близким к 45° . Полуостров ориентирован таким образом, что потенциальная емкость вдольберегового потока пляжеобразующих наносов, создаваемого этим волнением, близка к максимально возможной величине. При условии насыщенного потока и с учетом прямолинейного контура берега это означало бы отсутствие возможности существенных размывов вдоль берегов, так как любые возмущения береговой линии вызывали бы разгрузку вдольберегового потока и аккумуляцию. Иначе говоря, приспособление данной реликтовой формы к волновому климату должно было бы обеспечить ее консервацию.

Однако следует учитывать, что в настоящее время из-за истощения запасов обломочного материала поток наносов вдоль полуострова едва ли может быть насыщенный. А это означает, что локальные очаги размыва, обусловленные прямым штормовым воздействием, могут разрастаться, так как поступление наносов из вдольберегового потока ограничено. При постоянном относительном уровне моря и тем более при возможном его повышении пляжи будут постепенно терять материал и деградировать. Для их сохранения необходима периодическая искусственная их подпитка. Эпизодические подсыпки песка улучшают ситуацию на короткое время, но не решают проблемы в долгосрочном плане [23]. В головной части полуострова, где возможны дивергенция и конвергенция потоков наносов, имеющих локальный характер, не исключены очаги размыва и аккумуляции.

Одним из перспективных способов берегозащиты в настоящее время считается строительство искусственных пляжей. Их параметры могут быть рассчитаны, например, на базе модели [22], созданной специально для условий значительных штормовых нагонов. Проблема, однако, заключается в том, что все известные методы расчета транспорта наносов разработаны для терригенных наносов (главным образом, для кварцевого песка), тогда как пляжи Варадеро сложены биогенными осадками, представленными смесью обломков кораллов, раковин и скелетов других морских организмов. Физические свойства подобного материала заметно отличаются от свойств терригенных осадков. Вместе с тем, морфология береговых профилей, сложенных биогенным и терригенным песком, не обнаруживает существенных различий. В частности, в обоих случаях отмечается развитие систем подводных валов со сходными параметрами, а наблюдаемые уклоны пляжей в районе Варадеро того же порядка, что на песчаных берегах Балтийского моря при соответствующих размерах твердых частиц. Поэтому можно допустить аналогию протекающих литодинамических процессов и предположить, что в самом грубом приближении динамика пляжа, сложенного биогенным материалом, может быть описана в рамках традиционных моделей транспорта наносов.

Данные о волновом климате для наших расчетов взяты с сайта <http://wisuki.com/statistics/849/varadero>. Розы волнения для различных градаций значительной высоты волн показаны на рис. 5. Из рисунка видно, что слабые волны высотой до 1 м приходят исключительно с восточной стороны. Умеренное волнение имеет

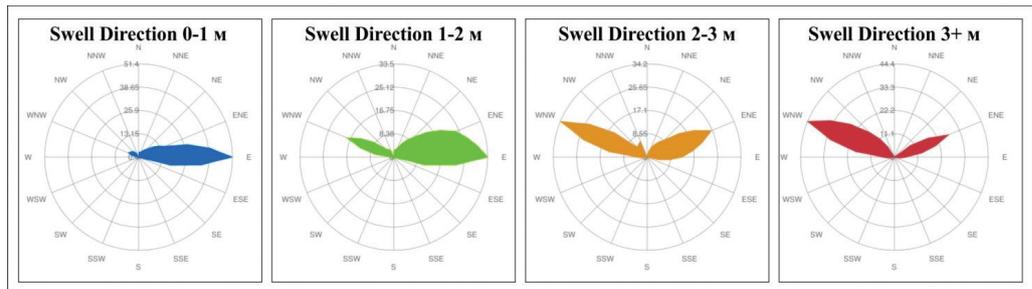


Рис. 5. Розы волнений для различных градаций высоты волн (<http://wisuki.com/statistics/849/varadero>).

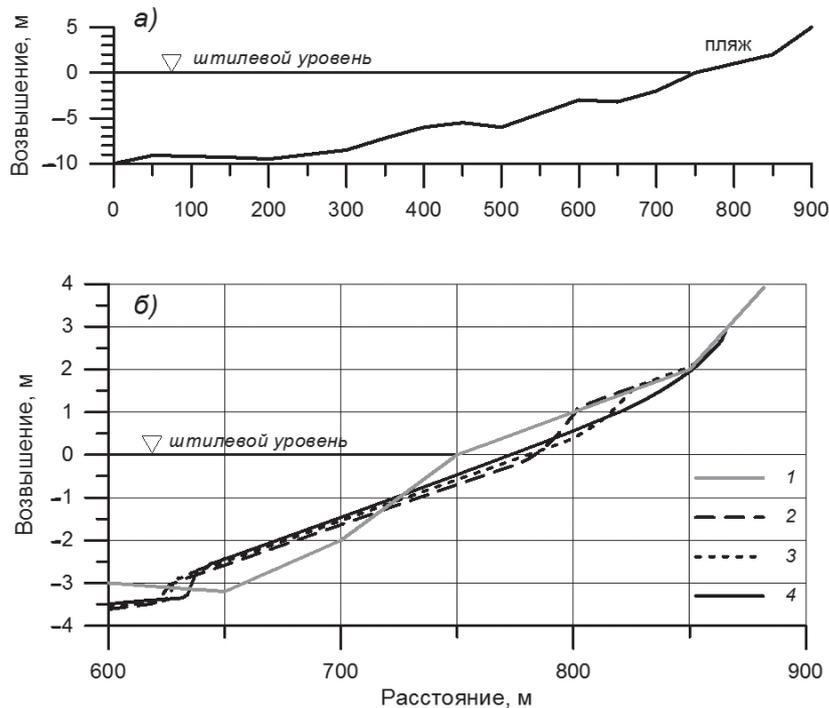


Рис. 6. Типичный профиль берегового склона в районе Варадеро (а) и штормовые деформации пляжа по результатам моделирования (б).

1 — начальный профиль берега, 2, 3 и 4 — постштормовые профили при высоте нагона 1,0; 1,5 и 2,0 м соответственно.

как восточное, так и западное направление. Для наиболее значимых штормовых волн — высотой более 2 м — доминирующим является западо-северо-западное направление.

С учетом высказанных соображений были промоделированы штормовые деформации пляжа Варадеро при экстремальных штормах и нагонах различной высоты. Далее под высотой нагона будем понимать суммарный подъем уровня, обусловленный как собственно штормовым нагоном, так и приливом. Расчеты были выполнены на базе модели CROSS-P [10, 12] для достаточно типичного профиля берега (рис. 6 а), сложенного среднезернистым песком со средним размером 0,3 мм (краткое описание модели дано в приложении). Штормовое воздействие характеризовалось средней высотой волн 3 м, средним периодом 8 с, углом подхода 30° (с учетом положения нормали к берегу по отношению к северо-западным, как наиболее сильным, штормам). Продолжительность воздействия принята равной 6 ч, что достаточно типично для пика шторма, когда его параметры сохраняют максимальные значения.

Полученные результаты представлены на рис. 6 б. Показана прибрежная часть профиля, включающая пляж. Из рисунка видно, его размыв происходит

во всех случаях, причем с увеличением высоты нагона зона размыва расширяется в сторону берега. При нагоне 1 м ее протяженность составляет около 50 м, а при нагоне 2 м увеличивается более чем вдвое. Поверхность пляжа понижается на величину до 0,7 м. В течение шторма с пляжа уносится от 20 до 40 кубометров песка на метр длины берега (объем выноса увеличивается с высотой нагона). Согласно расчетам, умеренные волнения (1,0—1,5 м) при нагонах до 0,5 м не вызывают существенных изменений профиля пляжа. В периоды затиший, как показывают наблюдения, возможно частичное восстановление пляжа, ограниченное, однако, безвозвратными потерями материала, о которых было сказано выше.

Проблему защиты берега предлагается решить с помощью создания искусственного пляжа, характеристики которого оценены на основе модели [22] с учетом упомянутых выше параметров экстремального шторма (см. приложение). Исходные данные для расчетов приведены в левой части табл. 1, где d_g — средний размер песка, \bar{H} и \bar{T} — средняя высота и период волн, η — высота нагона. Профиль пляжа показан на рис. 7.

Основными показателями искусственного пляжа (помимо выдвигения берега X) служат его максимальное возвышение над штилевым уровнем z_m и ширина строительной бермы l_a (см. рис. 7), а также объем используемого материала V на единицу длины берега. Эти показатели отражены в правой части табл. 1. Предполагается выдвинуть берег на расстояние $X = 20$ м, что обеспечит необходимый запас материал даже в случае катастрофического размыва 0,5—0,7 м. Из таблицы видно, что для строительства пляжа длиной 1 км потребуется около 300 тыс. кубометров песка.

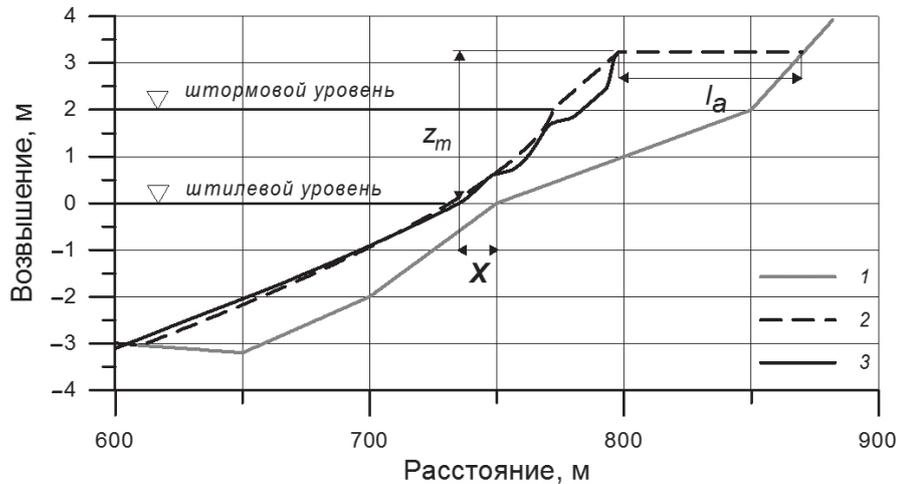


Рис. 7. Профиль искусственного пляжа и его деформации при экстремальном шторме.
1 — естественный профиль, 2 — искусственный профиль (размер песка 0,5 мм),
3 — постштормовой профиль искусственного пляжа.

Для проверки устойчивости искусственного пляжа было проведено моделирование воздействия экстремального шторма с параметрами, указанными в табл. 1 (продолжительность шторма, как и прежде, 6 ч). Постштормовой профиль показан на рис. 7. Из рисунка видно, что размыв в верхней части профиля оказывается значительно меньше, чем при существующем состоянии берега (см. рис. 6). Очевидно, проектный профиль способен выдержать не одну экстремальную штормовую атаку. При иных продолжительности и силе шторма, а также параметрах морских волн процесс моделирования соответственно корректируется введением новых исходных данных.

Таблица 1

Исходные данные для расчетов и параметры профиля искусственного пляжа

d_g , мм	\bar{H} , м	\bar{T} , с	η , м	X , м	z_m , м	l_a , м	V , м ³ /м
0,5	3,0	8,3	2,0	20	3,2	73	288

Вследствие вдольбереговых перемещений наносов объем материала пляжа будет со временем уменьшаться. В соответствии с расчетами Р.Г. Дина [20] относительные потери возрастают с увеличением емкости потока наносов и уменьшаются с увеличением длины пляжа вдоль берега. Основываясь на имеющихся данных по волнению (<http://wisuki.com/statistics/849/varadero>) и используя методику расчетов [10, 11], можно оценить масштаб потока наносов в районе Варадеро значением порядка 50 тыс. м³/год. Тогда оказывается, что при заданных параметрах пляжа даже через 20 лет может сохраниться около половины его первоначального объема. Разумеется, периодическая подсыпка материала поможет продлить срок существования пляжа. Дополнительное возведение специально подобранных и ориентированных в пространстве волногасящих конструкций в полосе деформации штормовых волн непосредственно за обычной для района зоной разрушения штормовых волн ослабит их воздействие, что увеличит устойчивость пляжа.

Для проверки эффективности изложенных рекомендаций предлагается выбрать опытный участок протяженностью 1 км в подверженной размыву части побережья Варадеро и произвести там отсыпку пляжа, основываясь на результатах расчетов. Заметим, что расчеты можно легко повторить для других исходных данных, в частности для иной крупности песка или для иных параметров штормов, если в дальнейшем они будут уточнены.

В заключение следует еще раз подчеркнуть, что параметры берегозащитного пляжа рассчитаны для терригенного среднезернистого песка, тогда как в районе Варадеро имеется в наличии только биогенный материал. Вопрос о том, насколько применимы приведенные рекомендации к подобному материалу, пока остается открытым и требует дальнейшего исследования. Применяемая иногда на практике процедура введения поправочных коэффициентов, например, на гидравлическую крупность соразмерных частиц, плотность, пористость и другие характеристики донных наносов не всегда и не повсеместно оправдана. Поэтому мониторинг пляжа, созданного на опытном участке, мог бы дать весьма ценную информацию, представляющую интерес как в научном, так и в практическом отношении.

Заключение

Проведенные исследования расширяют познание прибрежных геосистем в разных геолого-географических условиях. Их практическая значимость в значительной мере связана с оптимальным решением задач рекреационного направления. На примере района Варадеро рассмотрен вариант появления и развития прибрежной зоны в тропических широтах с учетом ведущих факторов этих процессов. Вследствие небольших размеров полуострова один из компонентов этой зоны — побережье — по сути, распространяется на всю его сушу. Типы и динамика берегов здесь в целом согласуются с новейшей тектонической структурой. Они сформированы преимущественно волновыми процессами, а на отдельных участках являются структурно-денудационными с влиянием морских волн. Наименее устойчивые берега приурочены к тектоническим блокам слабого поднятия, абразионные и абразионно-аккумулятивные участки — к блокам умеренного воздымания. Влияние новейших движений на современную динамику берега выражено также в распределении препятствий, задерживающих или отклоняющих вдольбереговые потоки наносов. Так, к западу и востоку от умеренно воздымающегося мыса Франсез зафиксировано выдвигание берега. Причина этого заключается в том, что восточная оконечность блока создает волновую тень, предопределяющую поворот береговой линии и формирование аккумулятивной формы в виде косы в результате разгрузки локального вдольберегового потока наносов. На юге и в центре полуострова, где потоки наносов, характеризующиеся возвратно-поступательной миграцией небольшого масштаба вдоль береговой линии, имеют меньшую мощность и устойчивость, такие зависимости менее отчетливы. С новейшей тектонической структурой хорошо согласуется изменение ширины участков шельфа. На более широких участках штормовые волны расходуют свою энергию уже на дальних подступах к берегам, что уберегает их от сильного разрушения. Тем не менее новейшая тектоническая структура может и провоцировать разрушение берегов, даже сложенных относительно крепкими породами, как это показано на примере м. Франсез. В качестве практической рекомендации предлагается защитить наиболее уязвимые участки побережья Варадеро с помощью искусственного пляжа, параметры которого могут быть определены на основе предлагаемой оригинальной математической модели.

В ближайшей перспективе морфолитодинамика прибрежной геосистемы п-ова Икакос будет определяться, главным образом, его новейшей тектоникой и кинематикой уровня моря, а по западной окраине еще и запасами песка в прибрежной зоне шельфа. Нет оснований предполагать, что неотектоническая составляющая изменится. Оставляя за рамками дискуссии проблему возможного значительного повышения уровня моря и глобального потепления, считаем, что нет достаточных оснований предполагать заметных изменений этих факторов, по крайней мере, на инженерном масштабе времени. В этих условиях, при сохранении тенденции полуострова к слабому и умеренному поднятию и повышенной флотации пляжеобразующего материала, количество материала будет сокращаться. Поэтому для поддержания пляжей будет необходимо осуществлять грамотную

и своевременную подсыпку песка и предусмотреть мероприятия по гашению энергии штормовых волн на удалении от берега. Последнее подсказано самой природой: застамушенные льды Чукотского моря на глубине воды 10—15 м на расстоянии 3—4 км от уреза предохраняют прибрежную зону шельфа и берега от сильного размыва. Прогноз развития рассматриваемой прибрежной зоны с учетом известных закономерностей эволюции региона в позднечетвертичное время соответствует природному сценарию. Предельный срок предсказуемости предполагает возможные ошибки, которые не должны превышать средних вариаций прогнозируемых величин [17]. Выбранный инженерный масштаб времени соответствует данному постулату.

Результаты исследований могут быть полезны при изучении сходных по ландшафтным условиям территорий с преобладанием рекреационного вида природопользования.

Приложение. Краткое описание моделей

Модель штормовых деформаций CROSS-P

Деформации профиля берега определяются на основе закона сохранения массы в форме

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial q_x}{\partial x}, \quad (1)$$

где h — глубина, t — время, x — расстояние по нормали к берегу, q_x — поперечный объемный расход наносов ($\text{м}^3 \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$). Величина q_x определяется на основе энергетического подхода с учетом характеристик наносов, параметров волн и течений [10, 12]. Принимаются во внимание диссипация энергии за счет донного трения и обрушения волн, а также воздействие на пляж потока волнового заплеска. Уравнение (1) интегрируется с шагом по времени порядка нескольких периодов волн, а шаг по пространству для профилей морских берегов составляет порядка 1 м. Если локальный уклон дна превышает предельное значение, включается имитация обвала склона. Встроен модуль, описывающий деформации берега в условиях перелива через гребень авандюны при экстремальных нагонах.

Модель искусственного пляжа

На рис. П.1 представлена схема искусственного пляжа.

Максимальное возвышение профиля пляжа над штилевым уровнем определяется суммой высот штормового нагона и волнового заплеска ($\eta + R$).

Нижняя точка профиля соответствует глубине замыкания h_* , ограничивающей область штормовых деформаций. Подводный участок протяженностью l_* представлен профилем равновесия Дина: $h = Ax^{2/3}$ [20]. Участок l_R отвечает равновесному уклону пляжа $\beta_R = 0.12 \left(T \sqrt{gd_g} / H_B \right)^{0.5}$, где T и H_B — период и высота

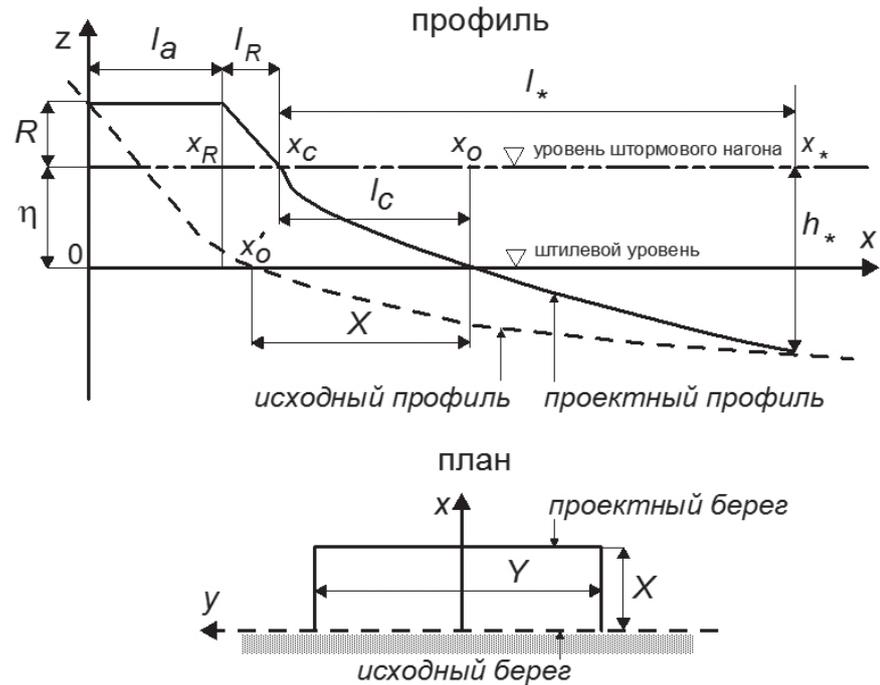


Рис. П.1. Схема искусственного пляжа.

волн на глубине обрушения, d_g — средний размер частиц песка [25]. Участок l_a соответствует ширине строительной бермы, содержащей запас песка.

В плане искусственный пляж выглядит первоначально как прямоугольный выступ береговой линии с поперечным размером X и длиной вдоль берега Y (см. рис. П.1). Со временем очертания берега сглаживаются, а объем пляжа уменьшается за счет выноса песка за его пределы. Относительные потери возрастают с увеличением вдольберегового потока наносов, который может быть уменьшен путем использования для строительства пляжа более крупного материала [20, 22].

При проектировании пляжа рекомендуется исходить из величины X , характеризующей выдвигание берега. Основание профиля при этом может располагаться на глубине, меньшей чем h_* , что, однако, не влияет на его устойчивость, если используется достаточно крупный материал.

Работа выполнена при поддержке темы ГЗАААА-А16-116032810089-5, проектов РФФИ № 16-05-00364, № 15-05-08239 и № 16-55-76002 ЭРА_a

Список литературы

1. Авельо Суарес О., Ионин А.С., Медведев В.С., Невеский Е.Н., Павлидис Ю.А. Геоморфология и история — развития п-ова Икакос (Куба). Сб. ст.: Островные шельфы тропической зоны океана. — М.: изд-во ИОАН СССР, 1975, вып. 1. С. 99—113.

2. Айбулатов Н.А. О терминологии в береговой зоне моря. // Прибрежная зона моря: морфолито-динамика и геоэкология. Труды XXI Международной береговой конференции. — Калининград, 2004. С. 62—65.
3. Гогоберидзе Г.Г. Прибрежная зона: основы понятийного аппарата и принципы геостратегического развития // Проблемы современной экономики. 2008. № 3 (27). С. 384—388.
4. Грачев А.Ф., Калашикова И.В., Магницкий В.А. Современные движения земной коры и сейсмичность // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1990. № 11. С. 3—12.
5. Долотов Ю.С. Динамические обстановки прибрежно-морского рельефообразования и осадконакопления. — М.: Наука, 1989. 269 с.
6. Дунаев Н.Н. Шельф — особая геоструктурная область или затопленная окраина континентов? // В сб.: Проблемы четвертичной истории шельфа. — М.: Наука, 1982. С. 51—58.
7. Дунаев Н.Н., Х. Фойо-Эррера. Геолого-геоморфологическое строение и неотектоника полуострова Икакос и его западного шельфа // Океанология. 1988. Том XXVIII, вып. 4. С. 591—595.
8. Карташов И.П., Черняховский А.Г., Пеньяльвер Л.Л. Антропоген Кубы. — М.: Наука, 1981. 148 с.
9. Костенко Н.П., Макарова Н.В., Корчуганова Н.И. Выражение в рельефе складчатых и разрывных деформаций. Структурно-геоморфологическое дешифрирование аэрофотоснимков, космических снимков и топографических карт. — М.: изд-во МГУ, 1999. 120 с.
10. Леонтьев И.О. Морфодинамические процессы в береговой зоне моря. — Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 251 с.
11. Леонтьев И.О. О расчете вдольберегового транспорта наносов // Океанология. 2014. Т. 54, № 2. С. 226—232.
12. Леонтьев И.О., Рябчук Д.В., Сергеев А.Ю. Моделирование штормовых деформаций песчаного берега (на примере восточной части Финского залива) // Океанология. 2015. Т. 55, № 1. С. 147—158.
13. Лонгинов В.В. Некоторые методические вопросы изучения динамики береговой зоны // Труды ИОАН СССР. 1956. Т. XIX. С. 144—155.
14. Лонгинов В.В. Современные представления о динамике береговой зоны моря // Труды Океанографической комиссии АН СССР. 1962. Т. X, вып. 3. С. 102—112.
15. Медведев В.С., Хуанес Х.Л. Морфолитодинамические исследования в береговой зоне и на шельфе северного побережья Кубы. — континентальные и островные шельфы. Рельеф и осадки. — М.: Наука, 1981. С. 229—251.
16. Меццержаков Ю.А., Синягина М.И. Состояние знаний о современных движениях земной коры. Современные тектонические движения земной коры и методы их изучения. — М.: изд-во АН СССР, 1961. С. 11—40.
17. Морские прогнозы / Отв. редактор В.Ф.Захаров. — Л.: Гидрометеиздат. 319 с.
18. Философов В.П. Основы морфометрического метода поиска локальных структур. — Саратов: изд-во Саратовского ун-та, 1975. 232 с.
19. Хаин В.Е. К теоретическим основам структурно-геоморфологического метода / В.сб.: Структурно-геоморфологические исследования при изучении нефтегазоносных бассейнов. — Л.: Недра, 1967. С. 15—23.
20. Dean R.G. Beach nourishment: theory and practice. — World Scientific Inc. 2002. 399 p.
21. Leont'ev I.O. Modelling erosion of sedimentary coasts in the Western Russian Arctic // Coastal Engineering. 2003. V. 47. P. 413—429.
22. Leont'yev I.O., Akivis T.M. An artificial beach as a means for sea coast protection from storm surges (by the example of the Eastern Gulf of Finland) / Proc. Int. Conf. "Managing risks to coastal regions and communities in changing world" (EMECS'11 — Sea Coasts XXVI). 2017. P.73—81.
23. J.L. Juanes Marti. La Erosión en las playas de Cuba. Alternativas para su control / Tesis de doctorado en Ciencias Geograficas. Universidad de La Habana, Facultad de Geografía. —Habana. 1997. 101 h.
24. Santana J.R.H., González R.R. Varadero Beach, Hicacos Peninsula, Cuba: relief genesis and evolution, and environmental experience linked to its artificial regeneration // Investigaciones Geográfica, Universidad Nacional Autónoma de México. 2002. № 049. P. 43—56.
25. Sunamura T. Sandy beach geomorphology elucidated by laboratory modeling / In: Coastal Modeling: Techniques and Applications / V.C. Lakhani, A.S. Trenhail (eds.). — Amsterdam, Elsevier, 1989. P. 159—213.