

«У нас нет другой цели, как жить в согласии с Природой»
Луций Анней Сенека—мл. 4 г. до н.э.— 65 г. н.э.

СОСТОЯНИЕ И ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ ОТМЕЛОГО ПЕСЧАНОГО БЕРЕГА ПРИЛИВНОГО МОРЯ (НА ПРИМЕРЕ О. МАДАГАСКАР)

©2024 г. Н. Н. Дунаев^{1, *}, И. О. Леонтьев¹, Т. Ю. Репкина^{1, 2}

¹Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

²Институт географии РАН, Москва, Россия

*e-mail: dunaev@ocean.ru

Поступила в редакцию 05.07.2023 г.

После доработки 11.07.2023 г.

Принята к публикации 18.07.2023 г.

В настоящее время большинство морских берегов испытывают усиление размыва и отступление. В значительной мере это относится к берегам, подверженным влиянию высокоамплитудных морских приливов, что крайне негативно проявляется на аккумулятивных берегах океанских островов. Решение проблемы их динамики, теоретические основы которой находятся еще в стадии разработки, может базироваться только на основе широкорегиональных исследований. Данная работа направлена на выяснение особенностей динамики такого берега на примере ключевого района крупного океанского острова. Выявлены основные причины его деградации, даны рекомендации по стабилизации береговой линии и рассмотрена тенденция развития по природному сценарию.

Ключевые слова: береговая зона, песчаные наносы, пляж, литодинамика, неотектоника, геоморфология, уровень моря

DOI: 10.31857/S0030157424020129 **EDN:** RULMCU

ВВЕДЕНИЕ

Многочисленные публикации по аккумулятивным морским берегам разных районов нашей планеты и доклады на тематических региональных и международных конференциях свидетельствуют о том, что в последние десятилетия около 70% из них испытывают усиление размыва и отступление [30]. По данным спутниковых наблюдений 1984–2015 гг., общая поверхность эродированных приморских земель (исключая побережье России) составляет около 28 000 км² [28]. В связи с этим и прогрессирующим продвижением человечества к морю¹ исследование береговой зоны становится в приморских странах приоритетным направлением в изучении океана. В значительной мере это относится к *океаническим островам* с их уникальной природной средой, высокой изменчивостью, контрастностью и экстремальным проявлением природных характеристик. В последние десятилетия происходит активизация освоения таких территорий, особенно их при-

морских районов. Это повышает актуальность решения задачи определения тенденций развития островных геосистем в целом и их береговых зон в частности.

Объект исследований представлен районом Морондава — одним из развитых объектов пляжно-купальной рекреации и активного туризма острова Мадагаскар, расположенного на отмеле аккумулятивном побережье его западной окраины (рис. 1).

Выбор острова Мадагаскар был во многом обусловлен его развитием в относительно стабильных климатических условиях в течение миллионов лет, обусловленных его субэкваториальным расположением.

Это позволяет решить ряд фундаментальных вопросов пространственно-временной организации его ландшафтов, в том числе применительно к береговым геосистемам. Последние различаются по структурно-тектоническому положению,

¹ Согласно сценариям МГЭИК, население прибрежных районов мира может вырасти с 1.2 млрд в 1990 г. до примерно 1.8–5.2 млрд человек к 2080-м гг.

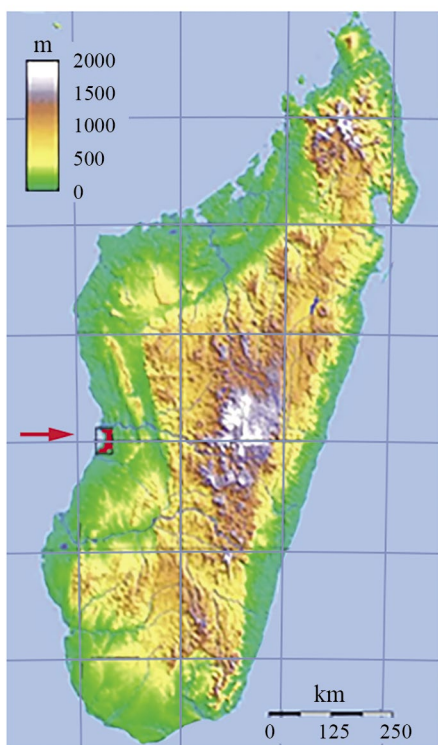


Рис. 1. Обобщенная орографическая карта Мадагаскара и расположение района Морондава [24].



Рис. 2. Пляж в районе Морондава (фото из открытых источников).



Рис. 3. Вид на г. Морондава [34].

литологии, рельефу, специфике влагооборота, локальной атмосферной и морской циркуляции.

Одной из особенностей исследуемого района является подверженность влиянию существенных морских приливов [9]. На отмелях аккумулятивных берегах приливно-отливные процессы обычно являются одним из важнейших факторов в динамике береговой линии и прибрежно-морских наносов, потенциально предопределяя постепенное наращивание суши [2]. Однако эта тенденция осуществляется лишь при достаточном количестве наносов на соответствующем подводном береговом склоне. Периодические колебания уровня приливного моря и приливно-отливные течения приводят к формированию иного по сравнению с бесприливными условиями профиля равновесия наносов на подводном береговом склоне, который непрерывно смещается, перестраивая профиль склона и предопределяя перемещение зон транзита береговых наносов, соответственно меняя положение береговой линии [11].

В районе Морондава на протяжении более 100 лет регистрируется отступление берега, представленного в настоящее время широким (до 200 м) песчаным пляжем (рис. 2).

Строительство здесь волноломов и бун, начавшееся со середины XX в., лишь на короткое время задержали морскую эрозию, или деррубию (исп. *degrubio* — подмыв, размывание) сопредельной суши [35]. Без должного эффекта оказалось укрепление некоторых участков берега защитными стенками с применением габионных конструкций. Поэтому неоднократно обсуждался вопрос о переносе вглубь суши расположенного по границе с пляжем г. Морондава с населением около 40 тыс. (рис. 3), но решение откладывалось в связи с неоднозначным прогнозом развития берега.

Город возник в пределах дельты одноименной реки на месте небольшого рыбацкого поселения, которое стало разрастаться в связи с привлекательностью его окрестностей, развитием пляжно-купального отдыха и организацией туризма. На сегодняшний день, насколько нам известно, не существует какой-либо научной работы о перспективах развития района или обоснованных предложений по оптимизации управления его прибрежной зоной.

Авторы на основе анализа геолого-геоморфологических и неотектонических условий района, особенностей его палеогеографии в позднем неоплейстоцене—голоцене, гидрологического режима сопредельной акватории, принятой концепции о современной кинематике морского уровня и применения оригинальных методических приемов по изучению морфолитодинамики береговой зоны предлагают свое видение развития исследуемого района по природному сценарию.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДУЕМОГО РАЙОНА

Геолого-геоморфологическая обстановка.

Остров Мадагаскар образовался как фрагмент Африкано-Аравийской платформы суперконтинента Гондвана вследствие его распада [19, 31]. Он отделился в результате рифтогенеза и заложения в верхнем карбоне—перми [14], либо в раннем [23, 29] или позднем [34] лейасе Мозамбикского пролива, сопровождавшимися разломами по обоим его сторонам. Осадочный чехол пролива в основании геологического разреза представлен континентальными терригенными образованиями предположительно ледникового генезиса, а выше прослеживаются терригенно-морские песчано-глинистые толщи, перекрытые терригенно-карбонатными и терригенными слоями. Современная структура пролива и его обрамления сформировались в неотектонический период, наступивший в регионе в позднем палеогене [1]. Исследуемый район соответствует средней части Морондавского осадочного бассейна (рис. 4), выполненного отложениями верхнего карбона—кайнозоя мощностью до 6–9 км [10, 38].

Верхний карбон представлен континентальными образованиями предположительно ледникового генезиса (*формация карру*), залегающими на блоковой структуре докембрийского кристаллического фундамента, сформированного преимущественно парагнейсами. Выше прослеживаются отложения верхнего палеозоя—кайнозоя



Рис. 4. Бассейн Морондава — по [27] упрощенно.

в виде терригенно-морских песчано-глинистых толщ, перекрытых морскими терригенно-карбонатными и терригенными слоями. К предрифтовым отложениям сторонники мезозойского возраста рифтогенеза относят речные песчаники позднего триаса.

Прибрежная полоса суши представлена постмиоценовой слабо наклоненной к морю ступенчатой равниной шириной 30–60 км и высотой до 400 м с чехлом четвертичных, преимущественно аллювиальных, а также аллювиально-морских и морских осадков. В ее мористой зоне доминируют регрессивные аллювиально-морские и морские преимущественно песчаные отложения с примесью глинистой фракции. Равнина густо расчленена речной сетью, берущей начало с горной части соответствующих неотектонических доменов [9, 17, 20, 36].

Постмиоценовая равнина абразионным уступом высотой около 10 м отделена от расположенной мористее *низкой приморской* аллювиально-морской равнины преимущественной высотой 2–3 м, сформированной на древней дельте р. Морондава. В отдельных местах встречаются возвышенные (до 6–8 м над уровнем моря) участки, акцентируя микронеровности предшествующего субаэрального рельефа. Развитый в ее пределах аккумулятивный чехол в целом сложен регрессивной песчано-глинистой толщей, литологический состав которой меняется от места к месту. Мощность перекрывающих ее голоценовых отложений постепенно возрастает вследствие привноса приливами тонкой вещественной фракции, образуя трансгрессивную составляющую приповерхностного геологического разреза.

Климат. Известно, что климатический фактор играет существенную роль в динамике морских берегов. Особенно заметно это проявляется при его сезонной цикличности, ярко выраженной в исследуемом районе, где он представлен субэкваториальным семиаридным муссонным типом, когда относительно сухой зимний сезон с апреля по ноябрь сменяется влажным летом с декабря по март под влиянием северо-западных муссонов [32, 37, 40]. Сухость зимнего времени обусловлена тем, что юго-восточные пассаты со стороны Индийского океана задерживаются горами, протянувшимися через весь остров с севера на юг. В этот период заметно сокращается поступление в береговую зону терригенного материала и происходит усиление размыва берега под воздействием моря. На рассматриваемой территории преобладают ветры ЮЗ и СЗ направлений.

Проявление неотектонического этапа на Мадагаскаре. Новейшая тектоника и, прежде всего, неотектоническая структура являются индикатором пространственно-временной организации тер-

риторий и наиболее долговременным фактором в развитии береговой зоны моря. Создав современный структурный каркас приповерхностных горизонтов литосферы и основные черты рельефа, она оказывает существенное влияние на экзогенез БЗМ, контролируя литодинамические процессы, где ослабляя, а где усиливая роль кинематики уровня Мирового океана [3].

Начавшийся в олигоцене неотектонический этап развития Мадагаскара проявился в активизации его поднятия при широком проявлении дифференцированной блоковой тектоники [1, 21], в то время как в предшествующий эоценовый период он представлял собой относительно плоский остров небольшой высоты, окруженный широкими карбонатными платформами со слабо расчлененным рельефом [20]. В конце среднего и позднего миоцена, особенно в последние 10 млн лет, произошел пароксизм поднятия и деформаций, сопровождавшийся наклоном западной окраины острова, где расположен район Морондава, увеличением в этом направлении терригенных отложений и формированием четырех поверхностей выравнивания, отражающих неравномерную интенсивность деформаций. Величина поднятия отдельных территорий может быть оценена на основе современной высоты сохранившихся в них морских палеоцен—эоценовых отложений за вычетом высоты предшествующего уровня моря [20]. В результате поднятия резко усилились карстовые и эрозионные процессы, создавшие густо расчлененный рельеф с амплитудами в десятки — первые сотни метров. Оригинальные формы карстового рельефа — *цинжи* (малагас. *tsingu* — цепь, “там, где нельзя ходить босиком”) с глубиной расчленения исходной карбонатной поверхности, местами превышающей 70 м [39], образуют каменные леса (рис. 5).



Рис. 5. Каменный лес Мадагаскара (фото из открытых источников).

Кинематика уровня моря. В настоящее время среди исследователей нет единого представления об особенностях послеледниковой трансгрессии уровня моря, особенно за последние 5–6 тыс. лет, как по отношению к Мировому океану в целом, так и к отдельным его регионам в частности. Так, например, одни исследователи утверждают, что уровень моря в середине этого периода превышал современный на несколько метров, другие полагают, что он либо достиг современных отметок к этому времени, а потом лишь колебался в незначительных пределах, либо асимптотически приближался к современному. Нет единства в представлениях и о современной долгосрочной его кинематике, особенно в связи с дискуссией о проблеме глобального потепления климата. Тем не менее принятие той или иной концепции кинематики уровня Мирового океана за период последних нескольких тысячелетий определяет понимание тенденций развития зоны взаимодействия моря и суши и отражается на оценках перспектив освоения приморских территорий в виде разного рода строительства, организации курортных зон, туризма и др. Изучение характера постледниковой трансгрессии в западном регионе Индийского океана, в том числе и в районе о. Мадагаскар показало, что уровень моря сколько-либо заметно не превышал современный [26 и др.]. По данным ряда исследователей, он приблизился к современному 3–2.5 тыс. л. н. и стабилизировался, испытывая лишь небольшие сезонные и погодно-синоптические колебания в пределах первых десятков сантиметров [18]. Наши исследования в других регионах [22] согласуются с этими выводами и дают основание предполагать, что, по крайней мере, в XXI в. кинематика уровня моря существенно не изменится.

Береговая зона. Берег Морондава относится к аккумулятивному размывающемуся типу. Непосредственно к урезу воды подходит песчаный пляж, сложенный от места к месту в разных пропорциях терригенным литогенным и карбонатным морским (ракушечный детрит и рифогенный материал) песком преобладающей размерности 0.20–0.25 мм. При этом в целом терригенная составляющая доминирует вследствие ее большего поступления в акваторию и повышенной истираемости морского органогенного материала по сравнению с терригенным. Сопредельный подводный береговой склон — аккумулятивный с осредненным уклоном до 10-метровой изобаты 0.0045, а средний уклон пляжа близок к 0.05. Морской берег, низкая равнина и подводный береговой склон подвергаются воздействию морских приливов и отливов, которые являются регулярными полусуточными с отливами в полдень и полночь. Высота прилива, определяемая разностью отметок уровня высокой и низкой воды (рис. 6), характеризуется следующими значениями

ми: средний прилив — 2.55 м, сизигийный прилив — 3.65 м, экстремальный прилив — 4.75 м при средней скорости приливов 43 км/час [25, 33].

При таких приливах низкая равнина затопляется вплоть до ее тылового шва, расположенного у подножия упомянутого уступа. Приливы сопровождаются течениями, которые в южном полушарии согласно силе Кориолиса отклоняются влево от динамической оси потока. В районе Морондава их вектор направлен на север. Действие прилива обычно не нарушает характер протекающих морфодинамических процессов, определяемых волнением. Доказательством служит наличие систем подводных валов с примерно одинаковыми свойствами, наблюдаемыми в условиях как высоких, так и низких приливов [7].

Волновой климат района характеризуется доминированием волн зыби, приходящей с ЮЗ румба и в меньшей степени с СЗ направления. Высота волн чаще всего в пределах 2 м, но в течение нескольких дней в году может превышать 3 м. Период зыби обычно не менее 14 с [33]. При этом, что гравитационные волны играют подчиненную роль в динамике берега с приливными берегами, их действие обуславливает развитие мощных вдольбереговых потоков наносов, в основном в северо-восточном направлении, характеризующихся величиной порядка 500 тыс. м³/год [35]. При этом волны ЮЗ направления распространяются под значительным углом к береговой нормали и относятся к категории так называемых «волн больших углов» (high-angle waves). Подобные волны провоцируют неустойчивость контура берега и развитие ритмических форм рельефа типа песчаных волн или кос [16]. Действительно, серии песчаных кос наблюдаются на космических снимках берега севернее г. Морондава (рис. 7).

На динамику берега значительное влияние оказывают тропические циклоны, сопровождающиеся штормовыми нагонами и штормовыми

волнениями. В сочетании с приливами такие циклоны приводят к затоплению низкой террасы, располагающейся за береговым валом. В районе г. Морондава это приводит к катастрофическим последствиям. Помимо собственно затопления происходит размыв пляжа и берегового вала, что приводит к постепенному отступлению береговой линии в сторону суши со скоростью до нескольких метров в год [33, 35]. При этом на прилегающих территориях побережья негативных процессов не наблюдается.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Строение берегов района Морондава и их динамика изучены по топографическим картам масштаба 1 : 200000 (состояние местности на 1981 г.) и космическим снимкам (КС) Landsat ETM + съемки 2000–2001 гг. (разрешение 15 м). Детали строения берегов уточнены по КС QuickBird (разрешение 0.7–2.9 м, состояние местности на 2013 г.), содержащимся в интернет-ресурсе Google Earth. При дешифрировании КС учитывалось фаза приливно-отливных колебаний (расчетные данные программы WXTide32).

Для иллюстрации тенденций развития берега в районе г. Морондава было проведено моделирование совместного воздействия волн, прилива и штормового нагона на профиль пляжа с помощью модели CROSS-PB [8].

Картографическая модель новейшей тектоники района и сопредельных прибрежных территорий построена по структурному принципу как в наибольшей мере отвечающему поставленной задаче. Для этого был применен структурно-геоморфологический анализ гипсометрических карт суши и сопредельного шельфа среднего масштаба с учетом особенностей геологического строения и использованием успешно опробированной на практике методики [5, 12, 13]. Теоретической

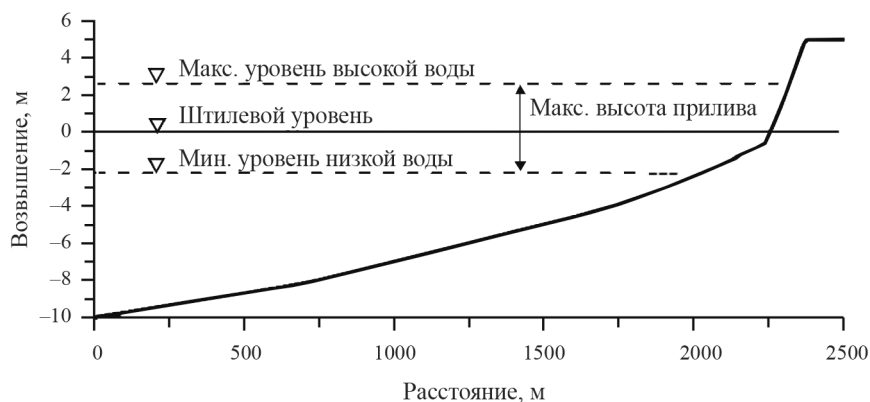


Рис. 6. Береговой профиль и диапазон приливных колебаний уровня.

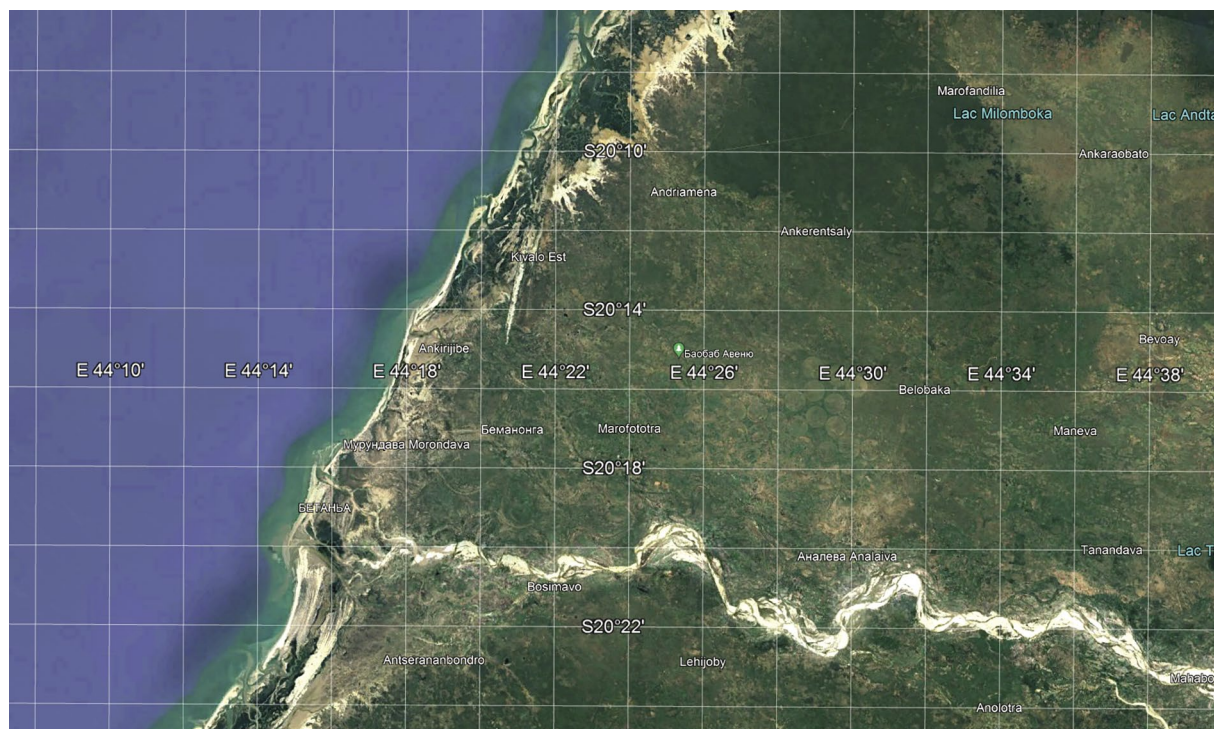


Рис. 7. Направление потока береговых наносов в районе Морондава (Google Earth Pro, 5. 1. 2022).

основой анализа является ключевое положение геоморфологии о формировании рельефа Земли в результате взаимодействия эдогенных и экзогенных процессов при ведущей роли тектонических движений. Такой методический подход позволяет изучать закономерные связи форм современного рельефа и экзодинамики земной поверхности с геологическими особенностями и глубинным строением земной коры, выявить их тектономорфные свойства и компоненты, обусловленные новейшими тектоническими движениями. Эти связи подчеркиваются, в частности, широко распространенной унаследованностью структурных форм и приспособлением экзогенных литодинамических процессов к геологическим неоднородностям субстрата, акцентируя морфологические аспекты земной поверхности в условиях различного проявления неотектоники. В ряду тектонических деформаций особое внимание уделяется картированию линеаментов, отражающих дизъюнктивные дислокации. Наиболее важными по информативности морфометрическими показателями как направленности, так и интенсивности новейших движений в пределах отдельных структурных форм является анализ общего поля высот и глубины расчленения рельефа.

Полученные данные позволяют выявить различно выраженные в рельефе деформации земной коры, как объемно-площадные, так и линейные, образовавшиеся и развивающиеся на неотектони-

ческом этапе существования острова, в том числе структурные формы, прослеживающиеся в береговую зону не только с суши, но и со стороны акватории. Результат этого анализа дополняется выводами, полученными при дешифрировании современных космоснимков среднего уровня пространственного разрешения семейства Landsat 8 (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), космоснимками высокого и сверхвысокого разрешения с интернет-ресурсов Google Earth (<https://earth.google.com/web/>) и Bing (<https://www.bing.com/maps>). Активность разрывных нарушений определяется по комплексу орографических признаков: деформациям зоны плоскостной денудации, перекосам долин, разделяющих блоки, различиям высот блоков, сложенных породами примерно близкой устойчивости к денудации, или разному их наклону, резкому изменению крутизны склонов и др. Принималось, что речные долины с симметричными бортами соответствуют более древним неразвивающимся на неотектоническом этапе разломам.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На западном побережье о. Мадагаскар орографически выраженные в современном рельефе тектонические деформации представлены блоково-разрывной структурой, созданной вертикальными разломами разного ранга, среди которых доминируют северо-западные направления (рис. 8).

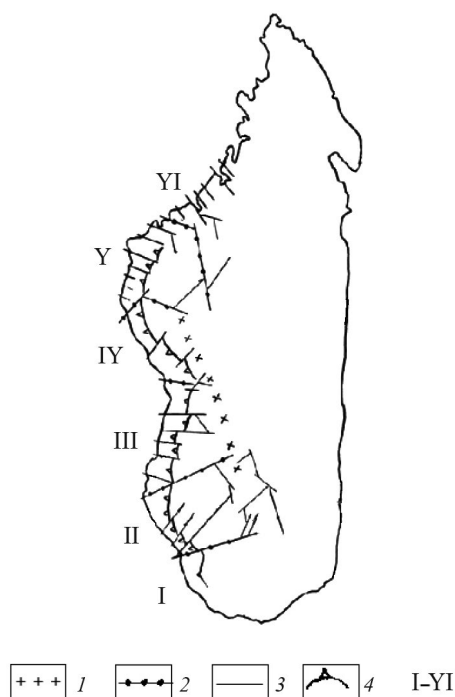


Рис. 8. Новейшая тектоническая структура западной окраины Мадагаскара (составил Н.Н. Дунаев): 1–3 — разрывные нарушения первого — третьего ранга, 4 — граница слабых конэрозивных приморских поднятий; I–VI — неотектонические домены

Менее распространены северо-восточные и субширотные простирания. Примечательно, что указанные направления дизъюнктивных нарушений не рассеяны по площади, а концентрируются на соответствующих им территориях, образуя неотектонические домены, разделенные разломами второго ранга.

Разломы третьего ранга разграничивают блоки с разной высотой или изменением их наклонов. Разлом первого ранга — один из наиболее выразительных на острове, отделяющий западные предгорья центрального горстообразного поднятия, прослеживающегося через Мадагаскар с севера на юг. Резкие, необъяснимые литологическими причинами сужения и расширения современных речных долин, изменения характера их вреза, общего строения и деформации поверхности, расщепление и появление ступенчатых уступов речных террас свидетельствуют о том, что на побережье района происходят современные тектонические движения.

Исследуемый район находится в пределах относительно опущенного блока неотектонического домена III, которому соответствует наиболее низменный сегмент западного побережья. Прослеживающиеся к берегу разломы предопределяют направление речной сети, которая обеспе-

чивает поступление в береговую зону участка Морондава аллювиального материала. Глубину осложняющих домен тектонических разломов можно определить по методике И.С. Шермана [15], согласно которой они в целом характеризуются коровым заложением. Следует отметить, что низменный равнинный рельеф не свидетельствует о тектоническом покое территории, поскольку возможна полная компенсация поднятия денудацией, а опускания — аккумуляцией. Обнаруженные в этом районе многочисленные разрывные нарушения позволяют предположить, что район подвергся значительным тектоническим нагрузкам. Влияние неотектоники на динамику береговой зоны прослеживается с момента ее становления, определяемого относительной стабилизацией уровня моря и внешней границы. В исследуемом районе этот период начался 3.5 т. л. н.

Проведенные исследования позволили подразделить морской берег района Морондава на генетически разнородные участки и определить, что его современная динамика, определяемая сочетанием ветро-волновой нагрузки, высоких приливов и режима поступления аллювиального материала, характеризуется значительными изменениями контура берега по нормали и латерали (рис. 9).

Приливный фактор в динамике береговой зоны более значим по сравнению с ветро-волновым, так как, в отличие от последнего, действует постоянно, и к тому же установлено, что морские волны доминируют при высоте приливов не более 2 м.

Согласно результатам моделирования, выполненного при допущении однородности осадков на профиле (рис. 10), в случае умеренной зыби изменений пляжа практически не происходит (рис. 10а). Иначе говоря, профиль пляжа находится в равновесии с доминирующим волновым режимом. Условия прохождения тропического циклона, когда развивается штормовое волнение и возникает нагон, накладывающийся на прилив, имитирует рис. 10б. При таком варианте отмечается размыв пляжа вблизи максимальных отметок уровня и аккумуляция смытого материала в нижней части пляжа. Штормовое воздействие на пониженный участок берегового вала, когда при высокой воде возможен перелив воды через его гребень, отражает рис. 10в, где показаны изменения профиля вала после прохождения двух последовательных тропических циклонов.

В результате высота вала уменьшается, его вершина смещается в сторону суши, а смытый материал перемещается как на фронтальный, так и на тыловой склоны вала.

Судя по результатам расчетов, размыву подвержена, главным образом, верхняя часть

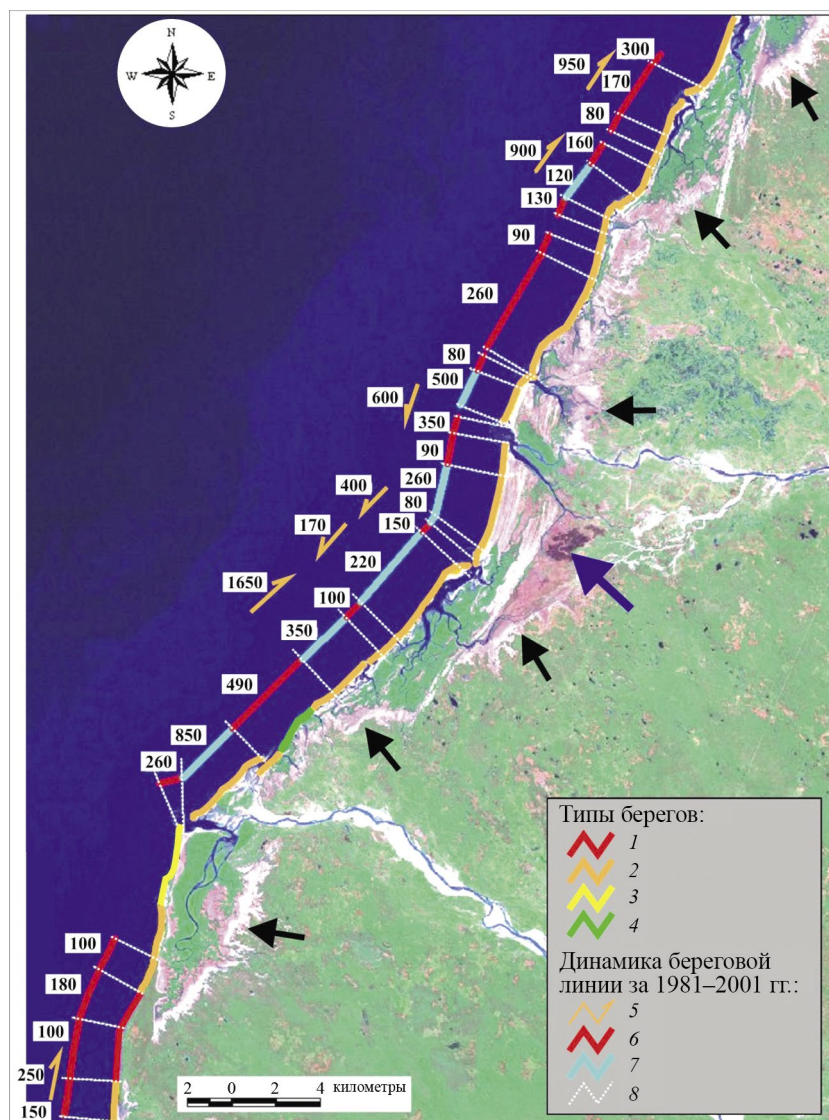


Рис. 9. Типы береговых участков и динамика береговой линии района Морондава (составила Т.Ю. Репкина). Типы берегов: 1 — аккумулятивно-абразионные, выработанные в песчаных отложениях морских террас; аккумулятивные: 2 — лагунные, 3 — лагунные, бронированные коралловой платформой, 4 — дельтовые. Динамика береговой линии за 1981–2001 гг. (цифры — максимальная величина смещения на участке, м): 5 — смещение вдоль берега, 6 — отступление, 7 — выдвигание; 8 — границы участков. Черными стрелками показано положение уступа, отделяющего приморскую аллювиально-морскую равнину от аллювиальных равнин, синей стрелкой — подтопленный участок дельты р. Морондава.

пляжа и берегового вала. Учитывая, что реально в теле берегового вала и пляжа значительную долю составляют мелкие частицы, легко подверженные безвозвратному выносу за пределы береговой зоны, каждый очередной циклон может приводить к понижению берегового вала в целом и отступанию береговой линии. Следует также принять во внимание вынос отложенного у берега материала на подводный склон и вдоль уреза воды вследствие периодических и неволновых течений, связанных с трансформацией энергии ветровых волн, нагонами, приливами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные литодинамические процессы в береговой зоне района Морондава представлены размывом, перемещением и меняющейся от места к месту кратковременной аккумуляцией наносов. Размыв берега и наводнения в г. Морондава определяются комплексом естественных и антропогенных факторов: отмеченное выше неотектоническое положение района, прекращение функционирования одного из важных рукавов в дельте реки Морондавы, изъятие песка с пляжа

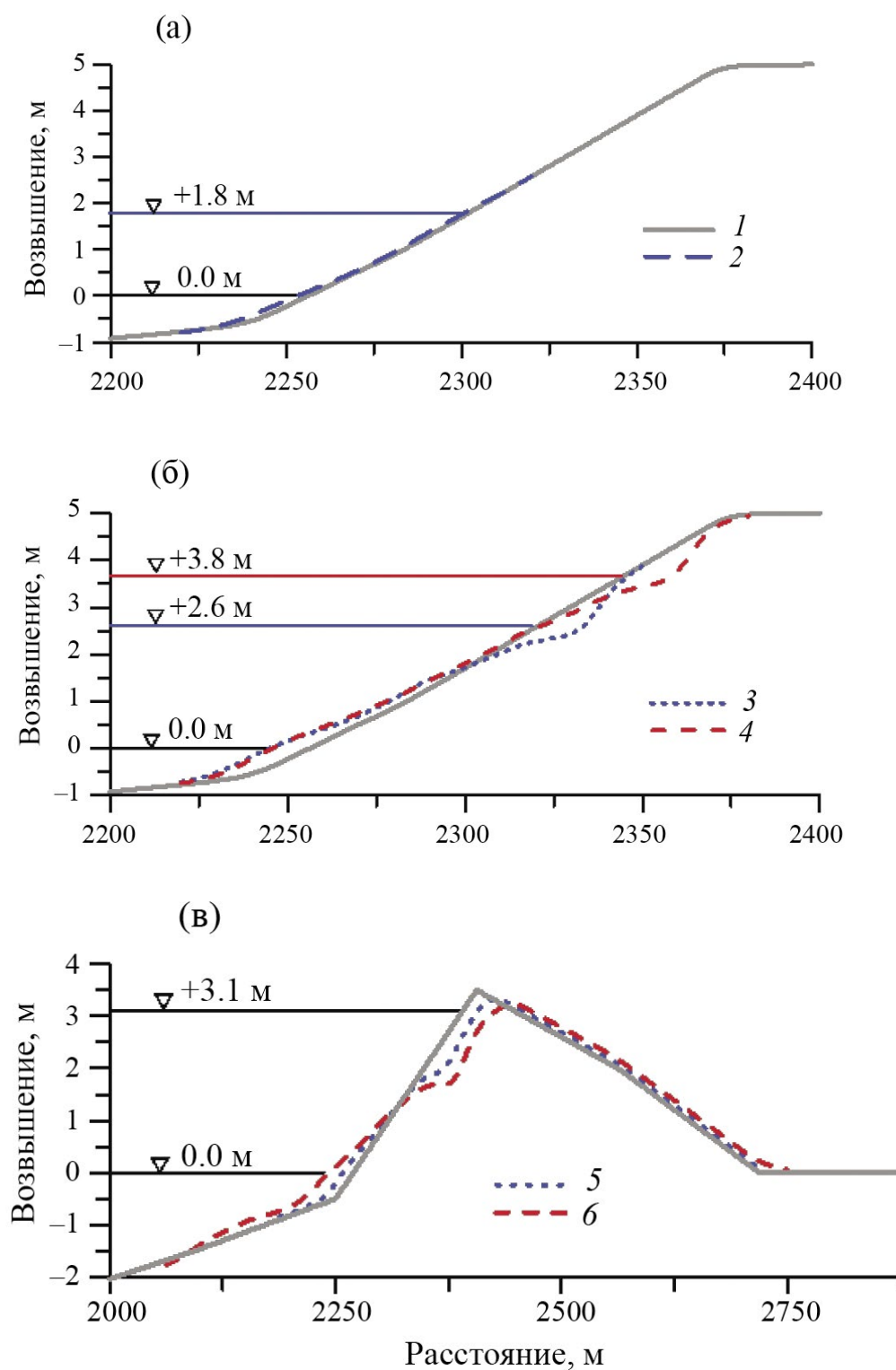


Рис. 10. Моделирование изменений профиля берега при воздействии волнения, прилива и нагона. Продолжительность воздействия 24 ч, направление волн относительно береговой нормали 40° (составил И.О. Леонтьев). (а) – умеренная зыбь (значительная высота 2 м, период пика спектра 14 с) на фоне сизигийного прилива (максимальный уровень +1.8 м): 1 и 2 – исходный и финальный профили; (б) – штормовое волнение (высота 4 м, период 10 с) на фоне прилива и нагона 0.8 м: 3 и 4 – финальные профили в случаях сизигийного и экстремального приливов (соответствующие максимальные уровни +2.6 и +3.8 м); (в) – воздействие штормового волнения на фоне прилива и нагона на пониженный участок берегового вала: 5 и 6 – финальные профили после прохождения одного и двух последовательных штормов (максимальный уровень +3.1 м).

при строительстве города и разные формы механического повреждения пляжа, приводящие к измелчению песка и, как следствие, выносу его ветром и морем, зарегулированный сток одноименной реки в районе г. Дабара и недостаточно обоснованная система удерживающих конструкций, которые могли бы задерживать дерубцию берега и ограничивать вынос пляжеобразующего материала в северном направлении. Помимо этого, был существенно расширен судоходный канал к порту, расположенному в тыловой части города, вследствие чего уровень грунтовых вод повысился и территория города, расположенная между морем и каналом, стала испытывать оседание. Негативную роль играет и то обстоятельство, что расположенный в тыловой части пляжа береговой вал, за которым располагается низкая терраса, сложен материалом, в составе которого значительную долю составляют мелкие частицы, которые легко выносятся из береговой зоны, а не сохраняются на пляже, поддерживая его устойчивость [35]. В условиях значительных приливных колебаний уровня моря применяемая в районе защита открытого песчаного берега буннами едва ли может быть успешной. Строительство стенок, габионных конструкций способно дать кратковременный положительный эффект, но уже в ближайшем от их возведения времени они, как правило, становятся главной причиной деградации и исчезновения пляжей.

Согласно природному сценарию, развитие аккумулятивного берега стремится к выравниванию по нормали к направлению морского волнового воздействия. Но реально в пределе, как правило, формируется плавная синусоида береговой линии вследствие локальных условий. Поэтому ее переменная от места к месту фрагментарная неустойчивость неизбежно будет сохраняться, но при достаточных запасах песка не нарушит общий фон пляжа. Для района Морондава можно констатировать, что в настоящее время отмечается тенденция к срезанию берега, как и сопредельных дельт выдвижения, перераспределению наносов в пространствах между ними и по направлению к дистальным кос-баров, формирующихся вдольбереговыми потоками наносов (рис. 7). Это ведет к выравниванию береговой линии при общем ее отступлении и приближении берега к стадии зрелости с существенным сокращением ширины пляжа. В настоящее время пляж после *некоторых* штормов возвращается к исходному состоянию вследствие того, что не происходит необратимых изменений в балансе береговых наносов. Такая ситуация создает иллюзию перспективной устойчивости берега Морондавы.

От катастрофического размыва берега Морондавы пока спасает значительный запас песчаного ундальювиального материала. Но его количе-

ство снижается в связи с истиранием и выносом из приурезовой зоны, уменьшением поступления вследствие сокращения запасов песка на подводном береговом склоне в результате его предшествующего многолетнего выноса к берегу морскими волнами и при относительных понижениях уровня моря в фазы отлива, в результате истощения кор выветривания сопредельной суши, активно дренируемых на протяжении неотектонического этапа, зарегулированным стоком одноименной реки в районе г. Дабара, неэффективной системы удерживающих песок береговых сооружений, а также вследствие реконструкции упомянутого судоходного канала. Развитие мангровых зарослей при водотоках приурезовой зоны и продвижение их в море южнее исследуемого района тоже сокращает поступление береговых наносов с этого направления.

Теоретические основы гидродинамики береговых зон приливных морей в целом, как и учет региональных условий, находятся еще в стадии разработки. Поэтому задача защиты берега и уточнения прогноза его развития в районе г. Морондава требует дальнейших натурных исследований. В их числе необходимо определить ширину зоны вдольберегового потока наносов, запасы пляжеобразующего материала на подводном береговом склоне и бюджет береговых наносов в целом [6], изучить проблему региональной трансформации ветровых (гравитационных) волн в другие формы прибрежной циркуляции, промоделировать варианты берегозащитных сооружений, устранить дальнейшее антропогенное воздействие, подобрать вегетативные формы защиты пляжа. Также будут весьма полезны рекомендации отечественных специалистов по Правилам проектирования инженерной защиты берегов приливных морей [4]. Ориентироваться только на искусственную подпитку пляжа будет экономически дорого и в перспективе малоэффективно, а продолжение строительства каменных бун в условиях высокоприливных берегов района Морондава может быть вредным.

Источники финансирования. Работа выполнена в соответствии с темами госзадания ИО РАН FMWE-2021-0004, ГЗ ИГ РАН FMGE-2019-0005 (геоморфологические исследования) и при поддержке РФФИ (грант 13-05-00589).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Божко Н.А., Брянцева Г.В. Морфоструктуры Мадагаскара и их взаимоотношение с геологическим строением // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2016. № 4. С. 15–22.
2. Долотов Ю.С. Процессы рельефообразования и осадконакопления на приливных побережьях Мирового океана. М.: Научный мир, 2010. 180 с.

3. Дунаев Н.Н. Новейшая тектоника как важнейший компонент морфосистемы морской береговой зоны // Учение о развитии морских берегов: вековые традиции и идеи современности: Материалы XXIII Междунар. береговой конфер. в честь столетия со дня рождения профессора В.П. Зенковича. СПб, 2010. С. 203–204.
4. Инженерная защита берегов приливных морей. Правила проектирования. М.: Мин-во строительства и ИКХ РФ. 2017. 44 с.
5. Костенко Н.П., Макарова Н.В., Корчуганова Н.И. Выражение в рельефе складчатых и разрывных деформаций. М.: МГУ, 1999. 120 с.
6. Леонтьев И.О. Бюджет наносов и прогноз развития берега // Океанология. 2008. Т. 48. № 3. С. 467–476.
7. Леонтьев И.О. Подводные валы на песчаных берегах // Океанология. 2011. Т. 51. № 1. С. 146–152.
8. Леонтьев И.О. Динамика берегового профиля с подводными валами в масштабе штормового цикла // Океанология. 2020. Т. 60. № 5. С. 805–813.
9. Мадагаскар. М.: Прогресс, 1990. 294 с.
10. Махедарисон В.Р. Геологическое строение и перспективы нефтегазоносности впадины Мурундава (остров Мадагаскар). Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук: 04.00.17. Баку: АЗИНЕФТЕХИМ, 1990. 20 с.
11. Медведев В.С. Особенности морфо- и литодинамики береговой зоны приливного моря // XXIII Международный Географический конгресс. Симпозиум “Динамика морских берегов”. Тез. докл. Тбилиси: Мецниерба, 1976. С. 85–87.
12. Никифоров Л.Г. Морфоструктурный анализ морских побережий. М.: МГУ, 1975. 175 с.
13. Применение геоморфологических методов в структурно-геологических исследованиях / И.П. Герасимов (ред.). М.: Недра, 1970. 296 с.
14. Хаин В.Е., Лимонов А.Ф. Региональная геотектоника (тектоника континентов и океанов): Тверь: ООО “ГЕРС”, 2004. 270 с.
15. Шерман С.И. Тектонофизические параметры разломов литосферы, избранные методы изучения и примеры использования // Современная тектонофизика. Методы и результаты. Материалы первой молодежной школы семинара. М.: ИФЗ, 2009. С. 302–318.
16. Ashton A.D., Murray A.B. High-angle wave instability and emergent shoreline shapes: 1. Modeling of sand waves, flying spits and capes // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. P. F04012.
17. Battistini R., Hoerner J.M. *Géographie de Madagascar*. Paris: SEDES, 1986. 187 p.
18. Camoin G.F., Montaggioni L.F., Braithwaite C.J.R. Late Glacial to Post Glacial Sea-Levels in the Western Indian Ocean // Marine Geology. 2004. V. 206. P. 119–146.
19. Collins A.S. The Tectonic Evolution of Madagascar: Its Place in the East African Orogen // Gondwana Research. 2000. V. 3. № 4. P. 549–552.
20. Delaunay A.D., Robin C., Guillocheau F. et al. Mid to Late Miocene Uplift and Doming of Madagascar: Constraints from Topography, Cenozoic Stratigraphy and Paleogeography // Conference: Third EAGE Eastern Africa Petroleum Geoscience Forum. Mozambique, Maputo: 7–9 November, 2017. P. 1–2.
21. Delaunay A. Les mouvements verticaux de Madagascar (90–0 Ma): Une analyse couple des formes du relief et de l’enregistrements dimementaire des marges oust malgaches. Ph.D. thesis, University de Rennes 1, 2018.
22. Dunaev N., Repkina T. Accumulative coasts as reliable indicators of the kinematics of the sea level during the Holocene // Proceedings of International Conference “Managing risks to coastal regions and communities in a changing world” (EMECS’11 – SeaCoasts XXVI). St. Petersburg: RGGU, 2017. P. 161–171.
23. Geiger M., Clark D.N., Mette W. Reappraisal of the Timing of the Breakup of Gondwana Based on Sedimentological and Seismic Evidence from the Morondava Basin, Madagascar // Journal of African Earth Sciences. 2004. V. 38. № 4. P. 363–381.
24. <https://ru.maps-madagascar.com/Мадагаскар-карты-высот, посещение 10.06.2023>.
25. <https://www.findtide.com > 1191.html>; Morondava Tide table - FINDTIDE.com
26. Kaplin P., Pirazzoli P.A., Pavlidis Y., Badenkov Y. Sea-level and environmental changes in shelf areas of the western Indian Ocean // J. Coastal Res. 1986. V. 2. № 3. P. 363–367.
27. Lawver D.R., Rasoamiamanana A.H., Werneburg I. An occurrence of fossil eggs from the mesozoic of Madagascar and adetailed observation of eggs hell microstructure // Journal of Vertebrate Paleontology. 2015. V. 35. № 5. P. e973030.
28. Mentaschi L., Vousdoukas M.I., Pekel J.F. et al. Global long-term observations of coastal erosion and accretion // Scientific Reports. 2018. V. 8. P. 12876.
29. Moulin M., Aslanian D., Evain M. et al. Gondwana breakup and passive margin genesis: Messages from the Natal Valley // Terra Nova. 2020. V. 32. № 3. P. 205–214.
30. Paskoff R. *Côtes en danger*. Paris: Édit. MASSON, 1993. 247 p.
31. Piqué A. The geological evolution of Madagascar: an introduction // Journal of African Earth Sciences. 1999. V. 28. № 4. P. 919–930.
32. Rahoiljao N., Arivelo T.A., Rakotomavo Z.A.P.H. et al. Les tendances climatiques et les futurs changements climatiques a Madagascar-2019. Government of Madagascar, Antananarivo, Madagascar [online] URL: https://www.primature.gov.mg/cpgu/wp-content/uploads/2019/11/Publication_FR_09_Sept_Version_Finale.
33. Randriatefison N., Andrianaharison Y. Dynamics of the ocean of Morondava // Conference in High-Energy Physics (HEPMAD-19). Madagascar-Antananarivo (14–20 October, 2019). 6 p.
34. Razafimbelo E. Le bassin de Morondava (Madagascar). Synthèse géologique et structural. Thèse de Doct. Ingénieur. Université Louis, France, 1987. 241 p.

35. Razafimbelo M.R.I., Mandimbiarison A.J., Rajaona R.D., Rasolomanana E.H. Problematique de l'érosion du littoral de Morondava // *Madamines*. 2013. V. 5. P. 1–12.
36. Salomon J.-N. L'accrétion littorale sur la côte Ouest de Madagascar // *Geographie Physique Environment*. 2009. V. 3. P. 35–59.
37. Tadross M., Randriamarolaza L., Rabefitia Z., Zheng K.Y. Climate change in Madagascar; recent past and future // *Climate Systems Analysis Group*. Washington, D.C., USA. 2008. 17 p.
38. Tucker R.D., Roig J.Y., Moine B. et al. A geological synthesis of the precambrian shield in Madagascar // *Journal of African Earth Sciences*. 2014. V. 94. № 2. P. 9–30.
39. Veress M., Lóczy D., Zentai Z. et al. The origin of the Bemaraha tsingy (Madagascar) // *International Journal of Speleology*. 2008. V. 37. № 2. P. 131–142.
40. Weiskopf S.R., Cushing J.A., Morelli T.L., Myers B.J.E. Climate change risks and adaptation options for Madagascar // *Ecology and Society*. 2021. V. 26. № 4. P. 36.

STATE AND FORECAST OF THE DEVELOPMENT OF THE SHALLOW SANDY COAST OF THE TIDAL SEA (ON THE EXAMPLE OF MADAGASCAR)

N. N. Dunaev^{a, #}, I. O. Leont'yev^a, and T. Yu. Repkina^{a, b}

^a*Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia*

^b*Institute of Geography RAS, Moscow, Russia*

[#]*e-mail: dunaev@ocean.ru*

Currently, most seashores are experiencing increased erosion and retreat. To a large extent, this applies to coasts subject to the influence of high-amplitude sea tides, which is extremely negatively manifested on the accumulative coasts of oceanic islands. The solution of the problem of their dynamics, the theoretical foundations of which are still in the development stage, can be based only on the basis of wide-regional studies. This work is aimed at elucidating the features of the dynamics of such a coast using the example of a key region of a large oceanic island. The main reasons for its degradation are identified, recommendations are given for stabilizing the coastline, and the development trend according to the natural scenario is considered.

Key words: tidal sea, the coastal zone, neotectonics, geomorphology, modeling