

УДК 551.248.2; 551.435.3

ДИНАМИКА АККУМУЛЯТИВНОГО ПРИБРЕЖЬЯ В УСЛОВИЯХ ЗАКРЫТЫХ БУХТ АНТАРКТИКИ (НА ПРИМЕРЕ КЛЮЧЕВОГО РАЙОНА МИКРОКОНТИНЕНТА ЮЖНАЯ ГЕОРГИЯ)

© 2019 г. Н. Н. Дунаев*, И. О. Леонтьев**

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

**e-mail: dunaev@ocean.ru*

***e-mail: igor.leontiev@gmail.com*

Поступила в редакцию 16.01.2018 г.

Принята к публикации 08.02.2018 г.

Объект непосредственного изучения представляет собой аккумулятивное побережье бухты Кинг Эдуард острова Южная Георгия одноименного микроконтинента Антарктики. В условиях неотектонического поднятия острова аккумулятивные береговые процессы зоны сопряжения суши и моря данного ключевого района реализуются на участках относительного тектонического опускания. Геолого-геоморфологические исследования и математическое моделирование литодинамики береговой зоны позволяют выделить основные факторы его современного состояния и обосновать прогноз развития в XXI в. Выбор объекта обусловлен востребованностью разного рода информации о нем в связи с его приуроченностью к району активного международного туризма и возможностью получения оригинальных геолого-геоморфологических материалов по программе исследований ИО РАН в Антарктике.

Ключевые слова: Антарктика, береговая зона, неотектоника, математическое моделирование

DOI: 10.31857/S0030-1574592265–270

ВВЕДЕНИЕ

Работа нацелена на выяснение закономерностей развития и функционирования морских береговых геосистем как одного из фундаментальных направлений географии. Такая проблема может быть решена на примере исторического анализа природных обстановок в области сопряжения суша-море, выяснения функциональной связи и роли различных факторов и процессов в эволюции береговых геосистем. Объективность исследований повышается, если они реализуются в различных регионах Земли.

Актуальность работы определяется слабой изученностью геолого-геоморфологических процессов, формирующих региональные побережья в условиях высоких южных географических широт, и неоднозначностью заключений о развитии их в XXI в. Задачи конкретных исследований предполагали изучение геолого-геоморфологического строения ключевого объекта, построение картографической модели его новейшей тектоники, выполнение математического моделирования экзогенной литодинамики береговой зоны и на этой основе осуществление прогноза ее развития в XXI в.

Выбор объекта согласуется с ФЦП РФ «Мировой океан» от 2010 г. относительно стратегической деятельности РФ в Антарктике, предусматривающей проведение научных исследований как главного элемента по закреплению геополитических позиций России в этом регионе, а также с обновленной 26.07.2015 г. Морской доктриной РФ, в которой одним из главных региональных направлений выделено Антарктическое. Это направление соответствует Стратегии развития деятельности Российской Федерации в Антарктике на период до 2020 г. и на более удаленную перспективу, утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации № 1926-р 30 октября 2010 г. как важнейшее направление современного изучения Антарктики.

В наших исследованиях особое внимание уделено новейшим тектоническим условиям литодинамических процессов прибрежной зоны рассматриваемого объекта, что согласуется с программой ANTEC (Неотектоника Антарктики) Научного комитета по исследованиям Антарктики (SCAR), нацеленной на изучение современных тектонических процессов в Антарктике.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДУЕМОГО РАЙОНА

Бухта Кинг Эдуард осложняет полуостров Тэтчер, расположенный на северо-восточном побережье о. Южная Георгия в заливе Камберленд, разделяя его на Западный и Восточный отвержки (рис. 1). При ширине в основании около 10 км и протяженности до 12 км с запада на восток полуостров характеризуется низкорельефом (макс. абс. отм. 677 м), многочисленными временными маловодными потоками, небольшими каровыми и внутриморенными озерами. В условиях субполярного морского климата (сравнимого с климатом северной Исландии) снеговая граница находится на уровне 450–600 м. В предгорьях широко развит тундровый ландшафт, а на низменных участках морского побережья прослеживаются



Рис. 1. Местоположение о. Южная Георгия (а) и бухты Кинг Эдуард (б).

1 — Южная Америка, 2 — прол. Дрейка, 3 — Антарктида, 4 — о. Южная Георгия, 5 — море Скотия. Звездочки: шестиугольная — залив Камберленд, пятиугольная — п-ов Тэтчер, стрелка — б. Кинг Эдуард.

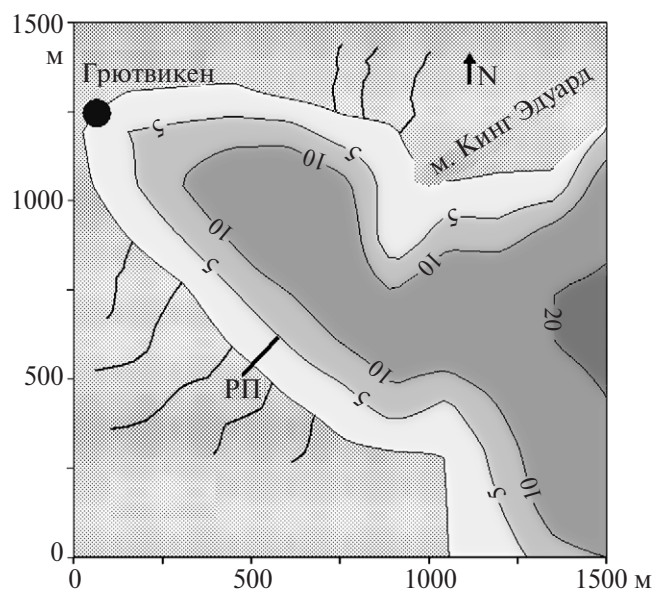


Рис. 2. Батиметрия бухты Кинг Эдуард.

океанические луга, где доминирует осока. Высотный предел распространения растительности не превышает 80 м. В зимнее время акватория залива Камберленд ненадолго покрывается тонким дрейфующим льдом.

Анализ литературы и авторские наблюдения позволяют утверждать, что полуостров Тэтчер обязан своим происхождением дифференцированным вертикальным движениям блоков приповерхностных горизонтов земной коры (по крайней мере, до первого геофизического волновода) по тектоническим разломам, особенно активно проявившимся на позднекайнозойском этапе становления о. Южная Георгия.

Современная структура полуострова представлена блоками размером до первых км², предопределенных разломами СЗ (340°) и СВ (45°) простирания при доминировании первых. В его геологическом строении преобладают смятые в складки осадочные породы — песчаники, алевриты и сланцы граувакковой формации с хорошо выраженной слоистостью. Их нижняя толща представлена формацией Sandebugten, которая сформировалась в позднем палеозое, а в мезозое была подвержена интенсивной складчатости с внедрением гранодиоритов. Верхняя толща (формация Cumberland) с характерной флишевой слоистостью сформировалась в раннем мелу и залегает со структурным несогласием. В строении ее приповерхностного горизонта широко представлены туфы спилитовых базальтов и встречаются пиллоу-формы [5–7]. Коренные породы пронизаны кварц-полевошпатовыми жилами небольшой мощности и фрагментарно перекрыты характерными для данных географических широт отложениями четверичного возраста, среди которых доминируют ледниковые и склоновые фации.

Бухта Кинг Эдуард вдается в сушу примерно на 1 км при средней ширине около 500 м. Глубины вдоль ее оси и на входе составляют около 20 м (рис. 2). В процессе геолого-геоморфологического изучения полуострова Тэтчер установлено, что происхождение бухты предопределено разломно-блоковой неотектонической структурой (рис. 3), обусловившей опускание ее литологического ложа с наклоном от кутовой части к устью. Боковые берега принадлежат к дифференцированно поднимающимся блокам со скоростью, которая даже на аккумулятивных участках достигает 1.7 мм/год. При этом на основании оригинальных данных установлено, что уровень моря в голоцене не превышал сколько-либо заметно его современного положения [1].

Подобное обстоятельство приводит к относительному понижению приурезового уровня со-

предельной морской акватории и выражается в регрессивном строении разреза отложений формирующегося аккумулятивного берега и соответствующего побережья в целом. Понятие «прибрежье» наряду с берегом включает приурезовые субаэральный и субаквальный компоненты, границы и содержание которых рассмотрено ранее [2].

Детальные геолого-геоморфологические исследования, сопряженные с математическим моделированием литодинамики береговой зоны, были выполнены на участке юго-западного берега бухты (рис. 3). Здесь сформирован пляж шириной около 10 м, сложенный в основном терригенным гравийно-галечным материалом с примесью разнозернистого песка. Исходный обломочный материал поставляется в береговую зону небольшими водотоками (ручьями) и плоскостным смывом с возвышенностей сопредельной суши. Расположение бухты, а также достаточно узкий в нее вход препятствуют проникновению больших океанских волн. Только волны северных румбов, значительно ослабленные вследствие рефракции, могут достигать бухты, подходя к ней под значительным углом. Помимо этого, возможно воздействие сравнительно небольших волн, генерируемых в самом заливе Камберленд при юго-восточных ветрах. Подобные волны распространяются вдоль оси бухты.

МЕТОДИКА МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Морфодинамические процессы береговой зоны моря подчиняются определенным физическим законам и принципам, в числе которых важное место занимает закон сохранения массы. В применении к деформациям морского дна этот закон позволяет связать во времени изменения глубины дна (h) с изменением расхода наносов (q) по длине пути их переноса. Под расходом наносов понимается их объем, проходящий через сечение, принятое в конкретном исследовании единичной ширины дна за единицу времени.

Скорость смещения берега определяется на основе уравнения баланса, включающего составляющие бюджета наносов и вклад изменений уровня моря [4]. Деформации профиля берега определяются на основе закона сохранения массы в форме

$$\frac{dh}{dt} = \frac{\partial q_x}{\partial x}, \quad (1)$$

где h — глубина дна, t — время, x — расстояние по нормали к берегу, q_x — поперечный объ-



Рис. 3. Схема новейшей тектонической структуры полуострова Тэтчер.

Районы орогенической активизации соответственно морфометрии: 1 — повышенной (>500 м), 2 — умеренной (500–200 м), 3 — слабой (200–0 м). Границы структурных элементов: 4 — первого порядка, 5 — второго порядка, 6 — блоковой фрагментации. 7 — район непосредственных наблюдений: на участке I выполнено математическое моделирование литодинамики береговой зоны; на участке II выполнены детальные геолого-геоморфологические исследования с целью определения кинематики уровня моря в позднем голоцене; 8 — б. Кинг Эдуард.

емный расход наносов, проходящий через сечение единичной ширины дна за единицу времени ($\text{м}^3\text{м}^{-1}\text{с}^{-1}$). Величины q_x определяются на основе энергетического подхода с учетом характеристик наносов, параметров волн и течений. 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.

Выполненное математическое моделирование включало расчеты штормовой циркуляции воды, определение вдольберегового потока наносов и штормовых деформаций дна, а также оценку возможных смещений берега в долгосрочной перспективе (в масштабе последующих десятилетий текущего столетия). Штормовые течения в бухте оценивались с помощью модели, использующей уравнения гидродинамики, адаптированные к условиям прибрежной области [3].

Вдольбереговой расход наносов представляет собой функцию потока волновой энергии и характеристик осадков береговой зоны, определяемой в данном случае значимыми (более 0.1 м) ветро-волновыми деформациями приурезового

рельефа (пляжа и подводного склона). Учитывая неоднородную крупность наносов, их расход оценивался на базе т. н. локального подхода, отражающего связь вдольберегового расхода наносов с продольной составляющей потока волновой энергии [3]. Деформации берегового профиля, обусловленные штормовым волнением, рассчитывались с помощью модели CROSS-P, основанной на законе сохранения массы [3]. В области значимых штормовых деформаций поперечные градиенты расхода (по нормали к берегу), как правило, заметно превышают продольные (вдоль берега), что позволяет применять уравнение сохранения массы в форме (1). Для оценки долговременных тенденций развития берега использовалось правило Бруна [4], согласно которому понижение или повышение относительного уровня моря на величину ζ должно вызывать смещение береговой линии в сторону моря или суши на расстояние ΔX :

$$\Delta X = \zeta / \bar{\beta}, \quad \bar{\beta} = z_A / l_A. \quad (2)$$

Здесь $\bar{\beta}$ — средний уклон активной части профиля (с горизонтальным и вертикальным разме-

Таблица. Параметры волн, принятые при моделировании динамики береговой зоны б. Кинг Эдуард

Тип волнения	Высота, м	Период, с	Угол, °
Океанское	1.5	8	60
Локальное	1.0	4	-10

рами — длиной l_A и возвышением z_A), в которой фиксируются наиболее значимые штормовые деформации дна (>0.1 м). Под активной понимается та часть профиля, в которой отмечаются деформации при сильных штормах. Величины l_A и z_A можно определить на основе результатов моделирования штормовых деформаций профиля [3].

ЛИТОДИНАМИКА И ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ АККУМУЛЯТИВНОГО ПРИБРЕЖЬЯ

При моделировании гидродинамики бухты рассматривались два типа волнений, характеристика которых дана в таблице. Здесь указаны ориентировочные средние параметры волн на входе в бухту. Угол их подхода определен относительно оси бухты (для северных румбов он принят положительным). Результаты расчетов циркуляции воды в бухте показаны на рис. 4.

Как видно, в обоих случаях возникают круговороты воды, имеющие противоположные направления. При действии океанского волнения, вызывающего более интенсивные течения (со скоростями более 0.4 м/с), вращение идет по часовой стрелке, а в случае локальных волнений вода движется против часовой стрелки. Северная часть бухты оказывается в волновой тени, и течения здесь практически отсутствуют. Описанная циркуляция имеет значение в основном для транспортировки тонкой взвеси, которая попеременно переносится то внутрь бухты, то наружу.

Что же касается перемещений гравийно-песчаного материала на интересующем нас участке

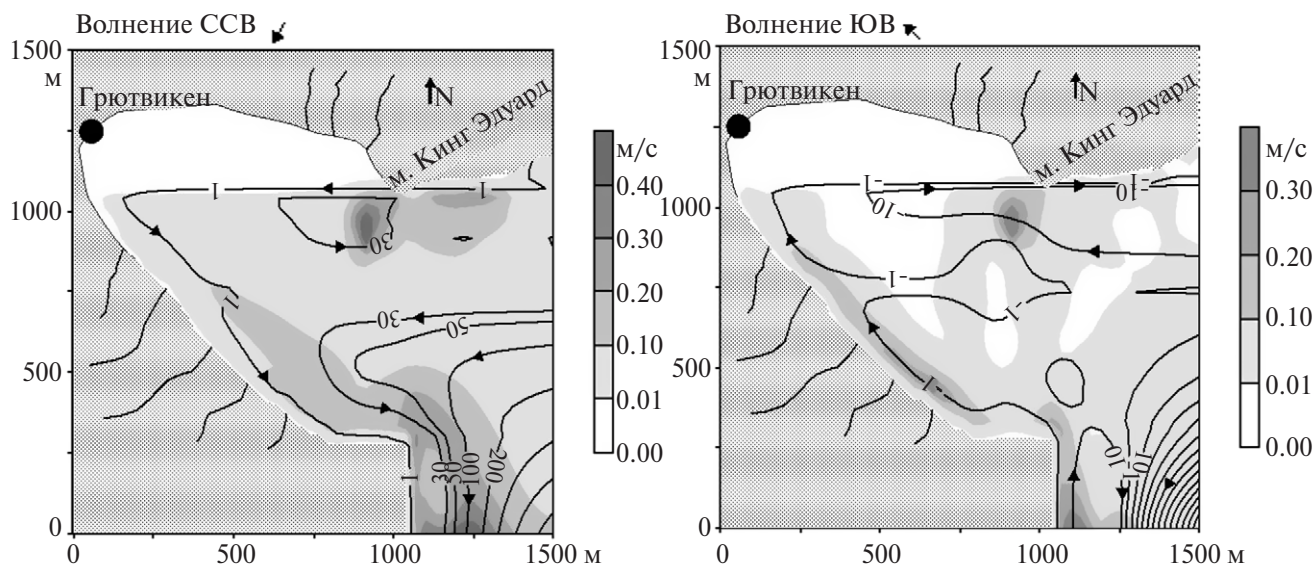


Рис. 4. Циркуляция воды в бухте Кинг Эдуард при океанском (ССВ) и локальном (ЮВ) волнении.

Линии тока характеризуют расходы воды между берегом и данной точкой. Направление течений указано стрелками, а их скорости обозначены оттенками серого цвета. Незакрашенные участки соответствуют зонам застоя, где скорости течений менее 0.01 м/с.

берега, то они направлены главным образом в куттовую часть бухты. Дело в том, что волны обоих типов, распространяясь вглубь бухты и испытывая рефракцию, подходят к рассматриваемому берегу с одной и той же стороны, и вызывают вдольбереговой транспорт наносов, направленный на СЗ. Высота океанских волн не превышает здесь 1.3 м. Тем не менее, как показывает расчетная оценка, они способны переместить за один шторм примерно 1.5 тыс. кубометров песка. Локальные волнения слабее, но действуют чаще, и создаваемый ими суммарный вдольбереговой поток наносов, примерно адекватный его теоретической емкости, вероятно, того же порядка.

Таким образом, должно иметь место однонаправленное перемещение осадочного материала в куттовую часть бухты в объеме около 3000 м³/год. В районе разгрузки потока создается возможность к постепенному нарастанию пляжа. На остальном протяжении берега не исключено, что в среднем существует определенный баланс между потоком наносов в куттовую часть бухты и поступлением обломочного материала в береговую зону из имеющихся на суше источников в виде твердого стока водотоков. Это обеспечивает относительную устойчивость пляжа, иначе трудно объяснить его существование на протяжении длительного времени.

Для оценки возможных смещений береговой линии воспользуемся правилом Бруна (2). На выбранном профиле (РП на рис. 2) штормовые деформации дна рассчитывались для условий воздействия океанских волн, охарактеризованных в таблице. Средняя высота таких волн, подходящих к песчаному берегу при экстремальном шторме, по расчетам составляет 1.3 м, а угол подхода — около 30°. Вид исходного профиля дан на рис. 5. Здесь же показан профиль, выработанный 6-часовой работой шторма. Принятая продолжительность воздействия достаточно типична для пика шторма, когда его параметры сохраняют максимальные значения.

Согласно рис. 5, параметры (горизонтальный и вертикальный масштабы) активного профиля могут быть оценены как $z_A = 6$ м и $l_A = 120$ м, что дает его средний уклон $\bar{\beta} = 0.05$. Как видно, материал перераспределяется по береговому склону, обуславливая формирование подводного вала и наращивание пляжа. Амплитуда деформаций не превышает 1 м. Однонаправленного выноса материала, очевидно, не происходит, что свидетельствует об устойчивости берега. Заметные деформации отмечаются до глубин дна менее 5 м.

Долговременная эволюция рассматриваемого побережья в условиях сбалансированного

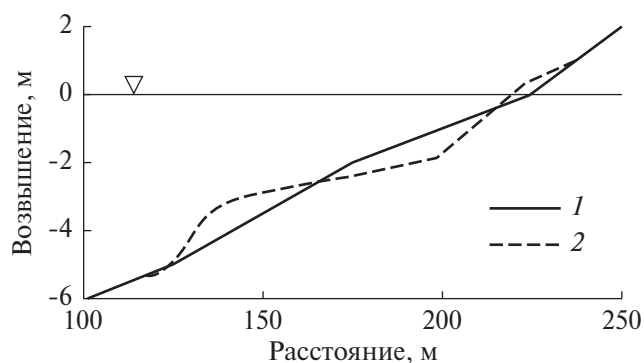


Рис. 5. Деформации профиля дна при экстремальном штормовом воздействии. 1 — начальный профиль, 2 — профиль после шторма.

бюджета наносов может обуславливаться только региональными колебаниями уровня моря, который в позднем голоцене в наибольшей мере связан с новейшей тектоникой и, как уже указывалось, характеризуется в исследуемом районе его относительным понижением в результате тектонического подъема суши. Естественно, в таких условиях берег здесь должен постепенно выдвигаться в сторону акватории. Для оценки скорости этого процесса применим правило Бруна (2), используя полученные выше параметры активного профиля. Учитывая скорость новейшего тектонического поднятия берега и предполагаемый многими исследователями средний темп повышения уровня Мирового океана 1.2 мм/год, скорость относительного снижения уровня составит 0.5 мм/год. В таких условиях береговая линия должна выдвигаться в море со скоростью 0.01 м/год, что за 100 лет составит 1 м. Настолько же расширится морская терраса, к которой примыкает пляж. Вблизи куттовой части бухты нарастание берега могло бы происходить более быстрыми темпами вследствие аккумуляции материала, поставляемого вдольбереговым потоком и привносом с пограничного холмогорья. Тем не менее полученные результаты показывают, что берег здесь сравнительно устойчив, и в течение ближайших 100 лет его положение и свойства практически не изменятся. Это явление можно объяснить компенсирующим накоплением осадков в пределах выходящей на сушу части неотектонически опущенного с перекосом в сторону моря блока, предопределившего формирование бухты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенных исследований получены новые данные о специфике береговых про-

цессов в условиях Антарктики. Применительно к микроконтиненту Южная Георгия рассмотрена роль различных агентов в формировании аккумулятивного побережья закрытых бухт и впервые проведен анализ его позднеголоценовой динамики. Основными особенностями побережья являются развитие по регрессивному сценарию; ведущая роль физического выветривания в подготовке поставляемого водотоками сопредельной суши терригенного материала при его незначительном ледовом выносе из береговой зоны; большое количество равномерно выпадающих в течение года атмосферных осадков (1400–1500 мм/год); практически постоянные шторма; два типа ветрового волнения — океанское и локальное. Учитывая, что основные элементы побережья сформировались, а процессы, проявляя тенденцию к скользящему квазиравновесию, определились, можно заключить, что оно находится в зрелой стадии развития.

В настоящее время район бухты входит в число территорий Антарктики, наиболее активно посещаемых туристами разных стран. Так, с июля 2016 г. по июнь 2017 г. остров Южная Георгия посетило на круизных судах 15 303 чел. 73 национальностей из 42 стран. При этом наибольшее их количество побывало в б. Кинг Эдуард и ее окрестностях — 9688 человек [8]. В связи с возрастанием потока туристов результаты выполненной работы будут учитываться в дальнейшем освоении исследуемого района и сходных с ним антарктических территорий, включая организацию особо охраняемых зон, планирование наземных и водных мероприятий, устройство разного рода причалов, а также коррективы каботажного мореплавания.

Проведенные исследования могут быть полезны при изучении морфолитодинамики прибрежных зон близких по географическим условиям регионов, в частности прилегающих к Северному Ледовитому океану.

Источник финансирования. Работа выполнена в соответствии с темой Госзадания № 0149-2018-0015 и при поддержке РФФИ (грант № 16-05-00364).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дунаев Н. Н. Берега микроконтинента Южная Георгия в решении вопросов голоценовой эвстазии // *Океанология*. 2016. Том 56. № 3. С. 471–481.
2. Дунаев Н. Н., Леонтьев И. О., Репкина Т. Ю., Эрпера Х. Ф. Вклад математического моделирования в обеспечение экологической безопасности прибрежной зоны моря (на примере района Кубы Варадеро) // *Процессы в геосредах*. 2017. № 4 (13). С. 668–677.
3. Леонтьев И. О. Морфодинамические процессы в береговой зоне моря. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing. 2014. 251 с.
4. Bruun P. The Bruun rule of erosion by sea-level rise: a discussion on large-scale two- and three-dimensional usages // *J. of Coastal Res.* 1988, V. 4, № 4. P. 627–648.
5. Headland R. The island of South Georgia // *Camb. Univer. Press (New Edition)*. 1992. 312 p.
6. Macdonald D. I. M., Storey B. C., Thomson J. W. South Georgia, Geological Map and Supplementary Text. Sheet 1. Scale 1: 250 000. BAS GEOMAP Ser. (British Antarctic Survey, Cambridge, 1987). 63 p.
7. Simpson P., Griffiths D. The structure of the South Georgia continental block. Antarctic Geoscience. University of Wisconsin Press, Madison, 1982. P. 185–191.
8. Электронный ресурс: gov.gs>...Tourism/2016–2017... Tourism Report.pdf). Посещение 08.12. 2017 г.

THE ACCUMULATIVE COASTS DYNAMICS IN ENCLOSED BAYS OF ANTARCTICA (IN EXAMPLE THE KEY AREA OF THE SOUTH GEORGIA MICROCONTINENT)

© 2019 N. N. Dunaev*, I. O. Leont'yev**

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*e-mail: dunaev@ocean.ru

**e-mail: igor.leontiev@gmail.com

Received January 16, 2018

After revision February 08, 2018

The object of direct study represents the accumulative coast of the King Edward Bay of the South Georgia island of the same name microcontinent of Antarctica. In terms of neotectonic uplift of the island of accumulative coastal processes zone pairing of land and sea are being implemented in areas of relative tectonic subsidence. Geological-geomorphological studies and mathematical modeling of lithodynamic coastal zone give leave highlight the main factors of its current state and to justify the forecast of development in the XXI century.

Keywords: Antarctic, coastal zone, neotectonics, mathematical modelling