УДК 551.465

doi: 10.30730/2541-8912.2019.3.1.137-143

Анализ динамики лагунной аккумулятивной барьерной формы (о. Сахалин) на основе математического моделирования и карт деформаций рельефа за многолетний период

© 2019 В. В. Афанасьев*¹, И. О. Леонтьев², А. В. Уба¹

¹ Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

² Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

*E-mail: vvasand@mail.ru, igor.leontyev@gmail.com

Рассмотрены вопросы динамики барьерных аккумулятивных форм с берегозащитными сооружениями на верхней части берегового профиля. Задача решена на основе детальных морфолитодинамических наблюдений и математического моделирования динамики пересыпи лагуны Мерея зал. Анива на участ-ке расположения завода СПГ «Пригородное». Представлены результаты моделирования воздействий волн на береговой профиль. Отмечено, что расчеты потоков наносов на основе модели lont-2d, выполненные на участках, для которых возможны прямые морфолитодинамические измерения, имеют высокую степень достоверности.

Ключевые слова: Сахалин, пересыпь, вдольбереговой поток наносов, моделирование размыва берегов, берегозащита.

Analysis of the dynamics of the lagoon accumulative barrier form (Sakhalin Island) on the basis of mathematical modeling and relief strain maps for a long-term period

Victor V. Afanasiev*1, Igor' O. Leont'yev2, Aleksey V. Uba1

¹Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia ²Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia *E-mail: vvasand@mail.ru, igor.leontyev@gmail.com

The problems of the dynamics of barrier accumulative forms with coastal protection structures on the upper coastal profile have been considered. The problem has been solved on the basis of detailed morpholithodynamic observations and mathematical modeling of the coastal barrier forms dynamics of the Mereya lagoon of the Aniva bay at the location of the Prigorodnoye LNG plant. The results of modeling the effects of waves on the coastal profile are presented. It is noted that calculations of sediment flows based on the lont-2d model, performed in areas for which direct morphodynamic measurements are possible, have a high degree of confidence.

Keywords: Sakhalin, barrier spit, alongshore sediment flux, modeling of coastal erosion, coastal protection.

Введение

С 30–40-х годов прошлого века на Сахалине актуализировалась проблема защиты аккумулятивных берегов. Остатки японских бетонных и деревянных волноотбойных стенок, сохранившиеся на побережье, расположены главным образом на участках, где прак-

тически отсутствуют морфолитокомплексы средне- и позднеголоценовой прибрежноморской аккумуляции. В послевоенный период в систему берегозащиты добавились сооружения на берегах низких аллювиальноморских террас. Однако за почти столетнюю историю освоения побережья о. Сахалин

берегозащитные сооружения были построены только на одной аккумулятивной форме барьерного типа (пересыпь лагуны Мерея). С одной стороны, это связано с устойчивостью унаследованно развивающихся аккумулятивных форм барьерного типа [Сафьянов, 1996]. С другой – бесполезностью закрепления морского откоса каменной наброской и волноотбойными стенками в условиях размываемого прибрежного дна [Зенкович, 1987]. Тем не менее в последние годы остро встал вопрос защиты пересыпи лагун Пильтун и Чайво на северо-востоке Сахалина. В этой связи представляет научный и практический интерес анализ разрушения аккумулятивных берегов барьерного типа с закрепленной верхней частью берегового профиля.

Район исследования расположен в северной части зал. Анива, в вершине пологого изгиба берега между мысами Томари-Анива и Юноны (рис. 1).



Рис. 1. Обзорная схема района исследований.

Объектом исследования является барьерная форма, по сути пересыпь, между морем и низкой заболоченной поверхностью лагуны, которая называется озеро Мерея. Пересыпь перекрыта насыпными грунтами, по которым проложено полотно автодороги. Его превышение над уровнем моря составляет от 1.8 до 4 м (по Балтийской системе высот 1977 г.). Морская часть пересыпи испытывает размыв, и для защиты трассы последние двадцать лет производятся эпизодические подсыпки скального грунта. Периодическое затопление и разрушение насыпи автомобильной дороги связывают главным образом с недостаточной шириной пляжа. На рассматриваемом участке автодороги ранее располагались берегозащитные сооружения в виде бетонной и деревянной вертикальных волноотбойных стенок. В настоящее время стенки практически полностью разрушены (рис. 2).

Учитывая близость портовых сооружений завода СПГ и, как следствие, необходимость сохранения навигационных глубин, при берегозащитных мероприятиях были проведены исследования процессов и механизмов, определяющих современную динамику берега на данном участке. На основе математического моделирования прибрежной динамики был выполнен расчет вдольбереговых потоков наносов, рассмотрены деформации берегового профиля с 2004 по 2015 гг.



Рис. 2. Морская сторона пересыпи, закрепленная каменной наброской, с остатками деревянной волноотбойной стенки.

Геоморфологическая позиция nepeсыпи лагуны Мерея. В современном виде пересыпь была сформирована, вероятно, в последнюю фазу голоценового прибрежно-морского осадконакопления [Афанасьев, 1992]. В первые фазы средне-позднеголоценового осадконакопления при ингрессии морских вод в долину р. Мерея были сформированы лагунные террасы высотой до 3.5 м [Короткий и др., 1997]. Площадь лагуны-эстуария в этот период была существенно больше. Об этом свидетельствуют эстуарно-лагунные отложения мощностью около 10 м в 200 м к западу от современного прикорневого основания пересыпи и лагунные осадки мористее современного пляжа, вскрытой мощностью в несколько метров. Палеодолина р. Мерея прослеживается в донном рельефе до глубин более 30 м. Мощность эстуарно-лагунных отложений, заполнивших долину реки, по траверсу пересыпи увеличивается с 7 м в западной части пересыпи до 17-18 м в центральной части. В районе современного устья лагуны мощность этих отложений уменьшается до 5 м, и в 180 м далее к востоку они выклиниваются. При инженерных изысканиях на прилегающей к палеодолине акватории на глубинах 16.5-17 м, 13-14 и 8 м были установлены древние береговые линии, что свидетельствует о существенных перестройках лагуны и в раннем голоцене. Таким образом, подводный береговой склон в районе исследования сложен довольно легко размываемыми породами. При этом затопленные водораздельные поверхности выражены в подводном рельефе выходами коренных аргиллитов быковской свиты верхнемелового возраста.

Исходные данные

Батиметрической основой служат навигационная карта зал. Анива и данные промеров, выполненных при наших инженерногеоморфологических изысканиях для целей берегозащиты.

Волновые параметры определены путем вычислений полей частотно-направленных спектров морского волнения на базе полей

ветра, зафиксированных сетью береговых метеостанций в течение нескольких десятков лет. Использовались также данные, приведенные в ТЭО проекта «Сахалин-2» [Проект «Сахалин-2»..., 2002], скорректированные с учетом более поздних исследований. Здесь для основных волноопасных румбов (ЮЗ, Ю и ЮВ) приведены средние параметры волн на глубокой воде (высота \overline{H} и период \overline{T}), соответствующие различным скоростям ветра (W), а также отражена суммарная годовая продолжительность $(t_{...})$ тех или иных волновых ситуаций (табл. 1). Углы подхода волн Θ соответствуют углам между направлением волн и линией север-юг. Очевидно, что волнения южных румбов значительно доминируют по продолжительности и силе. Характеристики экстремальных штормов отражает табл. 2.

Таблица 1. Средние параметры волн (высота \overline{H} и период \overline{T}) на глубокой воде и их годовая продолжительность (t_{x}) для основных направлений

Румб	<i>W</i> , м/с	<i>H</i> .м	\overline{T} , c	<i>t</i> _, ч
$O3 \\ \Theta = -45^{\circ}$	5	0.3	2.7	543
	8	0.7	3.8	210
	11	1.1	4.8	64.2
	16	1.8	6.0	18.2
	20	2.5	6.9	5.1
	30	3.9	8.3	0.7
$O = 0^{\circ}$	5	0.3	2.7	596
	8	0.7	4.1	251
	11	1.2	5.2	48.9
	16	2.2	6.7	8.8
	20	2.9	7.6	1.5
	22	3.3	8.0	1.1
	26	3.9	8.7	0.7
$\begin{array}{c} \text{IOB} \\ \Theta = 45^{\circ} \end{array}$	5	0.3	2.7	280
	8	0.7	3.9	105
	11	1.2	5.0	34.3
	16	2.0	6.4	18.2
	20	2.7	7.2	4.4
	22	3.0	7.5	1.5

Таблица 2. Параметры экстремальных штормов различной повторяемости

Параметр	Период повторяемости, лет			
	1	10	100	
\overline{H} , M	1.8	2.5	3.3	
\overline{T} , c	6.3	7.1	7.9	
Нагон, м	0.4	0.6	0.8	

Прилив в зал. Анива имеет суточный характер, высота его при расчетах принималась равной 1 м. Высота штормового нагона может достигать 0.8 м при периоде повторяемости 50–100 лет, что учитывалось при моделировании экстремальных штормов (табл. 2). Песок на дне и на пляже при расчетах рассматривался как крупнозернистый с характерным средним размером 0.7 мм.

Штормовые деформации профиля

Моделирование воздействий волн на береговой профиль проводилось на основе модели CROSS-Р [Леонтьев, 2014а; Леонтьев и др., 2015] при использовании параметров экстремальных штормов, охарактеризованных в табл. 2. Продолжительность штормов задавалась равной 12 ч. Полученные результаты представлены на рис. ЗА. Показан начальный профиль и профили, сформированные по окончании штормовых воздействий. Исходный профиль взят для участка берега с максимальным возвышением 3.5 м.

Как видим, при каждом шторме тело пересыпи размывается, и смытый материал выносится на подводный склон. Шторма с периодом повторяемости 1, 10 и 100 лет вызывают отступание бровки берега соответственно на 7, 15 и 22 м.

Известно, что в периоды длительного слабого волнения (зыби) донный материал

перемещается преимущественно к берегу, а размытый пляж может в определенной мере восстанавливаться. Чтобы выяснить применимость этого правила к рассматриваемому берегу, было проведено моделирование воздействия слабой зыби на береговой профиль, сформированный штормом с повторяемостью 1 раз в год (рис. 3Б). Параметры зыби следующие: средняя высота 0.4 м, период 8 с, длительность 7 сут.

Из рис. 3Б следует, что зыбь действительно транспортирует наносы с подводного склона на пляж, где откладывает их в форме берегового вала. Однако верхняя часть размытого склона, очевидно, не может быть восстановлена, так как зыбь ее не достигает (вследствие недостаточно высокого нагона и заплеска). При следующем шторме береговой вал будет быстро размыт, и верхняя часть склона снова окажется подверженной размыву. Таким образом, потери материала из тела пересыпи оказываются необратимыми.

Деформации профиля в условиях берегозащиты

В последнее время для защиты морского берега пересыпи применяется каменная наброска, рассматриваемая в модели как волногасящая защита откосного типа. В связи с этим было проведено моделирование штормовых воздействий на берег при наличии кре-



Рис. 3. Волновые воздействия на береговой профиль пересыпи лагуны Мерея: А – деформации профиля берега при штормах различной силы; Б – воздействие слабой продолжительной зыби на штормовой профиль; В – штормовые деформации профиля при наличии каменной наброски; Г – воздействие зыби на закрепленный откос.

пления склона. При расчетах предполагалось, что основание крепления расположено на возвышении пляжа +1 м и движение материала в пределах каменной наброски исключается. Результаты расчетов представлены на рис. 3В. Изменения в пределах пляжа оказываются незначительными. Наиболее заметный эффект это небольшой размыв и углубление дна у основания крепления, которое составляет около 0.2 м для штормов 1/1 год и 1/10 лет и около 0.4 для шторма 1/100 лет. В результате размыва может происходить некоторое оползание материала крепления. Но в периоды слабой зыби основание крепления будет засыпаться материалом, поступающим к берегу. Об этом свидетельствуют результаты моделирования, показанные на рис. 3Г.

Потоки наносов

Расчеты основывались на модели LONT-2D [Леонтьев, 2014 а, б]. На рис. 4 показано распределение потоков наносов, созданных волнами различных направлений (Ю, ЮВ и ЮЗ), а также результирующий поток, представляющий алгебраическую сумму отдельных потоков. Поток на восток считается отрицательным, на запад – положительным.

ЮЗ волны продвигают наносы на восток, ЮВ волны - на запад, и соответствующие потоки в какой-то мере компенсируют друг друга. Таким образом, южные волнения обусловливают транспорт наносов от краев к вершине залива. И поскольку южные волны доминируют, то и результирующий транспорт имеет характер двух противоположных потоков, сходящихся в вершине залива. Очевидно, рассматриваемый участок оказывается в зоне конвергенции. В результате разгрузки потоков здесь должна иметь место аккумуляция материала.

В частности, благодаря западному потоку должен аккумулироваться материал, поступающий из устья р. Мерея.

Значения отдельных потоков изменяются в пределах ±20 тыс. м³/год, а амплитуда результирующего потока близка к 40 тыс. м³/год. Средний градиент потока, характеризующий объем аккумуляции на исследуемом участке, имеет порядок 10 м³/м⁻¹год⁻¹, т.е. 10 м³ на метр длины берега в год, что совсем немало. Однако к этим величинам следует подходить с осторожностью. Дело в том, что расчеты дают емкость потоков, т.е. объем, который волны могли бы перенести при наличии достаточного количества наносов на подводном склоне и пляже. Но в условиях рассматриваемого региона слой наносов не является сплошным: на значительной площади дна в береговой зоне присутствуют выходы коренного субстрата и россыпи валунов. Иначе говоря, имеется определенный дефицит материала, и реальные потоки могут быть значительно меньше расчетных.

Тем не менее действующие потоки наносов способствуют сохранению существующей пересыпи. Вместе с тем выдвижение берега в результате аккумуляции не наблюдается. Значит, аккумуляция нейтрализуется процессами



Рис. 4. Распределение потоков наносов вдоль побережья исследуемого участка.

противоположной направленности. Одним из таких процессов может быть повышение относительного уровня моря в результате тектонического погружения суши и глобального подъема уровня океана.

Верификация полученной информации проводилась на основе анализа трендовых тенденций береговой зоны. Переформирование подводного рельефа устанавливается на основе сравнения материалов промеров 2004 и 2015 гг. Данные в формате dwg были оцифрованы в системе DNG и переведены в ГИС. На основе оцифрованных данных была проведена триангуляция точек и построены цифровые равномерные сетки с дискретностью 1/70 угловой секунды. Затем было произведено небольшое сглаживание поверхности. Следующим этапом было вычитание поверхностей и создание результирующей разностной карты. Для построения карт использовалась программа QGIS 2.8.2 Wien. Все расчеты проводились в системе ESPG:3395.

Результирующая карта остаточной поверхности рельефа была сохранена в виде изображения (рис. 5).

Согласно полученным данным, мощность осадков увеличивается на 77 % площади подводного берегового склона. Соответственно площадь размыва составляет 23 %. Приходная часть бюджета наносов за рассмотренный интервал времени равна 315 375 м³, объем размыва 42 940 м³, результирующая приходная часть составляет +272 435 м³ за 11 лет, или 24 767 м³/год. Данное значение полностью соответствует расчетным значениям мощности потока наносов, поскольку причал разгрузки оборудования служит преградой для основного потока наносов в восточном направлении и наносы не выходят за пределы района исследования. Максимальное понижение поверхности подводного берегового склона в юго-восточной части изученного берегового склона составляет около 2 м, оно связано, вероятно, с дноуглублением 2005-2006 гг. для обеспечения навигационных глубин у причала отгрузки СПГ. Основной объем осадконакопления наблюдается в приурезовой зоне до 3-метровой изобаты. Минимальная мощность деятельного слоя здесь 2.5 м.

В заключение несколько слов о влиянии на динамику пересыпи изменений относительного уровня моря. К сожалению, достоверных данных о скорости изменения уровня моря в рассматриваемом районе нет. Для грубой оценки, вероятно, можно использовать значение w = 3 мм/год, немного превышающее среднее значение w для Мирового океана [Гидрометеорология..., 1998]. Далее для оценки соответствующего отступания берега воспользуемся правилом Брууна [Бруун, 1988]:

$$\frac{\partial x_0}{\partial t} = -\frac{w}{\overline{\beta}}, \quad \overline{\beta} = \frac{z_c + h_*}{l_X},$$

где $\partial x_0 / \partial t$ – скорость смещения берега, $\overline{\beta}$ – средний уклон дна активной части профиля длиной l_x , расположенной между глу-



Рис. 5. Карта деформаций берегового склона на основе сравнения материалов промеров 2004 и 2015 гг.

биной замыкания h_* и возвышением пляжа z_c . Глубина замыкания соответствует удвоенной значительной высоте волн, наблюдаемой не более 12 ч в год. Судя по имеющимся волновым данным, искомая высота волн близка к 4 м, и, следовательно, $h_* = 8$ м. Возвышение берега можно принять как среднее по пересыпи $z_c = 3$ м. Согласно данным промеров, $l_v = 550$ м.

В итоге оценка по приведенной формуле дает скорость отступания берега $\partial x_0 / \partial t = -0.15$ м/год. Очевидно, за десяток лет берег отступит всего на 1.5 м. Даже при удвоении величины *w* изменения будут малозаметными. Эффект повышения относительного уровня в данном случае будет заметен лишь в масштабе сотен лет. Таким образом, фактор подъема уровня едва ли оказывает существенное влияние на динамику пересыпи.

Выводы

Результаты моделирования дают основания полагать, что волногасящее крепление морского откоса пересыпи стабилизирует параметры берегового профиля и не изменяет параметры вдольбереговых перемещений наносов, так как располагается выше зоны наиболее активного переноса. Таким образом, крепление будет достаточно долговечным, а тело пересыпи стабильным.

При современной скорости повышения относительного уровня моря этот процесс не оказывает заметного влияния на динамику исследуемого берега и может проявиться лишь в масштабе столетий.

Расчеты потоков наносов на основе модели lont-2d, выполненные на участках, для которых возможны морфолитодинамические измерения, имеют высокую достоверность. Так, расчетная емкость потока наносов в районе пересыпи лагуны Мерея составляет около 20 тыс. м³/год. После строительства причального сооружения завода СПГ в 2005 г. с его западной стороны за 9 мес. сформировалась аккумулятивная форма заполнения входящего угла объемом около 22 тыс. м³. Сравнение материалов промеров 2004 и 2015 гг. показало, что приходная часть бюджета наносов с западной стороны причала за рассмотренный интервал времени составляет 315 375 м³, объем размыва 42 940 м³, результирующая приходная часть +272 435 м³ за 11 лет, или 24 767 м³/год.

Список литературы

1. Афанасьев В.В. Эволюция побережья дальневосточных морей в голоцене // Эволюция берегов в условиях поднятия уровня океана. М.: ИО РАН, 1992. С. 166–174.

2. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 9. Охотское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеоиздат, 1998. 370 с.

3. Зенкович В.П. Из зарубежного опыта морской берегозащиты // Природные основы берегозащиты. М.: Наука, 1987. С. 149–153.

4. Короткий А.М., Пушкарь В.С., Гребенникова Т.А. Морские террасы и четвертичная история шельфа Сахалина. Владивосток: Дальнаука, 1997. 195 с.

5. Леонтьев И.О. *Морфодинамические процессы* в береговой зоне моря. Saarbrücken, Deutschland: LAP LAMBERT Acad. Publ., 2014a. 251 с.

6. Леонтьев И.О. О расчете вдольберегового транспорта наносов // Океанология. 2014б. Т. 54, № 2. С. 226–232. https://doi.org/10.7868/s0030157414020130 [Leont'yev I.O. Calculation of longshore sediment transport. Oceanology, 2014, 54(2): 205-211. https://doi.org/10.1134/s0001437014020131]

7. 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. https:// doi.org/10.7868/s0030157414060069 [Leont'yev I.O., Ryabchuk D.V., Sergeev A.Y. Modeling of storm-induced deformations of a sandy coast (based on the example of the eastern Gulf of Finland). Oceanology, 2015, 55(1): 131–141. https://doi.org/10.1134/s000143701406006x]

8. Проект «Сахалин II». Этап 2. ТЭО. Т. 5, кн. 9, ч. 2. Охрана окружающей среды. М.: ООО НПФ «Экоцентр МТЭА», 2002.

9. Сафьянов Г.А. *Геоморфология морских берегов*. М.: Изд-во МГУ, 1996. 400 с.

10. Bruun P. The Bruun rule of erosion by sealevel rise: a discussion on large-scale two- and threedimensional usages // J. of Coastal Researches. 1988. Vol. 4, N 4. P. 627–648.

Сведения об авторах

АФАНАСЬЕВ Виктор Викторович, кандидат географических наук, заведующий лабораторией, УБА Алексей Владимирович, младший научный сотрудник – лаборатория береговых геосистем, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск; ЛЕОНТЬЕВ Игорь Олегович, доктор географических наук, главный научный сотрудник – лаборатория динамики берегов и шельфа, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва.