

ПОТОКИ НАНОСОВ ВДОЛЬ ЮГО-ВОСТОЧНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ БАЛТИКИ¹

Ин-т океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва; igor.leontiev@gmail.com

Введение

Объектом исследования в данной работе является район Балтики, включающий северный берег Самбийского п-ова и морской берег Куршской косы (рис. 1). Первый классифицируется как абразионно-бухтовый, а второй относится к аккумулятивному типу. Долгое время считалось, что указанные побережья развиваются под влиянием Восточно-Балтийского потока наносов, который зарождается у клифов Самбийского п-ова и действует в северном направлении на протяжении нескольких сотен километров, достигая мощности 200–250 тыс. м³/год [1, 2]. Позже высказывалось мнение, что поток значительно ослаблен из-за истощения запасов песка на дне [3]. В последние десятилетия представление о едином потоке отошло в прошлое, и доминирует концепция относительно обособленных морфо-литодинамических ячеек [4]. Выделяется, в частности, самбийско-литовская ячейка (включающая ячейки меньшего масштаба), где формируются встречные потоки, сходящиеся в центре береговых дуг [5]. Что касается количественных оценок, то они весьма локальны, значительно разнятся между собой и лишь в редких случаях опираются на современные расчетные методы [6]. Можно констатировать, что ряд вопросов, связанных с перемещением наносов вдоль рассматриваемого побережья, пока остается открытым.

Настоящая работа имеет целью представить схему вдольбереговых потоков наносов в юго-восточной Балтике на основе математического моделирования транспорта песка, генерируемого ветровым волнением в береговой зоне. В результате расчетов определяются величины и направления потоков наносов для основных волноопасных направлений (ЮЗ, З, СЗ, С и СВ), а также распределение результирующего потока вдоль исследуемого побережья. Фактически речь идет о емкости потока, т. е. его значении при наличии достаточного количества материала на дне, что должно учитываться при анализе литодинамической обстановки на конкретных береговых участках.

Увеличение (насыщение) потока наносов на каком-либо участке служит признаком размыва берега, а его уменьшение (разгрузка) свидетельствует об аккумуляции наносов. Дивергенция и конвергенция потоков указывают на отток или приток материала в данном районе и тем самым также маркируют положение зон размыва и аккумуляции вдоль рассматриваемого побережья. Сравнение полученной картины с данными наблюдений может послужить косвенной проверкой расчетных оценок.

Исходные данные

Для оптимизации расчетов исследуемый берег разделен на три сегмента (рис. 1). Батиметрической основой для расчетов служит навигационная карта м-ба 1:100000. Характерный средний размер частиц песка при расчетах принят равным 0.3 мм для самбийского берега (сегмент 1) и 0.25 мм для побережья Куршской косы (сегменты 2 и 3).

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-05-00589), а также РНФ (грант № 14-17-00547).

Источником волновых данных служит Российский морской регистр судоходства [7], где приведены сведения о годовой повторяемости различных градаций высот волн по направлениям в рассматриваемой части Балтики. На их основе составлена таблица, отражающая повторяемость (p) и суммарную годовую продолжительность (t_w) волнений различной силы для главных волноопасных направлений. Здесь $\bar{H}$ и $\bar{T}$ – средние высота и период волн в открытом море.

Наибольшую суммарную продолжительность имеют волнения ЮЗ румба, обуславливающие перемещение наносов в северо-восточном направлении. Однако экспозиция берегов такова, что влияние юго-западного волнения проявляется в полной мере лишь в северной половине Куршской косы (сегмент 3, рис. 1).

В сегментах 2 и 3 доминируют волнения западного и северных румбов, формирующие потоки противоположных направлений.

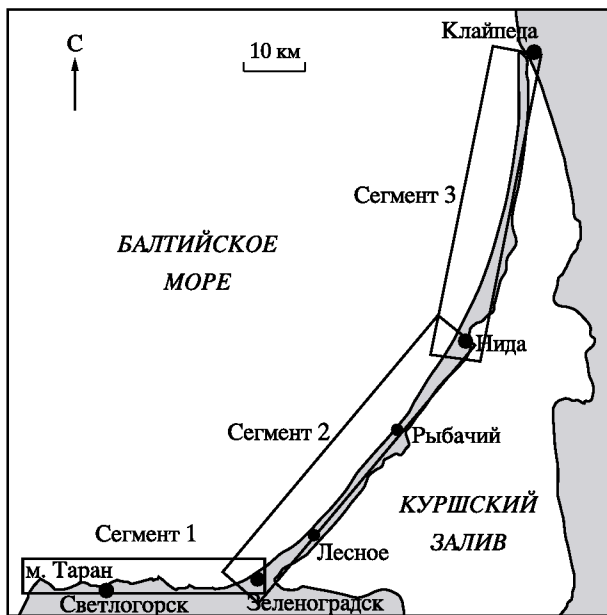


Рис. 1. Район исследования

Методика расчетов

Суммарный поток наносов Q_j , создаваемый в течение года волнениями данного направления j , определяется как

$$Q_j = \sum_i Q_i t_{wi}$$

где Q – расход наносов, а индекс i относится к данной волновой ситуации (к выбранным $\bar{H}$, $\bar{T}$ и t_w в таблице). Результирующий поток Q_Σ вычисляется суммированием Q_j по всем волноопасным направлениям j :

$$Q_\Sigma = \sum_j Q_j.$$

Расход песчаных наносов Q через данный береговой створ при данной волновой ситуации, подсчитывается по формуле [8]:

$$Q = 0.04 \mu \left(0.8 + 0.02 \frac{\sqrt{gh_B}}{w_g} \right) (EC_g)_B \sin(\Theta_B + \delta) \cos(\Theta_B + \delta),$$

где EC_g – поток энергии, $E = \frac{1}{8} \rho g H_{rms}^2$ – энергия волн, C_g – групповая скорость, H_{rms} –

среднеквадратичная высота волн, w_g – скорость осаждения наносов (гидравлическая крупность). Индекс “B” относится к глубине обрушения h_B , определяемой из условия $H_{1\%B} = 0.8 h_B$. Здесь $H_{1\%B}$ – высота волн 1% обеспеченности в системе (для рэлеевского

**Годовая повторяемость и продолжительность характерных волнений,
подходящих к берегу с различных направлений (на основе данных
Российского морского регистра судоходства [7])**

Румб	H , м	T , с	p , %	t_w , ч
ЮЗ	0.25	3.5	8.4	736
	0.7	4.2	8.5	745
	1.2	4.9	5.3	464
	1.7	5.9	2.7	237
	2.1	6.6	1.3	114
	2.6	7.6	0.5	44
	3.1	7.8	0.2	18
З	0.25	3.5	4.5	394
	0.7	4.2	4.9	429
	1.2	4.9	2.9	254
	1.7	5.9	1.3	114
	2.1	6.6	0.5	44
	2.6	7.6	0.2	18
	3.1	7.8	0.05	4
СЗ	0.25	3.5	2.2	193
	0.7	4.2	2.3	201
	1.2	4.9	1.2	105
	1.7	5.9	0.5	44
	2.1	6.6	0.2	18
	2.6	7.6	0.05	4
	3.1	7.8	0.01	1
С	0.25	3.5	3.4	298
	0.7	4.2	3.4	298
	1.2	4.9	1.8	158
	1.7	5.9	0.9	79
	2.1	6.6	0.5	44
	2.6	7.6	0.3	26
	3.1	7.8	0.12	11
СВ	0.25	3.5	5.2	456
	0.7	4.2	4.0	350
	1.2	4.9	1.7	149
	1.7	5.9	0.7	61
	2.1	6.6	0.4	35
	2.6	7.6	0.2	18
	3.1	7.8	0.08	7

распределения высот волн $H_{1\%} = 2.15H_{rms} = 2.42\bar{H}$). Обозначения Θ и δ поясняются схемой на рис. 2: Θ – угол между направлением волн и осью координат OX , направленной к берегу, δ – угол между осью OX и нормалью к берегу на данном участке, причем $\operatorname{tg}\delta = \partial\chi/\partial y$, где χ – положение береговой линии, а координатная ось OY направлена вдоль берега. Очевидно, в случае прямой береговой линии $\delta = 0$.

Если расход Q выражен в кубометрах в час, то коэффициент $\mu = 3600/[g(\rho_s - \rho)(1 - \sigma)]$, где ρ – плотность воды, ρ_s и σ – плотность и пористость осадков (для песка соответственно 2.65×10^3 кг/м³ и 0.4).

Локальные углы подхода волн Θ рассчитываются на основе закона сохранения волновых векторов:

$$\frac{\partial}{\partial x} \frac{\sin \Theta}{C} - \frac{\partial}{\partial y} \frac{\cos \Theta}{C} = 0,$$

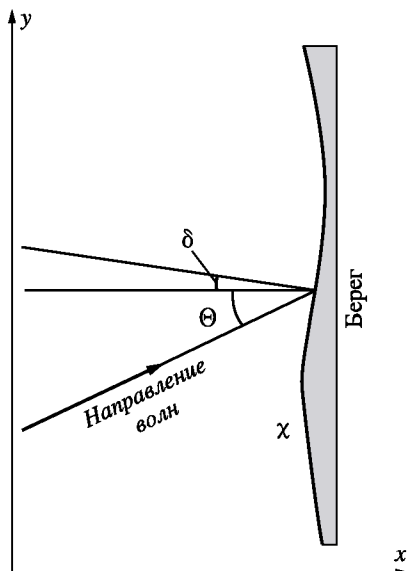
Рис. 2. Схема координат и используемых обозначений χ – положение береговой линии, Θ – угол между направлением волн и осью координат OX , направленной к берегу, δ – угол между осью OX и нормалью к берегу на данном участке

где C – фазовая скорость волн. Поле высот волн $H_{rms}(x, y)$ определяется из уравнения баланса энергии:

$$\frac{\partial}{\partial x}(EC_g \cos \Theta) + \frac{\partial}{\partial y}(EC_g \sin \Theta) = -D,$$

где D – скорость диссипации энергии [9].

Вычисления ведутся с помощью программы автора LONT-2D на прямоугольной сетке, включающей 100×100 ячеек, в узлах которой заданы глубины прибрежной акватории. Размер шагов сетки в данном случае составляет 60–80 м по нормали и 300–450 м вдоль берега. Внешняя граница расчетной области располагается на глубинах не менее 20 м. Параметры волн на границе рассчитываются по параметрам глубокой воды (приведенным в таблице) в предположении однородного рельефа дна, когда рефракция и трансформация волн подчиняются условиям $\sin \Theta / C = \text{const}$ и $EC_g \cos \Theta = \text{const}$.



Потоки наносов и их изменения вдоль берегов

Результаты расчетов представлены на рис. 3. Для каждого из выделенных береговых сегментов показаны контуры берега и изобат 10 и 20 м. Стрелки и цифры возле них отражают направление и величину результирующего потока наносов Q_Σ (тыс. $\text{м}^3/\text{год}$). В зависимости от характера изменений Q_Σ выделены зоны аккумуляции и размыва (полоски светлого и темного тонов, нанесенные вдоль горизонтальной оси координат). На нижних графиках даны распределения суммарных потоков Q_j , создаваемых волнениями различных направлений. Потоки, направленные в сторону восточных и северных румбов, рассматриваются как положительные.

Сегмент 1 (от м. Таран до г. Зеленоградска). Потоки в восточном направлении, связанные с 3 и СЗ волнениями (до 50–60 тыс. $\text{м}^3/\text{год}$ каждый), в значительной мере компенсируются противоположным потоком, обусловленным СВ волнением (до 120 тыс. $\text{м}^3/\text{год}$). Поэтому результирующий поток определяется, главным образом, перемещениями наносов при С волнении, когда единое направление переноса отсутствует. Выделяются 4 зоны конвергенции и 3 зоны дивергенции, к которым приурочены соответственно зоны аккумуляции и размыва.

Наиболее значительный потенциальный приток наносов (160 тыс. $\text{м}^3/\text{год}$) отмечается восточнее м. Таран (западный борт бухты Филино). В зоны аккумуляции, кроме того, попадают Светлогорская бухта, а также участки к востоку от м. Гвардейского и к западу от Зеленоградска. Наиболее заметный потенциальный вынос материала (240 тыс. $\text{м}^3/\text{год}$) имеет место между мысами Купальный и Гвардейский (бухта Пионерская). Размыву подвержен также выступ берега между Филинской и Светлогорской бухтами. Небольшой отток наносов имеется и в центре вогнутости берега между м. Гвардейский и Зеленоградском.

Сегмент 2 (от Зеленоградска до Ниды). Итоговые перемещения материала здесь определяются, главным образом, двумя противоположными потоками (до 140 тыс. $\text{м}^3/\text{год}$ каждый), которые возбуждаются 3 и С волнениями. Результирующий перенос невелик (в основном до 30 тыс. $\text{м}^3/\text{год}$) и представлен рядом противоположно направленных

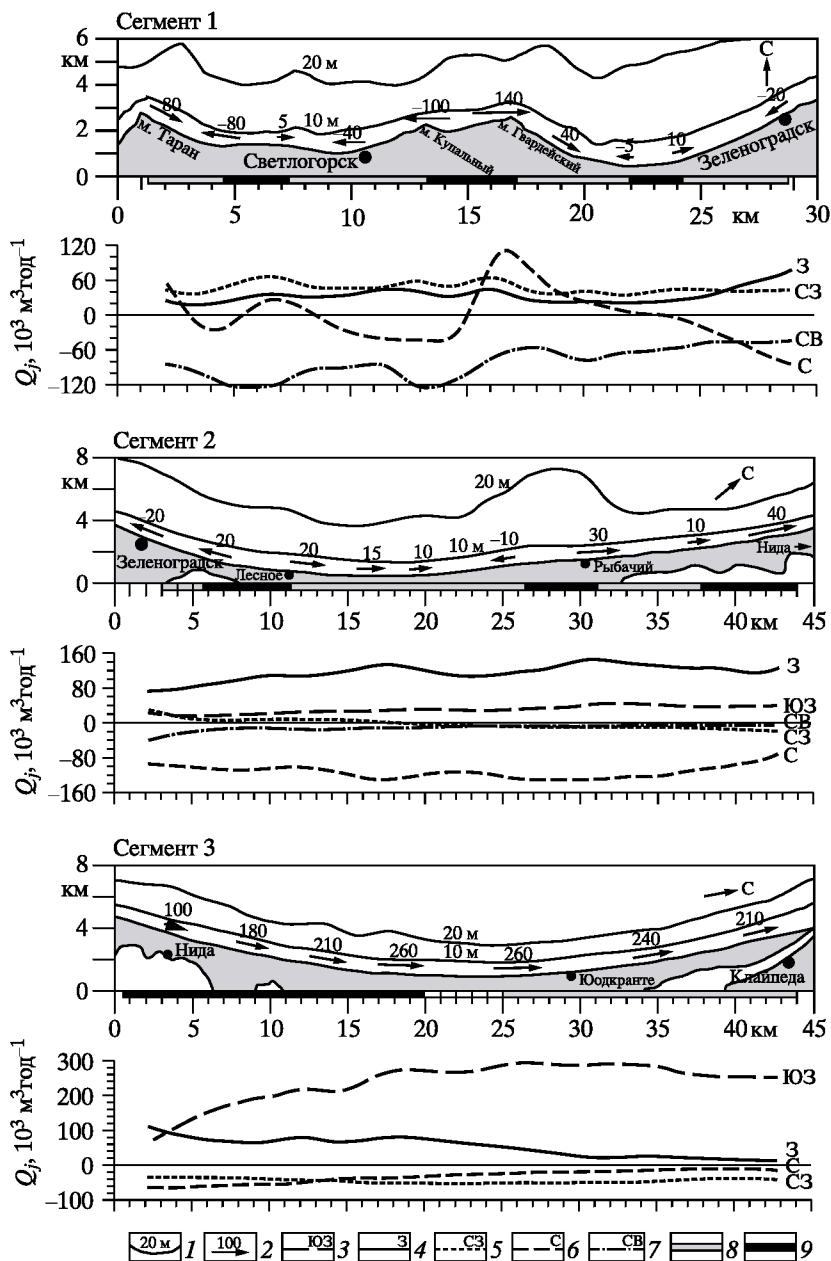


Рис. 3. Поток наносов вдоль выделенных береговых сегментов

1 – изобата, 2 – результирующий поток наносов (тыс. $\text{м}^3/\text{год}$), 3–7 – распределения потоков Q_r , формируемых волнениями различных румбов (соответственно ЮЗ, З, СЗ, С, СВ); зоны: 8 – аккумуляции, 9 – размыва. Значения потоков в восточном и северном направлениях считаются положительными

потоков, обуславливающих чередование зон дивергенции и конвергенции. Дивергенция и отток материала (40 тыс. м³/год) имеют место в корневой части Куршской косы у пос. Лесное и возле пос. Рыбачий. Размыв отмечается также напротив Ниды вследствие усиления потока в северном направлении. Протяженный участок между поселками Лесное и Рыбачий характеризуется аккумуляцией наносов.

Сегмент 3 (от Ниды до Клайпеды). Доминирующую роль здесь играет ЮЗ волнение, вызывающее интенсивное перемещение наносов на север. Потoki, связанные с остальными волнениями, значительно меньше и в основном компенсируют друг друга. Поэтому и результирующий поток действует в северном направлении. Он быстро усиливается от района Ниды, достигает максимума в середине сегмента (260 тыс. м³/год), а к району Клайпеды немного уменьшается. Соответственно в южной части рассматриваемого сегмента преобладает размыв, а в северной – аккумуляция.

Обсуждение результатов

Полученные результаты согласуются с упомянутой выше точкой зрения об отсутствии однонаправленного потока наносов в рассматриваемой части балтийского берега [4, 5]. Такой поток прослеживается только в северной половине Куршской косы, хотя, вероятнее всего, он продолжается и далее на север. Для остальной части побережья типична ячеистая структура переноса, обуславливающая чередование зон дивергенции и конвергенции потоков или, говоря иначе, зон выноса и притока материала.

Положение тех или иных зон, основанное на расчетах, в общем, согласуется с опубликованными данными наблюдений. Известно, например, что один из наиболее уязвимых участков берега находится в корневой части Куршской косы в районе пос. Лесное [10]. С позиций полученных результатов существующий здесь дефицит наносов обусловлен их выносом вследствие дивергенции вдольбереговых потоков. Та же причина, судя по рис. 3, может объяснять высокий темп абразии, наблюдаемой вблизи пос. Рыбачий, в бухте Пионерская (между мысами Купальный и Гвардейский) и у пос. Отрадное между бухтами Фирино и Светлогорской [11, 12, 13]. Береговые исследования свидетельствуют о преобладании процессов аккумуляции в западной части бухты Фирино [13] и северо-восточнее пос. Лесное [14], что с точки зрения наших результатов связано с конвергенцией потоков наносов. Наконец, в северной части Куршской косы отмечается постепенное накопление песчаного материала [15], которое, судя по рис. 3, может быть обусловлено не только влиянием молв Клайпедского порта, но и некоторой разгрузкой потока наносов в северном направлении.

Заключение

Результаты проведенных расчетов свидетельствуют о том, что структура переноса осадков вдоль берегов юго-восточной Балтики имеет довольно сложный характер и включает целый ряд ячеек с чередующимися зонами дивергенции и конвергенции потоков. В сегменте побережья от м. Таран до середины Куршской косы волнения западных и северных румбов формируют потоки до 140 тыс. м³/год, которые, однако, в значительной степени компенсируют друга. Потому итоговый перенос здесь в основном не превышает 30–40 тыс. м³/год (за исключением выступов Самбийского берега, где емкость потоков может превышать 100 тыс. м³/год). Лишь в районе Ниды под воздействием доминирующего юго-западного волнения зарождается довольно мощный протяженный поток в северном направлении (до 260 тыс. м³/год), продолжающийся, вероятно, и за пределы района исследования.

Изменения результирующих потоков наносов предопределяют чередование зон размыва и аккумуляции. Их положение, предсказанное расчетами, подтверждается опубликованными данными береговых исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кнапс Р.Я. Оградительные сооружения типа молов и движение наносов на песчаных побережьях // Изв. АН Латв. ССР. 1952. № 6 (59). С. 87–130.
2. Айбулатов Н.А., Болдырев В.Л., Зенкович В.П. Некоторые новые данные о вдольбереговых потоках наносов // XXI междунар. геол. конгресс. Доклады советских геологов. М.: Изд-во АН СССР, 1960. С. 164–174.
3. Болдырев В.Л., Гуделис В.К., Кнапс Р.Я. Потоки песчаных наносов юго-восточной Балтики // Исслед. динамики морских побережий. М.: Наука, 1979. С. 14–18.
4. Богданов Н.А., Совершаев В.А., Жиндарев Л.А., Агапов А.П. Эволюция представлений о динамике юго-восточных берегов Балтийского моря // Геоморфология. 1989. № 2. С. 62–68.
5. Бабаков А.Н. Эволюция представлений о структуре вдольбереговых потоков наносов в юго-восточной Балтике // Литодинамика донной контактной зоны океанов / Мат-лы междунар. конф., посвященной 100-летию со дня рождения проф. В.В. Лонгинова. М.: ГЕОС, 2009. С. 56–58.
6. Свиридова Е.А., Марусин К.В., Хабидов А.Ш. Динамика берегов Куршской косы, стратегия и методы их защиты // Учение о развитии морских берегов: вековые традиции и идеи современности / Мат-лы XXIII междунар. береговой конф. в честь 100-летия со дня рождения проф. В.П. Зенковича. СПб: Изд-во РГГУ, 2010. С. 324–326.
7. Российский морской регистр судоходства. Справочные данные по режиму ветра и волнения Балтийского, Северного, Черного, Азовского и Средиземного морей / Л.И. Лопатухин, А.В. Бухановский, С.В. Иванов, Е.С. Чернышева. СПб.: Гидрометеиздат, 2006. 452 с.
8. Леонтьев И.О. О расчете вдольберегового транспорта наносов // Океанология. 2014. Т. 54. № 2. С. 226–232.
9. Леонтьев И.О. Прибрежная динамика: волны, течения, потоки наносов. М.: ГЕОС, 2001. 272 с.
10. Бобыкина В.П., Болдырев В.Л. Современное состояние берегов калининградского побережья Балтики по результатам их мониторинга // Пробл. управления и устойчивого развития прибрежной зоны моря / Мат-лы XXII междунар. береговой конф. Геленджик: 2007. С. 53.
11. Болдырев В.Л., Рябкова О.И. Динамика береговых процессов на Калининградском побережье Балтийского моря // Изв. РГО. 2001. Т. 133. Вып. 5. С. 41–49.
12. Сергеев А.Ю. Особенности морфо-литодинамических процессов подводного берегового склона Куршской косы и их возможная связь с изменениями береговой линии // Учение о развитии морских берегов: вековые традиции и идеи современности / Мат-лы XXIII междунар. береговой конф. в честь 100-летия со дня рождения проф. В.П. Зенковича. СПб: Изд-во РГГУ, 2010. С. 131–133.
13. Корзинин Д.В. Динамика рельефа береговой зоны северного побережья Самбийского полуострова (юго-восточная Балтика): Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2012. 25 с.
14. Жамойда В.А., Рябчук Д.В., Кропачев Ю.П. и др. Проявления современных литодинамических процессов в береговой зоне Куршской косы // Пробл. изуч. и охраны природного и культурного наследия нац. парка “Куршская коса” / Сб. науч. статей. Калининград: Изд-во РГУ, 2008. Вып. 6. С. 149–166.
15. Жаромский Р., Гульбинский С. Особенности береговой зоны Куршской косы в условиях природного и антропогенного воздействия // Учение о развитии морских берегов: вековые традиции и идеи современности / Мат-лы XXIII междунар. береговой конф. в честь 100-летия со дня рождения проф. В.П. Зенковича. СПб: Изд-во РГГУ, 2010. С. 316–318.

Поступила в редакцию 11.04.2014

SEDIMENT FLUXES ALONG THE SOUTH-EASTERN COAST OF THE BALTIC SEA

I.O. LEONT'YEV

Summary

The study is aimed at determination of magnitudes and directions of sediment fluxes along the coasts of Sambian Peninsula and Curonian Spit by using the calculations of wave-induced sediment transport in a coastal zone. On the base of available data on nearshore bathymetry and wave regime the distributions of both the total fluxes for main wave directions and net sediment flux are computed. It is shown that sediment transport along the studied coasts break up into a number of cells with alternating zones of divergence and convergence. Unidirectional sediment flux is traced only in the northern section of Curonian Spit (up to $260 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{year}$). Predicted location of the erosion and accretion zones associated with changes in the net sediment flux is confirmed by the published observed data.