

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ГЕОМОРФОЛОГИЯ

УДК 551.435.3(262.5)

© 2013 г. И.О. ЛЕОНТЬЕВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ БЕРЕГА
ИМЕРЕТИНСКОЙ НИЗМЕННОСТИ¹

Введение

Берег Имеретинской низменности, расположенной в междуречье Мзымты и Псоу, для краткости будем именовать Имеретинским. В период позднего голоцена он постепенно выдвигался в море за счет поступления аллювиального материала из устья р. Мзымта, и восточный вдольбереговой поток распределял поступающие наносы по всему побережью. Выдвижение берега маркируется серией береговых валов, которые хорошо прослеживаются в рельефе низменности. Процесс продолжался до тех пор, пока берег не подошел к свалу глубин – круто наклоненному участку дна, по которому поступающий материал стал уходить на глубину. Тогда установилось своего рода равновесие, при котором приток наносов стал компенсироваться его стоком в подводные каньоны, и положение берега стабилизировалось. Однако в XX в. в результате изъятия гравия и гальки для строительных нужд баланс был нарушен, берега начали отступать, а верховья каньонов стали врезаться в береговой склон и приближаться к берегу. Неблагоприятная обстановка еще более ухудшилась после строительства порта, который полностью отсек приток гравийно-галечного материала из устья р. Мзымты. Негативные последствия пока не проявились в полной мере, так как одновременно на пляж были отсыпаны значительные объемы гравия и гальки (на протяжении 5–6 км берега).

Целью настоящей работы является выяснение тенденций развития Имеретинского побережья при существующих условиях на основе математического моделирования литодинамических процессов. Одна из главных задач заключается в определении потока наносов и его изменений вдоль берега.

Ранее автором проводилось подобное моделирование [1], которое, однако, опиралось на недостаточно детальные данные по волнению и не включало эффект рефракции волн над подводными каньонами. Эти ограничения послужили стимулом для проведения данного исследования.

Исходные данные

Для характеристики волнового режима в районе Имеретинского берега используются данные Российского морского регистра судоходства [2], на базе которых составлена таблица 1. Она отражает годовую продолжительность (t_w) волнений различной

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Проекта Минобрнауки “Разработка технологии создания автоматизированной информационной системы мониторинга состояния береговых зон морей и внутренних водоемов Российской Федерации” (гос. контракт № 16.515.11.5075).

**Годовая продолжительность (в часах)
характерных волнений, подходящих к берегу
с различных направлений (по данным Российского
морского регистра судоходства [2])**

Румб	H , м	T , с	t_w , ч
ЮВ	0.25	3.2	236
	0.7	4.3	131
75°	1.2	5.2	26
	1.7	6.5	1.8
Ю	0.25	3.2	245
	0.7	4.3	184
30°	1.2	5.2	61
	1.7	6.5	18
ЮЗ	2.1	7.1	2.6
	0.25	3.2	657
-15°	0.7	4.3	569
	1.2	5.2	272
	1.7	6.5	81
	2.1	7.1	27
	2.6	8.0	8.7
	3.1	8.5	3.5
З	0.25	3.2	972
	0.7	4.3	710
-60°	1.2	5.2	263
	1.7	6.5	94
	2.1	7.1	34
	2.6	8.0	12
	3.1	8.5	2.6

силы для главных волноопасных направлений (H и T – средние высота и период волн). Здесь также отмечены углы подхода волн по отношению к нормали к генеральному направлению береговой линии. Отрицательные углы соответствуют распространению волн с западной стороны.

Очевидно, доминируют волнения З и ЮЗ румбов. Соотношение их продолжительностей принято таким, каким оно бывает в наиболее штормовой месяц года (январь).

При расчетах трансформации и рефракции волн использовались данные батиметрических съемок, выполненных в последние годы.

Имеретинский берег в целом приглубый, и сложен в основном галечным материалом с примесью гравия и песка. Можно ожидать, что в результате произведенных отсыпок гальки крупность наносов в целом увеличилась, так как добавленный материал, согласно проекту, должен был иметь размер от 40 до 120 мм. Размер гальки при расчетах принимался равным 50 мм.

Методика

Результирующий вдольбереговой поток наносов Q_Σ определяется как сумма элементарных потоков, проходящих через заданный створ,

$$Q_\Sigma = \sum_j \sum_i (Q t_w)_{ij}, \quad (1)$$

где индексы j и i относятся к данному направлению и данной градации высот волн, имеющей годовую продолжительность t_w . Под величиной Q_Σ подразумевается емкость потока при полном насыщении наносами.

Продольный расход Q , создаваемый отдельными волновыми ситуациями, подсчитывается по формуле автора [3], адаптированной к условиям гравийно-галечного материала (размер частиц $1 \leq d_g \leq 100$ мм):

$$Q = 0.04\mu \left(1 - 25 \frac{d_g}{H_{rmsB}} \right) (EC_g)_B \sin \Theta_B \cos \Theta_B, \quad (2)$$

где EC_g – поток энергии, $E_B = \frac{1}{8} \rho g H_{rmsB}^2$ – энергия волн, $C_{gB} = \sqrt{gh_B}$ – групповая скорость, g – ускорение силы тяжести, ρ – плотность воды, Θ – угол между направлением волн и нормалью к берегу. Индекс B относится к глубине h_B , соответствующей обрушению волн 1% обеспеченности ($H_{1\%B} = \gamma_B h_B$, $\gamma_B = 0.8$). С учетом распределения

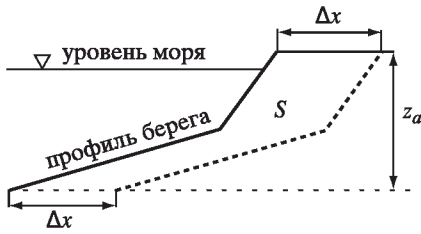


Рис. 1. Схема к расчету смещений береговой линии (обозначения в тексте)

Рэля $H_{rmsB} = (\gamma_B/2.16)h_B$. Коэффициент μ согласует размерности обеих частей формулы (2), и если Q выражен в $\text{м}^3\text{ч}^{-1}$, то $\mu = 3600/[g(\rho_s - \rho) \times (1 - \sigma)]$, где ρ_s и σ – плотность и пористость осадков.

Поле среднеквадратичных высот волн $H_{rms}(x, y)$ определяется из уравнения баланса энергии,

$$\frac{\partial}{\partial x}(EC_g \cos \Theta) + \frac{\partial}{\partial y}(EC_g \sin \Theta) = -D, \quad (3)$$

а углы подхода волн рассчитываются на основе закона сохранения волновых векторов:

$$\frac{\partial \sin \Theta}{\partial x} \frac{1}{C} - \frac{\partial \cos \Theta}{\partial y} \frac{1}{C} = 0, \quad (4)$$

где оси OX и OY направлены по нормали и вдоль берега, D – скорость диссипации энергии, C – фазовая скорость волн [3].

Градиент потока наносов, $\partial Q_\Sigma / \partial y$, служит показателем размыва ($\partial Q_\Sigma / \partial y > 0$) или аккумуляции ($\partial Q_\Sigma / \partial y < 0$). В первом случае берег отступает, а во втором – выдвигается. Расчет величины смещения поясняется схемой, показанной на рис. 1. Пусть активная часть берегового профиля высотой z_a отступает за год на расстояние Δx . Тогда площадь S , заключенная между начальным и конечным положениями профиля, эквивалентна годовому объему потерь материала на единицу длины берега, т.е. $S = \partial Q_\Sigma / \partial y$. С другой стороны, эта площадь выражается произведением $S = z_a \Delta x$, откуда смещение берега определяется как

$$\Delta x = \frac{1}{z_a} \frac{\partial Q_\Sigma}{\partial y}. \quad (5)$$

Величина z_a представляет сумму возвышения пляжа z_b и глубины замыкания h_* , ограничивающей область штормовых деформаций: $z_a = z_b + h_*$. Глубина h_* оценивается как $h_* = 2H_{0.14\%}$, где $H_{0.14\%}$ – значительная высота волн с годовой обеспеченностью 0.14% (действующая 12 ч в году) [3].

Результаты

Результаты проведенных расчетов представлены на рис. 2. На верхнем графике показаны контур берега и изобата 20 м, а также направления потоков наносов. Средний график отражает изменения результирующего потока наносов вдоль побережья. Нижний график представляет градиент результирующего потока, $\partial Q_\Sigma / \partial y$.

Поток наносов. Результирующий поток представляет алгебраическую сумму потоков в западном и восточном направлениях, причем восточный перенос в принятой системе координат считается отрицательным. И поскольку доминируют З и ЮЗ волнения, результирующий поток оказывается восточным и имеет отрицательную величину. Поток зарождается непосредственно за восточным молот порта. Как видно по положению изобаты 20 м (рис. 2), волны испытывают значительную рефракцию при распространении над каньоном Новым. В результате концентрации энергии на его восточном крае емкость потока быстро увеличивается от нуля до 40 тыс. $\text{м}^3\text{год}^{-1}$. Здесь отмечается значительный градиент, означающий дефицит материала и размыв более 60 м^3 на метр длины берега в год ($\text{м}^3\text{м}^{-1}\text{год}^{-1}$).

Далее контур берега меняет экспозицию, и поток наносов резко затухает. В зоне разгрузки потока происходит накопление материала в объеме более 100 $\text{м}^3\text{м}^{-1}\text{год}^{-1}$. По-

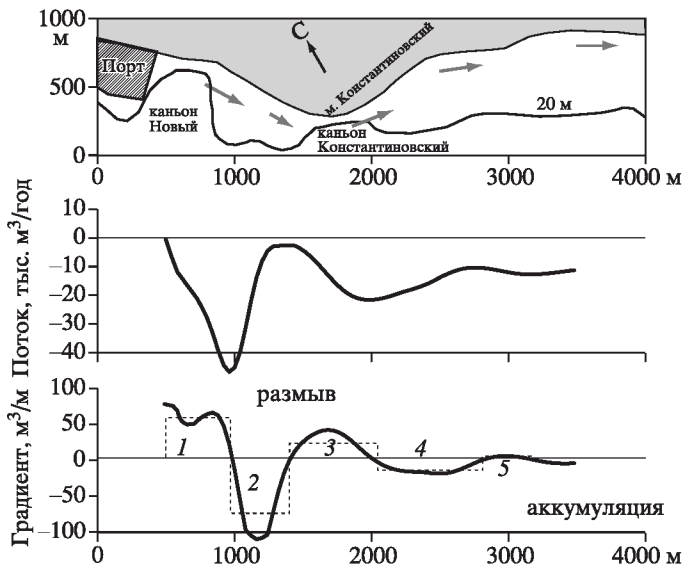


Рис. 2. Изменения потока наносов вдоль Имеретинского побережья

ложение зоны аккумуляции коррелирует с относительно пологим подводным склоном на данном участке (см. верхний график на рис. 2).

В районе м. Константиновского береговая линия поворачивает на восток, и поток наносов снова быстро увеличивается до 20 тыс. $\text{м}^3/\text{год}^{-1}$. Отчасти это обусловлено рефракцией волн и концентрацией энергии у восточного края каньона Константиновского, расположенного напротив мыса. В зоне насыщения потока происходит размыв в объеме до $40 \text{ м}^3 \text{ м}^{-1} \text{ год}^{-1}$. К этой величине добавляется размыв за счет стока материала в каньон.

Далее к востоку поток уменьшается (снова в связи с изменением экспозиции берега) и затем колеблется около значения 12 тыс. $\text{м}^3/\text{год}^{-1}$. Следует отметить, что принятый при расчетах сравнительно крупный размер гальки (50 мм), вообще говоря, более характерен для участков берега, соседствующих с подводными каньонами. Здесь относительно мелкие фракции вымываются и уносятся на глубину, поскольку уклоны дна для них слишком велики. (Профиль равновесия для мелких частиц должен иметь меньший уклон.) К востоку от м. Константиновского средний размер гальки, скорее всего, уменьшается, и фактический поток может быть больше расчетного, что, однако, не должно заметно сказываться на общем тренде развития берега.

Потери материала и смещения берега. Итак, на рассматриваемом сегменте побережья выделяется, по меньшей мере, пять участков с чередующимися размывом и аккумуляцией (они обозначены цифрами на нижнем графике рис. 2), которые охарактеризованы в таблице 2. Здесь указаны размер участка и усредненный в его пределах градиент потока наносов. Представлен суммарный объем размыва или аккумуляции, подсчитанный как произведение среднего градиента на длину участка. Помимо этого в скобках даны дополнительные объемы выноса материала в каньоны Новый (уч. 1) и Константиновский (уч. 3), согласно данным Пешкова [4].

Для подсчета скоростей смещения берега по формуле (5) нужно оценить высоту активного профиля z_a . Согласно данным таблицы 1, средняя высота волн, действующих 12 ч в году, составляет 2.9 м. Значит, в соответствии с распределением Рэлея $H_{s0.14\%} = 4.6$ м, и глубина замыкания $h_* = 9.2$ м. Следовательно, при характерном возвышении пляжа $z_b = 2.5\text{--}3$ м имеем $z_a \approx 12$ м.

Вычисленные скорости смещения береговой линии приведены в нижней строке таблицы 2. В скобках даны скорости отступления берега за счет ухода материала в

**Объемы размыва и аккумуляции, а также смещения береговой линии
на выделенных участках Имеретинского берега**

Номер участка	1	2	3	4	5
Длина участка, м	500	400	650	800	300
Средний градиент потока наносов, м ³ м ⁻¹ год ⁻¹	60	-75	25	-13	5
Суммарный объем размыва (+) или аккумуляции (-), тыс. м ³ год ⁻¹	30.0 (+13.0)	-30.0	16.2 (+17.5)	-10.4	1.5
Отступление (+) или выдвигание (-) берега, м год ⁻¹	5.0 (+2.2)	-6.2	2.1 (+2.2)	-1.1	0.4

каньоны. Эти значения, очевидно, должны суммироваться с величинами, связанными с градиентом вдольберегового потока.

Как видно из таблицы 2, насыщение потока на участке 1 обуславливает дефицит 30 тыс. м³год⁻¹. В сумме с выносом в каньон потери материала составляют 43 тыс. м³год⁻¹. Берег здесь отступает с максимальной скоростью более 7 м год⁻¹.

Еще один “неблагополучный” участок 3 располагается в районе каньона Константиновский (рис. 2), где отмечается суммарный объем дефицита 34 тыс. м³год⁻¹, и берег отступает со скоростью более 4 м год⁻¹.

На участке 2 имеет место аккумуляция (30 тыс. м³год⁻¹), и береговая линия должна была бы выдвигаться в море со скоростью около 6 м год⁻¹, что, однако, не подтверждается наблюдениями. По-видимому, использованный способ оценки смещения в данном случае не применим. Вероятно, аккумулярованный материал распределяется по подводному склону и затем выносятся в каньоны, не вызывая заметных изменений береговой линии.

Восточнее мыса Константиновский объемы потерь и аккумуляции наносов резко уменьшаются, то же относится к смещениям берега. На участке 4, расположенном в тени мыса, берег выдвигается со скоростью 1.2 м год⁻¹, а на участке 5 смещения берега не выходят за пределы 0.5 м год⁻¹ и едва ли имеют существенное значение.

В заключение отметим, что полученные результаты предсказывают более высокие скорости размыва на самых опасных участках 1 и 3 по сравнению с оценкой, сделанной ранее [1].

Заключение

Таким образом, современное развитие рассмотренного сегмента Имеретинского побережья характеризуется быстрым отступанием береговой линии и врезанием бухты напротив каньона Новый (со скоростью 7 м год⁻¹). Одновременно срезается выступ у м. Константиновского (со скоростью 4 м год⁻¹), причем продукты размыва в основном уходят в каньоны. Немаловажную роль в литодинамических процессах играет рефракция волн, вызывающая концентрацию энергии и увеличение емкости вдольберегового потока наносов у восточных бортов каньонов Новый и Константиновский. Поскольку врезание бухты идет быстрее, то со временем экспозиция берега может измениться настолько, что поток наносов перед м. Константиновским прекратится и сменит направление на обратное (на западное). Это ускорит размыв у мыса и, возможно, несколько замедлит врезание бухты.

Следует отметить, что наблюдения подтверждают весьма опасное состояние берега на участке 1. Для его укрепления в настоящее время используются бетонные тетраподы, благодаря которым берег утратил рекреационную ценность. Однако эта мера не устраняет дефицит наносов и не препятствует продвижению каньона Новый в сторону суши. Если не принять срочных мер, то построенная защитная дамба на берегу в ближайшие годы будет прорвана.

Для сохранения пляжей на обозначенных проблемных участках необходима подсыпка галечного материала в объеме дефицита. Дефицит вследствие выноса вдоль берега на участках 1 и 3 составляет соответственно $60 \text{ м}^3\text{м}^{-1}\text{год}^{-1}$ и $25 \text{ м}^3\text{м}^{-1}\text{год}^{-1}$. Дефицит вследствие ухода материала в каньоны оценивается как $26\text{--}27 \text{ м}^3\text{м}^{-1}\text{год}^{-1}$. Следовательно, потребуется подсыпать около $90 \text{ м}^3\text{м}^{-1}\text{год}^{-1}$ на участке 1 и около $50 \text{ м}^3\text{м}^{-1}\text{год}^{-1}$ на участке 3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Леонтьев И.О. Влияние порта на динамику Имеретинского берега // Int. Journ. for Computational Civil and Struct. Engineering. 2011. V. 7. Issue 2. P. 85–89.
2. Справочные данные по режиму ветра и волнения Балтийского, Северного, Черного, Азовского и Средиземного морей // Российский морской регистр судоходства / Л.И. Лопатухин, А.В. Бухановский, С.В. Иванов, Е.С. Чернышева. 2006. 452 с.
3. Леонтьев И.О. Прибрежная динамика: волны, течения, потоки наносов. М.: ГЕОС, 2001. 272 с.
4. Пешков В.М. Галечные пляжи неприливных морей. Основные проблемы теории и практики. Краснодар: Эд Арт Принт, 2005. 444 с.

Ин-т океанологии РАН

Поступила в редакцию
10.05.2012

MODELING THE COAST DYNAMICS OF THE IMERETINSKAYA LOWLAND

I.O. LEONT'YEV

Summary

It is shown that the coastline near the canyon Novyi is characterized by a rapid recession (about 7 m/y). Simultaneously the coast prominence at Cape Konstantinovskiy is truncated (4 m/y), and the eroded material is mainly transported into adjacent canyons. At the east ledges of the canyons Novyi and Konstantinovskiy the wave refraction leads to the energy concentration and the increase of longshore drift capacity. Because of intensive incision the drift of deposits will after sometime run out. In order to save the beaches a pebble material should be placed into eroded coast sections (90 and $50 \text{ м}^3\text{м}^{-1}\text{y}^{-1}$, respectively).

УДК 551.435.1:551.438.5:625.74(282.251.2)

© 2013 г. П.Н. РЕЗНИКОВ

ДЕФОРМАЦИИ РУСЕЛ ПОЛУГОРНЫХ РЕК В МЕСТАХ МОСТОВОГО СТРОИТЕЛЬСТВА (НА ПРИМЕРЕ РЕК ВОСТОЧНОЙ ХАНДЫГИ И АБАКАНА)

Постановка проблемы

Потребность в прогнозе русловых деформаций возникает при проектировании любых инженерных сооружений на реках, в том числе мостовых переходов, и отражена в многочисленных нормативных документах, содержащих методики их прогноза и учеты [1–4]. Однако на практике при проектировании часто возникают сложности, связанные с недостаточной изученностью пересекаемых рек, пробелами в нормативных методиках или недостатком квалификации тех, кто этот прогноз должен осуществлять. В частности, трудности вызывает прогноз деформаций русел рек, формирующихся в условиях горного или предгорного рельефа.