

УДК 551.435.3

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ БЕРЕГОВ АНАПСКОЙ ПЕРЕСЫПИ

© 2020 г. И. О. Леонтьев<sup>1</sup>, \*, Т. М. Акивис<sup>1</sup>, \*\*

<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

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

\*\*e-mail: akivis@yandex.ru

Поступила в редакцию 08.12.2017 г.

После доработки 16.11.2019 г.

Принята к публикации 16.12.2019 г.

Рассматриваются тенденции современного развития берегов Анапской пересыпи на базе моделирования транспорта наносов и морфодинамических процессов. Показано, что продольное перемещение наносов не оказывает решающего влияния на поведение берегов, которые в большинстве своем отстают, несмотря на аккумуляцию материала за счет разгрузки вдольбереговых потоков. Вероятная причина заключается в повышении относительного уровня моря за счет, главным образом, тектонических процессов. Предложенная модель берегового барьера, перемещающегося вслед за ходом уровня, в определенной мере объясняет наблюдаемые тенденции.

**Ключевые слова:** вдольбереговой поток наносов, аккумуляция, отступление берега, повышение уровня моря, модель берегового барьера

**DOI:** 10.31857/S0030157420020069

### ВВЕДЕНИЕ

Анапская пересыпь представляет собой относительно замкнутую литодинамическую систему, ограниченную мысом Железный Рог на севере и мысом Анапский – на юге. В прошлом приходная часть бюджета наносов во многом определялась притоком материала с подводного склона, источником которого служили аллювиальные отложения пра-Кубани, а также ракуша, образующаяся в результате жизнедеятельности морских организмов. Важный вклад вносился поставкой материала с берега в результате абразии коренных участков и разрушения эоловых форм [4].

В настоящее время указанные источники в значительной мере истощены, и доминирует расходная часть бюджета. Она определяется, главным образом, истиранием и измельчением материала с последующим выносом его от берега во взвешенном состоянии. Некоторая часть песка изымается из системы за счет эоловой аккумуляции в дюнном поясе, а также в результате хозяйственной деятельности человека [4].

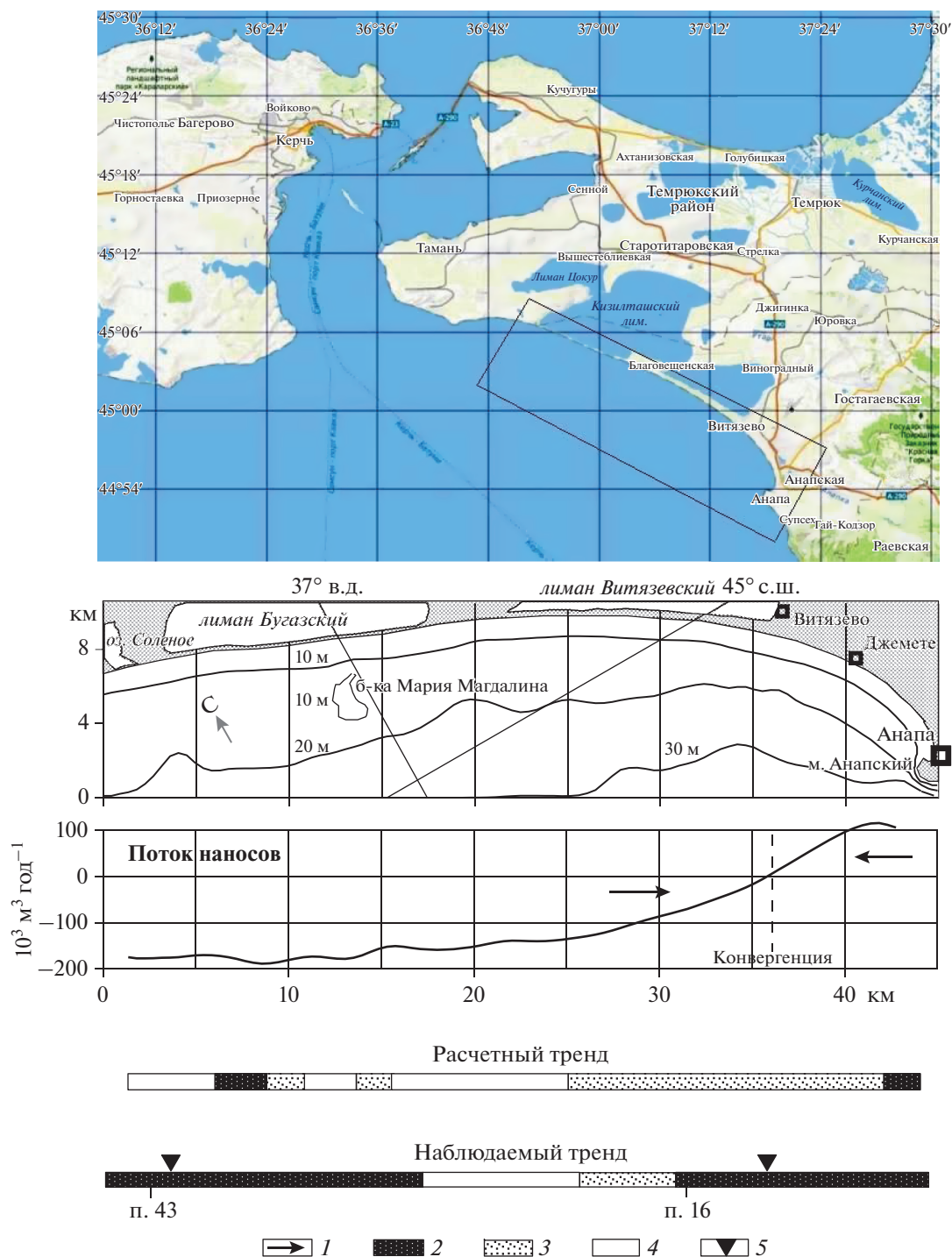
Таково положение с бюджетом наносов в целом. Однако в локальном плане динамика берегов не однородна. Благодаря вдольбереговым потокам наносов, которые перераспределяют имеющийся в наличии материал, в одних сегментах побережья может усиливаться дефицит наносов, а в других – создаваться избыточное питание. Для

выделения соответствующих сегментов необходимо получить представление о свойствах потоков вдоль изучаемого побережья, что является одной из целей настоящей работы. Другая цель заключается в выяснении роли изменений относительного уровня моря в тренде современного развития берегов Анапской пересыпи. Обозначенные проблемы решаются с помощью математического моделирования на базе имеющихся данных о рельефе дна, осадках и режимных характеристиках волнения.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исходная батиметрия прибрежной области основывается на навигационной карте масштаба 1 : 150000. Расчетная область имеет форму прямоугольника, ориентированного вдоль генерального направления береговой линии и имеющего размеры 45 км вдоль берега и 10.5 км по нормали. Район исследования, план берега и изобат приведены на рис. 1. Внешняя граница области проходит по глубинам 20–30 м. Боковыми границами служат створы вблизи оз. Соленого и мыса Анапского.

Источником данных о волновом климате в рассматриваемом северо-восточном районе Черного моря служит справочник [11], на основе которого составлена приведенная ниже таблица 1.



**Рис. 1.** План района исследования, потоки наносов и тенденции изменений берегов по результатам расчетов и наблюдений. 1 – направление потока, 2, 3 и 4 – размыв, аккумуляция и слабые изменения соответственно, 5 – участки максимального отступления берега, согласно наблюдениям.

Здесь отражена суммарная годовая продолжительность  $t_w$  волновых ситуаций, которые характеризуются различными средними высотами и периодами ( $\bar{H}$  и  $\bar{T}$ ), а также направлениями. Наибольшую продолжительность имеют запад-

ные и юго-западные волнения, вызывающие вдольбереговые течения и перемещение наносов, главным образом, с запада на восток.

Берега и дно в районе Анапской пересыпи сложены преимущественно песчаными наносами с

примесь ракуши. На глубинах более 8–10 м распространены илы, ограничивающие подвижность донного грунта [6]. Указанные глубины служат ориентиром внешней границы вдольберегового потока песчаных наносов. Хотя размер твердых частиц варьирует по профилю и протяжению берега, при расчетах транспорта наносов обычно используется репрезентативное среднее значение размера  $d_g$  для всей области действия потока. В данном случае принято значение  $d_g = 0.25$  мм, характерное для приурезовой области [6], где, судя по нашим расчетам, переносится основная часть песчаного материала.

Для расчетов вдольберегового потока наносов применялась модель LONT-2D [8, 9]. Расчетная область покрывалась сеткой, включающей  $100 \times 100$  ячеек, в узлах которой задавались глубины. По заданным параметрам на внешней границе рассчитывалось волновое поле в береговой зоне и определялись характеристики волн на глубине обрушения, по которым далее вычислялись потоки наносов с учетом суммарной продолжительности действия тех или иных волновых ситуаций.

Помимо этого, на некоторых участках берега выполнялись расчеты штормовых деформаций профиля дна с помощью модели CROSS-P [8, 10].

### ВДОЛЬБЕРЕГОВОЙ ПОТОК НАНОСОВ

На рис. 1 показано распределение результирующего потока наносов, представляющего алгебраическую сумму потоков, создаваемых волнениями различных румбов. Перенос в западном направлении считается положительным, а в восточном – отрицательным. Вдоль большей части побережья поток направлен на восток и постепенно уменьшается по ходу, что в значительной мере объясняется постепенным поворотом береговой линии к югу и изменением направления подхода волн относительно нормали. В западной части пересыпи емкость потока составляет 150–200 тыс. м<sup>3</sup>/год. С приближением к створу п. Витязево перенос затухает, а восточнее материал транспортируется в противоположном направлении (около 100 тыс. м<sup>3</sup>/год вблизи Джемете). Таким образом, в районе створа Витязево имеет место конвергенция потоков.

Увеличение потока (его насыщение) означает размыв дна и берегов, а его уменьшение (разгрузка) – аккумуляцию материала. В соответствии с изменениями результирующего потока можно выделить несколько областей размыва, аккумуляции и относительно слабых изменений, отмеченных на рис. 1. В западном сегменте побережья отмечается чередование указанных областей вдоль берега. Правда, расчеты не включают участок к западу от оз. Соленого, где зарождается восточный поток наносов. Его развитие, по-види-

**Таблица 1.** Годовая продолжительность характерных волнений, подходящих к берегу с различных направлений (по данным [11])

$\bar{H}$ , м	$\bar{T}$ , с	$t_w$ , ч			
		ЮВ	Ю	ЮЗ	З
0.25	3.2	236	245	657	972
0.7	4.3	131	184	569	710
1.2	5.2	26	61	272	263
1.7	6.5	1.8	18	81	94
2.1	7.1	–	2.6	27	34
2.6	8.0	–	–	8.7	12
3.1	8.5	–	–	3.5	2.6

мому, может вызывать размыв берегов в этом районе. Центральная часть не обнаруживает заметных изменений. Восточный сегмент находится в основном в зоне аккумуляции, за исключением размываемого участка Анапского пляжа.

Следует подчеркнуть, что расчетные величины определяют емкость потока при условии достаточного запаса наносов на дне, который соответствует наносодвижущему потенциалу действующего волнения. В действительности, как уже указывалось, ощущается заметный дефицит материала песчаных фракций, что препятствует насыщению потока. Поэтому реальная его величина должна быть меньше расчетной.

Что касается расчетных изменений потока, то они в определенной мере соответствуют сложившимся представлениям, согласно которым, транспортируемый вдоль берега материал должен аккумулироваться в восточном сегменте пересыпи [4]. Вместе с тем, результаты моделирования свидетельствуют о более сложном характере процесса накопления наносов, который связан с поступлением наносов не только с западной, но отчасти и с восточной стороны. Береговой контур в районе Джемете–Анапа ориентирован таким образом, что западное волнение действует практически перпендикулярно берегу, не вызывая продольного перемещения наносов, тогда как при ЮЗ, Ю и ЮВ волнениях создаются условия для транспортировки наносов в западном направлении. Одним из источников материала для западного потока может быть Анапский пляж, который, как известно, испытывает размыв [5].

Как отмечают Косьян и Крыленко [4], перемещение наносов с западной стороны и аккумуляция их в восточном сегменте Анапской пересыпи должно было со временем привести к постепенному развороту всего берегового контура по часовой стрелке вокруг центра у Благовещенского останца. В результате изменения ориентации контура берега вдольбереговой поток, по мнению

авторов, должен был ослабевать. Результаты моделирования согласуются с этим выводом. Более того, они показывают, что в настоящее время действуют новые условия равновесия берегового контура, заставляющие часть ранее накопленных осадков перемещаться в обратном направлении.

### СРАВНЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ И НАБЛЮДАЕМЫХ ТРЕНДОВ

Представляет интерес сравнить результаты расчетов с новыми данными по динамике береговой линии, полученными Крыленко [5] на основе анализа архивных и современных материалов спутниковой съемки и аэрофотосъемки. Согласно этим данным, на побережье пересыпи выделяется ряд зон размыва, аккумуляции и относительно небольших изменений, распределение которых показано в нижней части рис. 1. Выявленные тренды охватывают период последних 50–70 лет. Отмечены места максимальных скоростей отступления береговой линии, превышающих 1 м/год.

Распределения соответствующих зон, полученные по результатам расчетов, также представлены на рис. 1 и, как видно, заметно отличаются от данных съемок. Расчеты предсказывают доминирование слабых изменений и аккумуляции, тогда как натурные данные свидетельствуют о преобладании размыва. В качестве общих черт можно отметить, например, наличие слабых изменений в районе Благовещенского останца, расположенного между лиманами Бугазский и Витязевский, размыв Анапского пляжа, а также аккумуляцию в середине Витязевской пересыпи. Наиболее серьезные расхождения касаются участка Витязево–Джемете, где расчеты предсказывают аккумуляцию, а данные съемок – размыв. То же относится к участкам Бугазской пересыпи и оз. Соленого. Что касается последнего, то, как уже отмечалось, размыв здесь может быть отчасти связан с развитием потока наносов в восточном направлении.

Расчеты потоков наносов опираются, в первую очередь, на существующий рельеф дна и волновой климат и предполагают однородность свойств наносов для всего побережья. В действительности крупность наносов варьируется вдоль пересыпи [5, 6], но эти изменения явно не способны принципиально изменить распределение потоков наносов. Общий дефицит материала, о котором говорилось выше, препятствует насыщению потоков наносов, но вряд ли решающим образом влияет на их изменения вдоль берега. Несоответствие расчетов и наблюдений, по-видимому, обуславливается иными факторами, противодействующими процессам аккумуляции.

Если на участке конвергенции (разгрузки) вдольберегового потока (пусть и не насыщенного) наблюдается размыв и отступление берега (как

на участке Витязево–Джемете), то этот феномен может быть обусловлен эоловыми процессами или антропогенным воздействием. Но, по нашему мнению, он более всего связан с повышением относительного уровня моря. Его скорость должна быть достаточной, чтобы пересилить тренд выдвигания берега вследствие аккумуляции материала при разгрузке потока. Относительный уровень, видимо, повышается и в районе Бугазский лиман–оз. Соленое, вызывая отступление берегов. В районе Благовещенского останца, расположенного между Бугазским и Витязевским лиманами, положение берега не испытывает значительных изменений, и уровень, вероятно, относительно стабилен.

Предполагаемое поведение относительного уровня можно связать только с изменениями характера тектонических процессов вдоль побережья пересыпи. Высказанные соображения коррелируют с выводами Измайлова [2], согласно которым сегменты берега в пределах Бугазского и Витязевского лиманов постепенно погружаются, тогда как район Благовещенского останца, наоборот, испытывает слабое поднятие. Заметим также, что Каплин с соавторами [3] рассматривают весь сегмент Анапской пересыпи как область опускания (со скоростью от долей мм до первых мм в год).

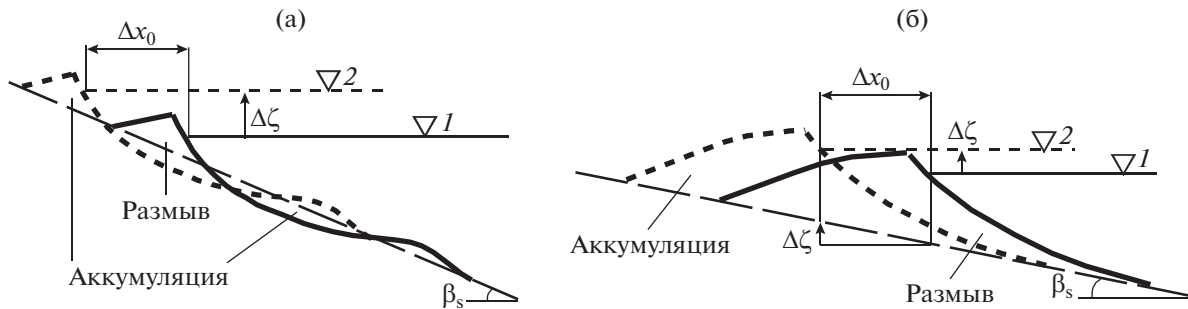
Далее попытаемся объяснить наблюдаемое поведение берегов с помощью модели берегового барьера, развивающегося в условиях повышения относительного уровня моря.

### МОДЕЛЬ БЕРЕГОВОГО БАРЬЕРА

Тенденции развития аккумулятивного берега во многом зависят от уклона его профиля  $\bar{\beta}$  по отношению к уклону  $\beta_s$  поверхности субстрата, на которой формируется аккумулятивное тело [8, 13]. В контексте рассматриваемой проблемы нас интересует эволюция берега при повышении уровня моря в двух основных случаях: 1) уклоны  $\beta_s$  и  $\bar{\beta}$  близки друг к другу; 2) уклон  $\beta_s$  заметно меньше  $\bar{\beta}$ .

Схемы соответствующих вариантов показаны на рис. 2. Подъем уровня вызывает перемещение аккумулятивного тела по поверхности субстрата. Допустим, что геометрия профиля берега при этом не меняется (свойства осадков и волновой климат остаются постоянными). Тогда в первом случае (рис. 2а) осадочный материал должен транспортироваться как вверх, так и вниз по склону, обеспечивая нулевой бюджет наносов в пределах активного профиля. Это хорошо известный вариант эволюции по схеме Брууна [12].

Во втором случае (рис. 2б) мы имеем дело с береговым барьером или баром [1, 13], который перемещается в сторону суши вслед за подъемом



**Рис. 2.** Перемещение профиля аккумулятивного тела при повышении относительного уровня моря: (а) – уклоны субстрата  $\beta_s$  и берегового склона близки друг к другу, (б) – уклон субстрата заметно меньше уклона берегового склона. 1 и 2 – последовательные положения уровня, изменение которого на величину  $\Delta\zeta$  вызывает смещение берега на расстояние  $\Delta x_0$ .

уровня и как бы “скользит” по поверхности субстрата. Осадочный материал переносится вверх по склону, причём основным механизмом его транспортировки служит перелив через гребень бара при экстремальных штормах.

Для оценки скорости смещения берега при изменениях уровня моря воспользуемся законом сохранения массы, который может быть записан в форме [7, 8]:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = Er - Ac + w, \quad (1)$$

где  $h$  – глубина воды,  $t$  – время,  $Er$  и  $Ac$  – скорости размыва и аккумуляции, обусловленные волновым воздействием,  $w = \partial\zeta/\partial t$  – скорость изменения уровня  $\zeta$ . Интегрирование (1) по длине активного профиля  $l_x$  приводит к уравнению

$$z_c \frac{\partial x_0}{\partial t} = \frac{\partial S}{\partial t} - h_* \frac{\partial x_*}{\partial t} + B - w l_x \quad (2)$$

(детали изложены в [7, 8]). Здесь  $x_0$  и  $x_*$  – положения береговой линии и глубины замыкания  $h_*$ , ограничивающей активную часть профиля со стороны моря,  $z_c$  – максимальное возвышение пляжа,  $S$  – площадь поперечного сечения профиля,  $B$  – бюджет наносов, представляющий разность объемов эрозии и аккумуляции в пределах профиля за единицу времени. Величина  $\partial x_0/\partial t$  отражает скорость смещения береговой линии и считается отрицательной, если берег отступает в сторону суши.

Свойства берегового профиля предполагаются неизменными, т.е. он сохраняет форму и перемещается как единое целое. Следовательно,  $\partial S/\partial t = 0$  и  $\partial x_*/\partial t = \partial x_0/\partial t$ , и уравнение (2) принимает вид

$$\frac{\partial x_0}{\partial t} = \frac{B - w l_x}{z_c + h_*}. \quad (3)$$

В случае эволюции по Брууну, бюджет наносов, как уже указывалось, сбалансирован ( $B = 0$ ), и скорость смещения берега определяется из (3) как

$$\frac{\partial x_0}{\partial t} = -\frac{w}{\bar{\beta}}, \quad \bar{\beta} = \frac{z_A}{l_x}, \quad z_A = z_c + h_*, \quad (4)$$

где  $z_A$  – высота активного профиля. Соотношение (4) выражает правило Брууна, согласно которому, горизонтальное смещение берега прямо пропорционально изменению уровня моря и обратно пропорционально среднему уклону профиля  $\bar{\beta}$ .

В случае берегового барьера бюджет наносов не может быть сбалансирован. Дело в том, что продвижение данной формы обеспечивается исключительно выносом наносов с берегового склона через гребень в тыловую часть барьера. Соответственно берег здесь развивается в условиях постоянного дефицита бюджета ( $B < 0$ ). Баланс восстанавливается только при стабилизации уровня моря, когда вынос материала с берегового склона прекращается.

Как видно на рис. 2б, при подъеме уровня на величину  $\Delta\zeta$  постоянство формы профиля может быть обеспечено только при перемещении барьера на расстояние  $\Delta x_0 = \Delta\zeta/\beta_s$ . Следовательно, скорость движения барьера должна определяться соотношением

$$\frac{\partial x_0}{\partial t} = -\frac{w}{\beta_s}, \quad (5)$$

которое, очевидно, представляет аналог правила Брууна (4) в условиях, когда уклон субстрата значительно меньше уклона профиля песчаного тела ( $\beta_s \ll \bar{\beta}$ ). Из уравнений (3) и (5) следует, что величина  $B$ , отражающая в данном случае дефицит наносов за счет их выноса через гребень барьера, оценивается как

$$B = z_A w \left( \frac{1}{\bar{\beta}} - \frac{1}{\beta_s} \right). \quad (6)$$

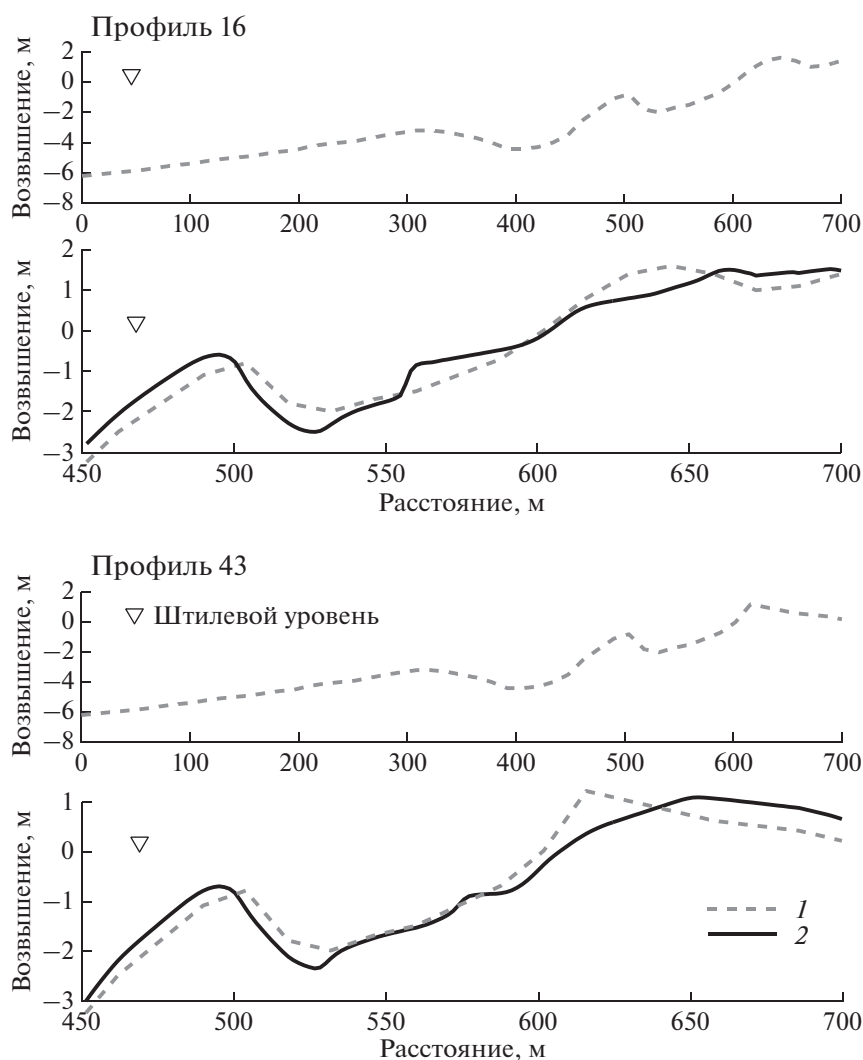


Рис. 3. Штормовые деформации профиля берега в районах Витязевской и Бугазской и пересыпей (профили 16 и 43 соответственно) при воздействии экстремального западного шторма. 1 и 2 – профили дна до и после шторма.

Абсолютное значение  $V$  возрастает с увеличением различия уклонов  $\beta_S$  и  $\bar{\beta}$ , а при их совпадении  $V$  становится равным нулю.

Применим модель берегового барьера к районам Бугазской и Витязевской пересыпей, полагая, что параметры берегового профиля  $\bar{\beta}$  и  $z_A$  здесь можно охарактеризовать величинами порядка  $10^{-2}$  и 10 м. Если допустить, что уклон субстрата  $\beta_S$  имеет порядок  $10^{-3}$ , то, согласно уравнению (5), наблюдаемая скорость отступления берегов  $\partial x_0/\partial t$  порядка  $-1$  м/год, может быть достигнута при скорости подъема уровня  $w$  порядка 1 мм/год. Что касается дефицита материала  $V$  на морском береговом склоне, то, согласно (6), он должен составлять порядка  $-10$  м<sup>3</sup> м<sup>-1</sup> год<sup>-1</sup>. Приведенные величины выглядят достаточно реалистично.

Как видно на рис. 1, в восточной части Витязевской пересыпи результирующий поток наносов уменьшается от 120 тыс. м<sup>3</sup>/год до 0 на расстоянии около 9 км. Иначе говоря, разгрузка потока обеспечивает поступление материала на данный участок в объеме примерно  $13$  м<sup>3</sup> м<sup>-1</sup> год<sup>-1</sup>, если поток насыщенный. Учитывая общий дефицит материала, снизим приведенную оценку вдвое, до  $6$  м<sup>3</sup> м<sup>-1</sup> год<sup>-1</sup>. В этом случае разгрузка потока, очевидно, не будет покрывать убыль материала, обусловленную повышением относительного уровня моря ( $-10$  м<sup>3</sup> м<sup>-1</sup> год<sup>-1</sup>), и берег будет отступать. Это в еще большей мере относится к району Бугазской пересыпи, где градиент вдольберегового потока незначителен (рис. 1), и разгрузка потока почти не влияет на темп отступления берегового барьера за счет повышения уровня.

Таким образом, гипотеза о повышении относительного уровня моря вкупе с моделью берегового барьера способна дать количественное объяснение наблюдаемого поведения берегов. Далее выясним, каким образом перемещение барьера может осуществляться на конкретных участках пересыпи.

### ШТОРМОВЫЕ ДЕФОРМАЦИИ БЕРЕГОВОГО БАРЬЕРА

Транспортировка наносов с переднего склона в тыловую часть барьера в процессе его перемещения осуществляется, как правило, двумя основными механизмами — переливом через гребень вала при экстремальных штормах и эоловым переносом. В данном случае сфокусируем внимание на первом механизме и попытаемся показать, как он реализуется практически. Для этого промоделируем штормовое воздействие на участки берега, испытывающие рецессию. Один из выбранных участков относится к Витязевской пересыпи (профиль 16), а другой — к Бугазской (профиль 43). Положение профилей показано на рис. 1, а их вид представлен на рис. 3.

Моделировалось воздействие экстремального западного шторма длительностью 12 ч. Высота волн  $\bar{H} = 3.1$  м и период  $\bar{T} = 8.5$  с соответствуют максимальным значениям параметров в таблице волнений. Предполагалось, что шторм сопровождался нагоном, высота которого составляла 0.5 и 0.8 м для профилей 43 и 16 соответственно (разница связана с различием экспозиции берега по отношению к направлению ветра и волн).

Результаты расчетов показывают, что штормовые волны вызывают перелив воды через гребень берегового вала или авандюны (рис. 3). Переливный поток размывает мористый склон авандюны и переносит материал в ее тыловую часть, в результате чего береговая линия и гребень авандюны смещаются вглубь суши. Отступление берега за один экстремальный шторм оценивается первыми десятками метров.

В периоды относительных затиший пляж, вероятно, в значительной мере восстанавливается за счет материала, приносимого к берегу волнами зыби. Авандюна также может увеличиваться в объеме за счет эолового притока материала к ее подножью. Однако гребень дюны едва ли может вернуться в прежнее положение, и изменения, вызванные экстремальным штормом, скорее всего, необратимы, тем более, в условиях постепенного повышения уровня.

Таким образом, полученные результаты показывают возможность действия механизма, обеспечивающего продвижение берегового барьера, по крайней мере, на пониженных участках пересыпи. На участках с большей высотой авандюны

движение барьера может определяться как гидродинамическими, так и эоловыми процессами.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного исследования приводят к выводу, что вдольбереговое перемещение наносов не является главным фактором динамики берегов Анапской пересыпи. Несмотря на условия, благоприятствующие аккумуляции вследствие разгрузки потоков, берега в основном отстают. Одна из вероятных причин заключается в подъеме относительного уровня моря за счет, главным образом, тектонических процессов, обуславливающих опускание определенных сегментов прибрежной суши. Модель берегового барьера, следующего за повышающимся уровнем, позволяет в какой-то мере объяснить наблюдаемое поведение берегов в районах Бугазской и Витязевской пересыпей. В районе Анапа—Джемте основным фактором, способствующим отступанию берегов, является антропогенное воздействие, вызывающее деградацию пляжа и дюнного пояса [4]. Размыв Анапского пляжа, кроме того, обусловлен природными процессами, способствующими выносу материала пляжа вдольбереговым потоком в западном направлении.

**Источники финансирования.** Работа выполнена в рамках государственного задания (тема № 0149-2019-0005) при частичной поддержке РФФИ (гранты № 18-55-3402 Куба\_т и № 18-05-00741).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зенкович В.П.* Основы учения о развитии морских берегов. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 710 с.
2. *Измайлов Я.А.* Эволюционная география побережий Азовского и Черного морей. Книга 1. Анапская пересыпь. Сочи: Лазаревская полиграфия, 2005. 174 с.
3. *Каплин П.А., Леонтьев О.К., Лукьянова С.А., Никифоров Л.Г.* Берега. М.: Мысль, 1991. 479 с.
4. *Косьян Р.Д., Крыленко В.В.* Современное состояние морских аккумулятивных берегов Краснодарского края и их использование. М.: Научный мир, 2014. 256 с.
5. *Крыленко В.В.* Новые данные по динамике морского берега Анапской пересыпи // *Океанология*. 2015. Т. 55. № 5. С. 821–828.
6. *Крыленко В.В., Косьян Р.Д., Кочергин А.Д.* Закономерности формирования гранулометрического состава донных и пляжевых отложений Анапской пересыпи // *Океанология*. 2011. Т. 51. № 6. С. 1123–1134.
7. *Леонтьев И.О.* Моделирование эволюции берегового профиля на временных масштабах от десятков до тысяч лет // *Океанология*. 2012. Т. 52. № 4. С. 588–599.

8. Леонтьев И.О. Морфодинамические процессы в береговой зоне моря. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 251 с.
9. Леонтьев И.О. Потоки наносов вдоль юго-восточного побережья Балтики // Геоморфология. 2015. № 1. С. 70–76.
10. 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.
11. Российский морской регистр судоходства. Справочные данные по режиму ветра и волнения Балтийского, Северного, Черного, Азовского и Средиземного морей / Под ред. Лопатухина Л.И. и др. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 2006. 452 с.
12. 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.
13. Cowell P.J., Roy P.S., Jones R.A. Simulation of large-scale coastal change using a morphological behavior model // Marine Geol. 1995. V. 126. P. 45–61.

## Modelling of Coastal Dynamics of the Anapa Bay-Bar

I. O. Leont'yev<sup>a, #</sup>, T. M. Akivis<sup>a, ##</sup>

<sup>a</sup>*Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia*

<sup>#</sup>*e-mail: igor.leontiev@gmail.com*

<sup>##</sup>*e-mail: akivis@yandex.ru*

Trend of recent development of the Anapa bay-bar is considered on a base of sediment transport and morphodynamic processes modeling. It is shown that alongshore sediment transport does not have a crucial influence on the coastal dynamics. The most of coastlines undergo degradation in spite of accumulation due to unloading of the longshore sediment flux. The probable reason is the relative sea level rise due mainly to tectonic processes. The proposed model of the coastal barrier following the sea level move explains to certain extent the observed trends.

**Keywords:** longshore sediment flux, accretion, coast recession, sea-level rise, model of coastal barrier