

УДК 551.435.32

## РИТМИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ КОНТУРА БЕРЕГА В ЗАЛИВЕ ТЕРПЕНИЯ ОСТРОВА САХАЛИН

© 2019 г. И. О. Леонтьев<sup>1\*</sup>, В. В. Афанасьев<sup>2\*\*</sup>, А. В. Уба<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

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

\*\*e-mail: vvasand@mail.ru

Поступила в редакцию 21.03.2018 г.

После доработки 31.05.2018 г.

Принята к публикации 02.07.2018 г.

Рассматриваются результаты многолетних наблюдений за системой мегафестонов на одном из участков побережья залива Терпения о. Сахалин. Характерный шаг ритмических форм составляет около 800 м, а размах колебаний береговой линии достигает 40–50 м. Несмотря на значительные флуктуации в масштабах сезонов, лет и десятилетий, основные морфологические черты системы сохраняются уже в течение более 60 лет. Представлена модель, объясняющая развитие ритмических форм механизмом самоорганизации рельефа под воздействием волн. Показано, что развитие мегафестонов тесно связано с формированием циркуляционных ячеек, благодаря которым небольшое начальное возмущение контура берега способно увеличиваться со временем. Положительная обратная связь между рельефом и гидродинамикой возникает при определенном соотношении между длиной начального возмущения, шириной прибойной зоны и скоростями прибрежных течений. Сделан вывод, что система мегафестонов в заливе Терпения поддерживается главным образом умеренными волнениями с высотой значимых волн около 1.6 м.

**Ключевые слова:** контур берега, мегафестоны, циркуляционные ячейки, самоорганизация рельефа дна

**DOI:** 10.31857/S0030-1574593497–505

### ВВЕДЕНИЕ

Ритмические или периодические структуры, проявляющиеся как волнообразные возмущения контура береговой линии, наблюдаются на многих аккумулятивных побережьях морей и крупных озер. К таким структурам относятся, например, пляжевые фестоны, мегафестоны, вдольбереговые песчаные волны, а также серии кос. Если первые из них обладают сравнительно небольшими размерами, то остальные из перечисленных представляют достаточно крупные аккумулятивные образования с шагом вдоль берега порядка сотен метров и амплитудой вдоль нормали к берегу порядка десятков метров. Так, вдольбереговые песчаные волны проявляются как чередующиеся зоны аккумуляции и размыва берега, перемещающиеся в направлении результирующего потока наносов. На берегах Голландии и о. Лонг-Айленд скорости перемещения волн измеряются сотнями метров в год [16, 20]. В отличие от песчаных волн, мегафестоны демонстрируют лишь миграции вдоль берега.

Однако и эти движения вызывают вертикальные деформации прибрежного рельефа, измеряемые первыми метрами, что приходится учитывать в инженерной практике. Система мегафестонов с четко выраженным шагом 500–600 м наблюдается, например, на о. Нантакет (Атлантическое побережье США) [11]. В Татарском проливе наблюдаются гибридные периодические формы длиной несколько километров, сочетающие в себе системы крупномасштабных мегафестонов и кос [7].

Встречаются и гигантские ритмические структуры, формировавшиеся, по-видимому, на протяжении многих сотен лет. Впечатляет, в частности, система фестонов на побережье Северной Каролины (южнее мыса Гаттерас) с шагом около 100 км [11]. Примером гигантских ритмических образований может служить и серия песчаных кос северного побережья Азовского моря, отстоящих друг от друга на расстоянии около 30 км и выдвинутых в море на 10–15 км [7].

В данной работе речь идет о мегафестолах, которые зафиксированы на многих участках (более 30) побережья о. Сахалин. В большинстве случаев наблюдаемые образования нестабильны, они могут появляться и исчезать в течение года или нескольких лет. Единственный участок побережья, где система мегафестонов сохраняется в более или менее неизменном виде в течение длительного времени, располагается в районе пос. Взморье на побережье залива Терпения [2] (рис. 1).



Рис. 1. Система мегафестонов у пос. Взморье в заливе Терпения.

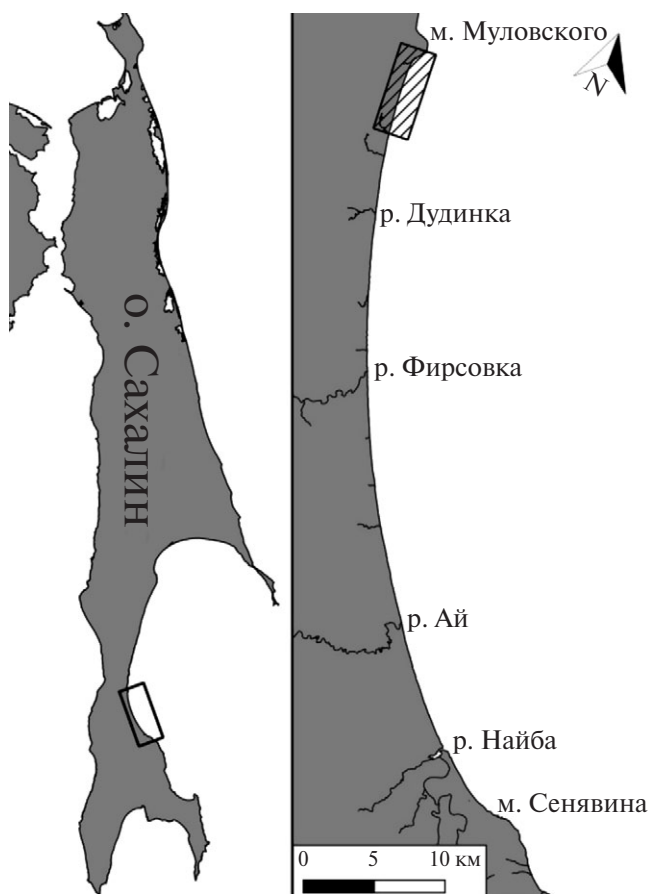


Рис. 2. Расположение района исследований.

Наличие мегафестонов приводит к неравномерному распределению пляжевого материала вдоль берега [4]. Ширина пляжа на выступах берега (мысах) достигает 45–90 м, а в вогнутостях (бухтах) между мысами она не превышает 3–8 м (в фазу прилива). В результате в бухтах авандюна и морская терраса нередко испытывают размыв, а берег отступает, хотя в целом запасы материала пляжа в литодинамической системе довольно велики (в среднем 140–150 м<sup>3</sup> на метр длины берега [1]).

В настоящей работе представлены результаты многолетних наблюдений за динамикой данной системы. Обсуждаются свойства мегафестонов и тенденции их развития в масштабе сезонов, лет и десятилетий. Предлагается модель, объясняющая появление и развитие ритмических форм берегового контура как результат самоорганизации рельефа, связанной с механизмом прибрежных циркуляционных ячеек.

#### ДИНАМИКА БЕРЕГОВ В РАЙОНЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассматриваемый район относится к северному флангу морфолитодинамической системы побережья зал. Терпения, которую ограничивают мыс Сенявина на юге и мыс Муловского на севере (рис. 2). Основное воздействие на берега оказывают ЮВ и В волнения, причем заметная роль принадлежит волнам зыби. В летний сезон высота значимых волн обычно не превышает 2.5 м, а в осенний период возрастает до 4 м и больше. При прохождении тропических циклонов в прибрежной акватории наблюдаются штормовые волны высотой более 6 м [9]. Максимальный прилив имеет величину около 1.5 м. Ветровые нагоны незначительны (не более 0.3 м). Ледовый покров (включая и припай) держится в среднем с января по апрель.

Поступление пляжеобразующего материала в литодинамическую систему за счет твердого речного стока оценивается как 40 тыс. т/год [6]. В составе наносов пляжей доминируют крупный песок и гравий.

В настоящее время берега в рассматриваемом районе в основном отступают. Определенную роль в этом процессе могло сыграть изъятие из береговой зоны значительных объемов песчано-гравийного материала для строительных целей (около 3 млн. м<sup>3</sup>). Размыв низких морских террас в рассматриваемой литодинамической системе наблюдается с начала 1960-х годов [1].

Одна из зон максимального размыва приурочена к карьеру Дудино, где до недавнего времени производилась добыча пляжевых отложений.

Непосредственно у берега в районе исследований проходит автомобильная трасса Южно-Сахалинск—Оха—Москальво (рис. 1). Сравнительный морфометрический анализ состояния берегов вдоль трассы за период 1991–2007 гг. показал, что в пределах 5-километрового участка пляж ежегодно терял в объеме от 10 до 50 тыс. м<sup>3</sup> осадков [3]. Потери были связаны, по-видимому, не только с техногенным воздействием на бюджет наносов, но также и с повышением относительного уровня моря, в частности за счет тектонического погружения прибрежной суши. Региональный анализ позволяет принять усредненную скорость повышения относительного уровня на участке исследований как 3 мм/год [5]. Используя известное правило Бруна [15], определяющее смещение берегового профиля, можно оценить объем наносов, который должен быть вынесен на подводный склон в результате подъема уровня. Согласно расчету, указанный объем для 5-километрового участка берега должен составлять около 40 тыс. м<sup>3</sup>/год, что, в общем, согласуется с размером фактических потерь пляжа.

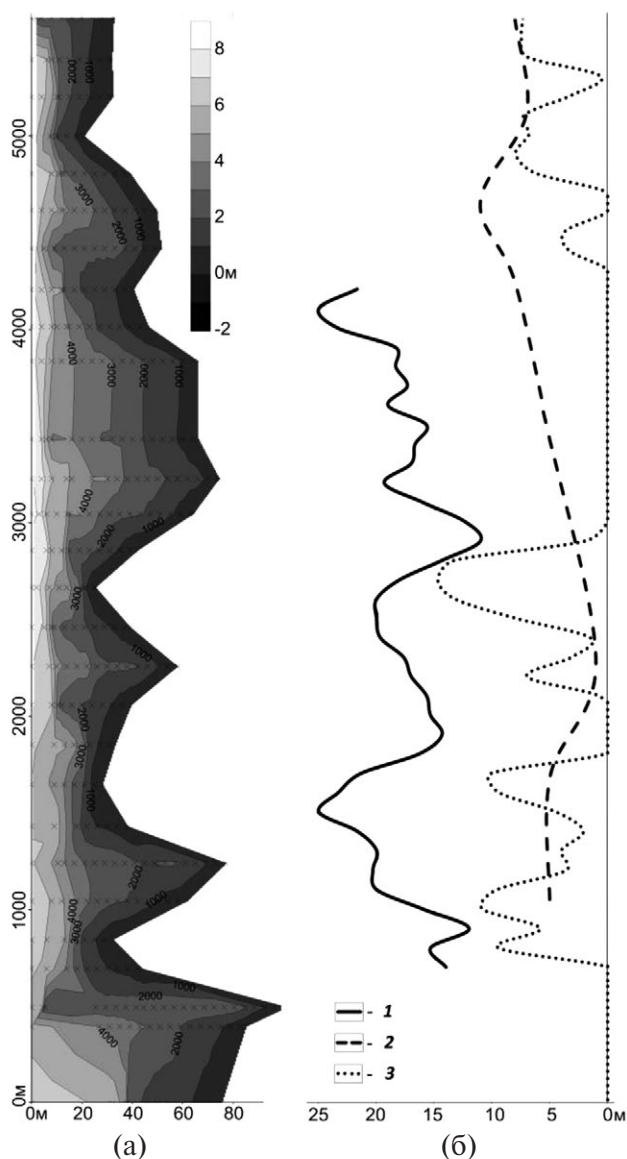
### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В представленной работе реализована методика морфодинамических исследований, основанная как на традиционных геоморфологических, так и современных методах получения и анализа геопространственной информации.

Обработка массивов аэрофотоинформации происходила следующим образом. На первом этапе были созданы электронные варианты полос АФС залетов за период 1952–2007 гг. Затем была осуществлена координатная привязка растровой топокарты масштаба 1:100 000 в свободной кроссплатформенной геоинформационной системе QGIS (Quantum GIS) и координатная привязка всех полос АФС по характерным точкам. После реализации процедур трансформирования проверялась степень контурного совпадения географических объектов наиболее качественной полосы АФС с рисунком на топокарте. Выбирался наиболее адекватный вариант. Остальные полосы АФС привязывались к нему практически по тем же реперным точкам. С 1999 по 2014 г. динамика береговой зоны анализировалась также на основе дешифрирования

КС в среде ГИС. В результате обработки полученной информации оценены значения размыва берегового уступа как за различные этапы, так и за весь период (рис. 3).

Измерения морфометрических параметров пляжа и положения береговой линии в системе мегафестонов проводились с 2006 по 2017 г. Наблюдения выполнялись 2–3 раза в год в период отсутствия ледового покрова, а для сравнительного анализа использовались главным образом результаты осенних съемок. Высотное обоснование выполнено в Балтийской системе высот 1977 г. Для расчетов объемов пляжа применялась система координат,



**Рис. 3.** План берега на участке исследований. (а) — контур берега и топография пляжа 2014 г., (б) — отступление берегового уступа: 1 — за 1952–1991 гг., 2 — 1991–2005 гг., 3 — 2005–2013 гг.

где мерой длины по оси  $X$  служило расстояние вдоль автодороги от первого репера, а по оси  $Y$  — расстояние от текущего репера до данной точки берегового профиля. Нулевая отметка вертикальной оси  $Z$  соответствовала среднему уровню моря. Полученные таким образом точечные измерения посредством триангуляции и преобразования полученной полигональной модели в растровый сеточный файл пересчитывались в модель рельефа с шагом 0.5 м по оси  $Y$  и 1 м по оси  $X$  и высотой по оси  $Z$  в каждой ячейке. Для всех моделей были рассчитаны объемы, ограниченные поверхностью модели и горизонтальной поверхностью, проходящей через  $Z = 0$ .

Далее посредством поэлементного вычитания более ранней модели из более поздней были получены межгодовые объемы изменения наносов в литодинамической системе.

Для оценки точности результатов объемы моделей 2006 и 2007 гг. сравнивались с объемами пляжа, полученными для тех же участков по данным топографических съемок. Как оказалось, различия не выходили за пределы 3–4 %.

## ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

План береговой линии и топография пляжа в районе расположения системы мегафестонов показаны на рис. 3а.

Имеющиеся материалы дистанционного зондирования и проведенные наблюдения позволяют выделить три периода развития системы на протяжении последних 60 лет, различающихся интенсивностью отступления берегов (рис. 3б). Скорость этого процесса была максимальной в период 1952–1991 гг. Замедление размыва в 1991–2005 гг. обусловлено сооружением деревянных волноотбойных стенок. К 2005 г. они были разрушены, и картина размыва, наблюдавшаяся до берегозащитных мероприятий, в основном восстановилась. Пространственный план размыва в 2005–2013 гг., в общем, повторяет черты, характерные для периода 1952–1991 гг., что свидетельствует об устойчивости морфодинамических процессов. Отступление берегового уступа в наибольшей мере проявляется на участках бухт. Это могло бы вызывать непрерывный рост амплитуды периодических форм, чего, однако, не происходит вследствие их миграции и трансформации.

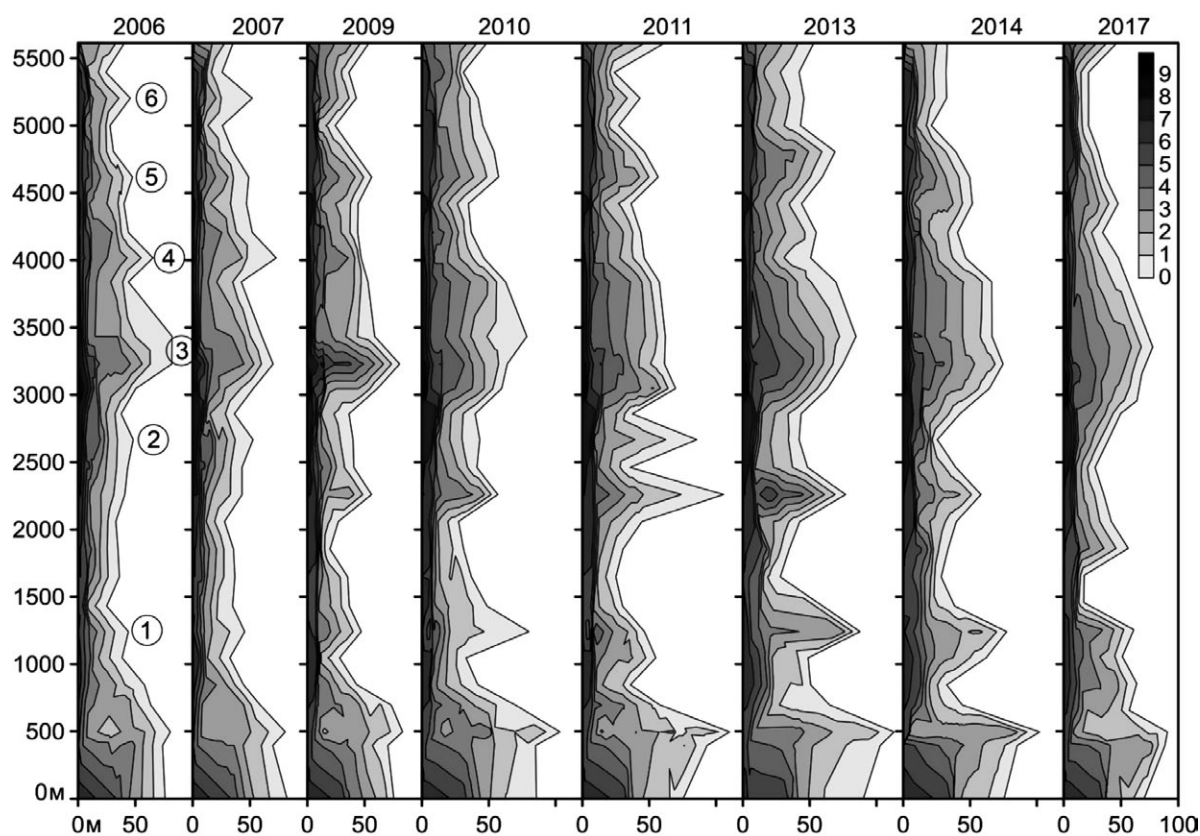


Рис. 4. Динамика пляжа и береговой линии в системе мегафестонов в период 2006–2017 гг. Цифрами в кружке обозначены контрастно выраженные мысы.

На рис. 4 представлены результаты наблюдений, характеризующие динамику пляжа и береговой линии в период 2006–2017 гг.

При маршрутном обследовании участка в 2005 г. было выявлено 6 контрастно выраженных пляжевых мысов. Крайний южный аккумулятивный выступ на рис. 4 — дельтовые отложения реки. Расстояние между первым с юга и вторым выступом составляло 1250 м, вторым и третьим — 670, третьим и четвертым — 800, четвертым и пятым — 620, пятым и шестым — 540 м. К 2009 г. второй выступ сместился на юг примерно на 400 м, а четвертый слился с третьим в крупный аккумулятивный выступ, который сохраняется до настоящего времени. К началу постройки временного берегозащитного сооружения между дельтовым выступом и первым пляжевым мысом в 2012 г. расстояние между первым и вторым мысами составляло 1070 м, вторым и третьим — 850, третьим и четвертым — 800, четвертым и пятым — 730 м. Шестой выступ на протяжении последних 5 лет уже не прослеживается. В начале следующего, 2013 г. произошло смещение практически всех мысов на север на величину 50–170 м. К концу 2013 г. мысы переместились в южном направлении на 90–200 м. Этот год характеризуется максимальными объемами пляжевых отложений в береговой морфолитосистеме. При сохранении контрастности пляжевых мысов в 2014 г. объемы отложений в них уменьшились. В 2015 г. пляжевый мыс № 2 сдвинулся на север примерно на 50 м, а начавший формироваться в 2014 г. в двухстах метрах к югу от него аккумулятивный выступ сдвинулся еще на 100 м к югу и стал более контрастным. Четвертый и пятый выступы сместились к югу соответственно на 90 и 60 м. Третий выступ практически не выражен. К 2017 г. выступ № 1 сместился к югу примерно на 400 м, выступ № 2 — еще на 100 м к югу (с 2014 г. — на 400 м).

Анализ изменений ситуации за 2006–2017 гг. в целом показывает усиление контрастности аккумулятивных выступов на южной половине морфолитосистемы. В северной части произошло выравнивание берега вследствие перестройки ячеек. При этом часть пляжевого материала переместилась на юг.

Общее увеличение объема пляжевых отложений, начавшееся после 2007 г., обусловлено, в первую очередь, закрытием песчаного карьера, расположенного в 5.5 км к югу от исследуемого участка. Однако с 2014 г. объем пляжа вновь стал

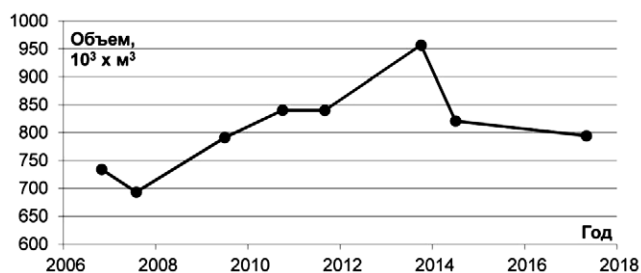


Рис. 5. Изменение объема пляжевых отложений на участке берега с мегафестонами в период 2006–2017 гг.

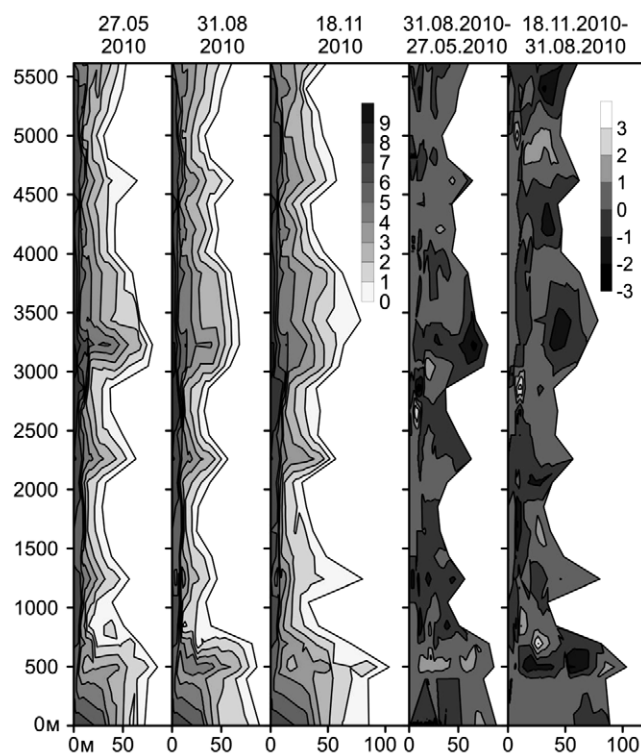


Рис. 6. Динамика системы мегафестонов летом и осенью 2010 г. Левые графики отражают изменения морфометрии пляжа с конца мая по середину ноября. Правые графики показывают изменения объема пляжа в летний и осенний сезоны.

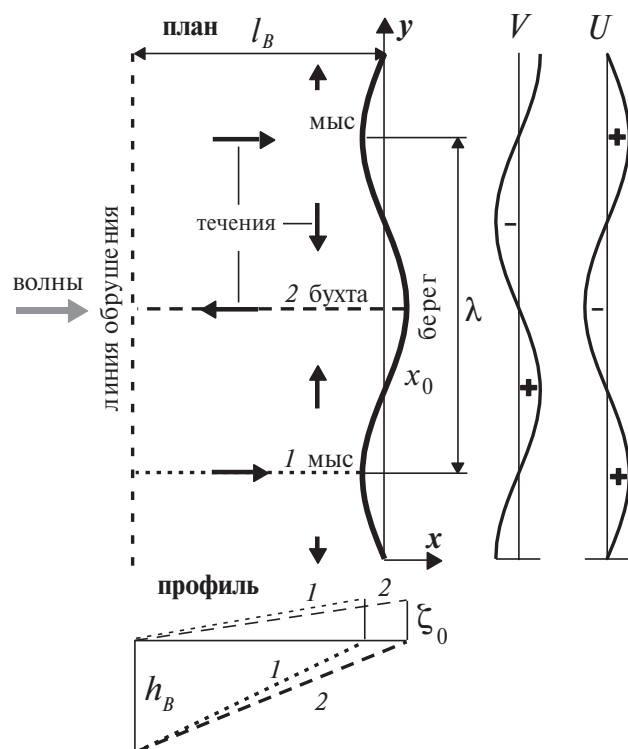
уменьшаться, и в 2017 г. сравнился со значениями 2009–2010 г. Изменения объема пляжа в период между 2006 и 2017 гг. показаны на рис. 5.

Рис. 6 отражает состояние системы мегафестонов в течение летнего и осеннего сезонов 2010 г. Как видно, летом контур берега заметно не изменился, а пляж немного увеличился в объеме (на 16 тыс. м³ с конца мая до конца августа). В осенний период общая картина осталась прежней, хотя в южной части участка мегафестоны стали более контрастными, а объем пляжа несколько уменьшился.

## О МЕХАНИЗМЕ ФОРМИРОВАНИЯ МЕГАФЕСТОНОВ

Долгое время считалось, что за формирование ритмических структур берегового контура ответственны краевые волны (edge waves), возникающие при отражении от берега инфравитационных волн [12, 19]. Однако, несмотря на корреляцию размеров некоторых форм с вероятной длиной краевых волн, убедительных доказательств в пользу данной гипотезы получено не было. В настоящее время большее признание получила точка зрения о доминирующей роли механизма самоорганизации рельефа, который основывается на положительной обратной связи между гидродинамикой и транспортом наносов [17, 18].

Неустойчивость первоначально ровного контура берега, обуславливающая рост периодических возмущений, может вызываться, например, ветровыми волнами, подходящими к берегу под значительным углом (более  $45^\circ$  относительно нормали к берегу). Соответственно, для развития ритмических структур благоприятен волно-



**Рис. 7.** Схема течений и потоков взвешенных наносов в условиях волнообразного контура берега.  $l_B$  — ширина прибойной зоны,  $h_B$  — глубина обрушения,  $x_0$  — положение береговой линии,  $\zeta_0$  — высота волнового нагона,  $\lambda$  — длина возмущения береговой линии,  $U$  и  $V$  — поперечная и продольная скорости течений.

вой климат, характеризующийся значительным вкладом волн «больших углов» [10]. Данная особенность, однако, не характерна для исследуемого участка побережья залива Терпения, где доминирующие направления волн, в общем, не составляют значительных углов с береговой нормалью. По нашему мнению, развитие ритмических форм здесь обусловлено иными причинами. Как показано далее, определяющую роль в этом может играть взаимодействие прибрежной морфологии с течениями в циркуляционных ячейках [8].

Рассмотрим прибойную зону ветровых волн (рис. 7), распространяющихся по нормали к берегу (вдоль оси  $X$ ), контур которого в начальный момент прямолинеен (параллелен оси  $Y$ ). В ходе обрушения волн средний уровень воды повышается и достигает значения  $\zeta_0$  на береговой линии. Поскольку условия вдоль берега одинаковы, горизонтальная циркуляция воды вначале отсутствует.

Теперь допустим, что на береговой линии возникло волнообразное возмущение малой амплитуды  $a$  с волновым числом  $k$ :

$$x_0 = -a \sin ky, \quad (1)$$

где  $x_0$  — положение береговой линии,  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  — длина (шаг) возмущения. Это немедленно приведет к появлению градиента уровня  $\partial\zeta/\partial y$ , обуславливающего развитие вдольбереговых течений от мысов к бухтам (рис. 7). Здесь, в свою очередь, сформируется стоковое течение от берега (прообраз разрывного течения), и в результате возникнут циркуляционные ячейки (с замыкающими течениями за линией обрушения). Поперечные скорости  $U$  в прибойной зоне распределятся в соответствии с величиной  $-kx_0$ , а скорости вдольбереговых течений  $V$  будут изменяться пропорционально  $\partial x_0/\partial y$ , т.е.

$$U = -\hat{U}kx_0, \quad V = \hat{V}(\partial x_0/\partial y), \quad (2)$$

где  $\hat{U}$  и  $\hat{V}$  — амплитудные значения скоростей.

Попытаемся выяснить, при каких условиях возмущение контура берега может расти со временем. Для этого воспользуемся законом сохранения массы, который применительно к рассматриваемым условиям может быть записан в форме [8]:

$$\frac{\partial x_0}{\partial t} = \frac{\partial Q_y / \partial y - \bar{q}_x}{h_B + z_c}, \quad (3)$$

где  $\partial x_0/\partial t$  — скорость смещения береговой линии,  $t$  — время,  $Q_y$  — интегральный вдоль-

береговой расход наносов,  $\bar{q}_x$  — результирующий поперечный расход через единичное сечение,  $h_B$  — глубина обрушения,  $z_c$  — возвышение пляжа, соответствующее высоте нагона. Уравнение (3), по сути, выражает тот факт, что при увеличении вдольберегового потока ( $\partial Q_y / \partial y > 0$ ) берег размывается и отступает ( $\partial x_0 / \partial t > 0$ ), а в случае притока наносов ( $q_x > 0$ ) берег нарастает и выдвигается ( $\partial x_0 / \partial t < 0$ ).

Допустим, что наносы в прибойной зоне транспортируются преимущественно во взвеси, усредненная концентрация которой равна  $\bar{c}$ .

Тогда, приняв среднюю глубину как  $\frac{1}{2}(h_B + z_c)$ , определим расходы наносов:

$$\bar{q}_x = \frac{1}{2} \bar{c} (h_B + z_c) U, \quad Q_y = \frac{1}{2} \bar{c} (h_B + z_c) l_B V, \quad (4)$$

где  $l_B$  — ширина прибойной зоны, а скорости течений выражаются соотношениями (2). Подставив (4) в (3), придем к уравнению диффузии:

$$\frac{\partial x_0}{\partial t} = \hat{v} \left( \frac{\partial^2 x_0}{\partial y^2} + \frac{\hat{U}}{\hat{V}} \frac{k x_0}{l_B} \right), \quad \hat{v} = \frac{1}{2} \bar{c} l_B \hat{V}, \quad (5)$$

где  $\hat{v}$  — коэффициент диффузии. После подстановки (1) в (5) получим уравнение относительно амплитуды возмущения:

$$\frac{\partial a}{\partial t} = \left( \frac{\hat{U}}{\hat{V}} \frac{1}{k l_B} - 1 \right) \hat{v} k^2 a, \quad (6)$$

решение которого записывается как

$$a = a^{(0)} \exp \left[ \left( \frac{\hat{U}}{\hat{V}} \frac{1}{k l_B} - 1 \right) \hat{v} k^2 t \right], \quad (7)$$

где  $a^{(0)}$  — начальное значение  $a$  в момент  $t=0$ .

Как видно из (7), амплитуда возмущения будет расти со временем при выполнении неравенства

$$\frac{\hat{U}}{\hat{V}} \frac{1}{k l_B} - 1 > 0 \quad \text{или} \quad \frac{\lambda}{l_B} > 2\pi \frac{\hat{V}}{\hat{U}}. \quad (8)$$

Условие (8) определяет минимальную длину возмущения  $\lambda$  в зависимости от ширины прибойной зоны и скоростей течений в циркуляционной ячейке.

Если поперечные и продольные скорости близки друг к другу ( $\hat{U}/\hat{V} \approx 1$ ), то длина  $\lambda$ , согласно (8), должна быть больше  $6l_B$ . Однако из наблюдений известно, что скорости оттока воды, как правило, превышают скорости питающих вдольбереговых течений, что обусловлено нелинейными свойствами прибрежной

циркуляции [13]. В связи с этим представляют интерес данные [14], полученные на побережье Австралии в условиях квазиравновесной циркуляционной ячейки при устойчивом умеренном волнении. Измеренная средняя скорость разрывного течения составляла 0.4–0.6 м/с, тогда как скорости питающих течений находились в интервале 0.2–0.4 м/с. Соответствующие максимальные величины колебались в пределах 1.6–2.1 м/с и 1.0–1.3 м/с. С учетом приведенных данных типичное значение отношения  $\hat{V}/\hat{U}$  можно принять равным примерно 0.6. Тогда из (8) следует, что в квазиравновесной системе шаг мегафестонов должен быть близок к четырехкратной ширине прибойной зоны:

$$\lambda \approx 4l_B. \quad (9)$$

Возмущения с меньшим шагом не имеют шансов для роста, так как для этого потребовалось бы слишком большое превышение поперечных скоростей течений над продольными. Если длина возмущения очень велика, то развивающиеся течения оказываются слишком слабыми, чтобы поддержать его рост. Согласно [17], наблюдаемый шаг ритмических форм контура берега не превышает  $8l_B$ .

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В динамике рассмотренной литодинамической системы важную роль сыграл внешний фактор, а именно прекращение изъятия материала из береговой зоны (вследствие закрытия карьера), что дало импульс дополнительному циклу ее эволюции с периодом порядка 10 лет. В начале цикла объем пляжа увеличивался, затем уменьшался и в конце цикла почти стабилизировался при величине, превышающей первоначальную. Система, таким образом, пришла к новому квазиравновесному состоянию.

Не связанные с упомянутым фактором флуктуации мегафестонов можно рассматривать как следствие колебаний волновой обстановки в масштабах штормов, сезонов, лет и десятилетий. Эти колебания обуславливают неоднородность распределения материала в разных частях системы, что вызывает миграции и перестройку (слияние и обособление) отдельных элементов. Так, при усилении волнения быстро увеличивается протяженность прибойной зоны  $l_B$ , и шаг существующих мегафестонов оказывается слишком малым, чтобы удовлетворить требованию (8). Для поддержания периодических форм в прежнем виде понадобились бы нереально вы-

сокие скорости поперечных течений. Поэтому существующая система размывается, и начинают формироваться более протяженные структуры. Однако этот процесс требует значительного времени, которого обычно не хватает из-за ограниченной продолжительности фазы стабилизации сильного шторма.

Создание меньших форм, отвечающих умеренному волнению, происходит быстрее, и его продолжительность может быть достаточной для формирования квазиравновесной системы. Что же, в конце концов, останавливает выдвигание мысов и отступление берега в бухтах? Сдерживающим фактором, по-видимому, служит рефракция волн. Дело в том, что в головной части разрывного течения, где скорость резко падает, происходит интенсивное выпадение взвеси. Материал перемещается в обе стороны вдоль берега, и в результате формируется аккумулятивное тело в виде выпуклого в сторону моря серповидного вала (*crescentic bar*), который представляет как бы зеркальное отражение фестоны на береговой линии. Рефракция волн над валом уменьшает высоту волн у мысов и увеличивает ее в бухтах. Продольные градиенты среднего уровня, движущие циркуляцию, становятся менее контрастными. В итоге устанавливается равновесие, при котором объем наносов, выносимых разрывным течением, минимизируется.

Согласно условию (9), в квазиравновесной системе мегафестонов шаг  $\lambda$  должен быть близок к значению  $4l_B$ . Мегафестоны, наблюдаемые в заливе Терпения, обладают длиной от 500 м до 1 км. При характерном значении  $\lambda = 800$  м система отвечает условиям волнения с шириной прибойной зоны около 200 м. При характерном угле дна 0.015 соответствующая глубина обрушения  $h_B$  должна быть близка к 3 м. С учетом отношения к глубине высота обрушающихся волн 1%-обеспеченности в системе может составлять около 2.4 м, высота значимых волн —  $H_s = 1.6$  м, а средняя высота —  $\bar{H} = 1.0$  м. Таким образом, мегафестоны в заливе Терпения поддерживаются, главным образом, умеренными волнениями, которые характеризуются значительной повторяемостью в течение года.

Остается вопрос, почему при достаточных запасах материала на одних участках побережья система ритмических форм устойчива, а на других — нет? Вероятно, важную роль здесь играют локальные особенности подводного рельефа и рефракции волн, влияющие на свойства волнового поля в береговой зоне.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Система мегафестонов в заливе Терпения существует в условиях общего отступления берегов, обусловленного как природными процессами, так и до недавнего времени антропогенным воздействием. Многолетние наблюдения обнаруживают значительные флуктуации элементов системы в масштабах сезонов, лет и десятилетий. Тем не менее ее основные морфологические черты сохраняются уже в течение более 60 лет. Характерный шаг (или длина) мегафестонов составляет около 800 м, а размах колебаний береговой линии достигает 40–50 м.

Выполненный анализ показывает, что появление системы мегафестонов тесно связано с формированием циркуляционных ячеек, благодаря которым небольшое начальное возмущение контура берега может увеличиваться со временем. Положительная обратная связь между рельефом и гидродинамикой возникает тогда, когда выполняется определенное соотношение между шагом ритмических форм  $\lambda$ , размером прибойной зоны  $l_B$  и скоростями прибрежных течений. Иначе говоря, длина начального возмущения должна попасть в нужный диапазон величин.

Рост мегафестонов продолжается до тех пор, пока не будет достигнуто равновесие между их длиной и параметрами действующего волнения. Шаг системы при этом близок к 4-кратной ширине прибойной зоны ( $\lambda \approx 4l_B$ ). Исходя из этого, можно полагать, что система мегафестонов в заливе Терпения поддерживается, главным образом, умеренными волнениями с высотой значимых волн  $H_s$  около 1.6 м.

**Благодарности.** Авторы признательны профессору Е.И. Игнатову (Географический ф-т МГУ), чьи рекомендации помогли инициировать наблюдения за ритмическими структурами в заливе Терпения.

**Источник финансирования.** Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема № 0149-2018-0015) при частичной поддержке РФФИ (гранты № 16-05-00364 и № 18-05-00741).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Афанасьев В.В.* Геоморфологические аспекты проблемы защиты берегов острова Сахалин // Геоморфология. 2015. № 2. С. 28–37.
2. *Афанасьев В.В., Мыглан М.Ю., Тунер А.И.* Прогноз размыва аккумулятивных берегов // Юбилейный вып. ДВНИГМИ — 50 лет. Владивосток: Дальнаука, 2000. С. 49–50.



3. *Афанасьев В.В., Игнатов Е.И., Сафьянов Г.А., Чистов С.В.* Защита берегов в п. Взморье, остров Сахалин, методом компенсации дефицита наносов // Труды междунар. конф. «Создание и использование искусственных земельных участков на берегах и акватории водоемов», 20–25 июля 2009. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2009. С. 181–187.
4. *Афанасьев В.В., Уба А.В.* Анализ размыва берегов северо-восточного Сахалина // Геоморфология. 2019. (Принято к печати).
5. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 9. Охотское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеоздат, 1998. 370 с.
6. *Горбунов А.О., Зарочинцев В.С., Королев П.Ю.* Роль аллювия в компенсации дефицита пляжевых отложений залива Терпения (о. Сахалин) // Изв. Самарского науч. центра РАН. 2010. Т. 12. № 1(4). С. 1002–1005.
7. *Зенкович В.П.* Основы учения о развитии морских берегов. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 710 с.
8. *Леонтьев И.О.* Морфодинамические процессы в береговой зоне моря. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 251 с.
9. *Плеханов Ф. А.* Пространственно-временная изменчивость характеристик волнения у юго-восточного побережья о. Сахалин по данным инструментальных измерений // Ученые записки Сахалинского государственного университета. 2015. № 1. С. 35–38.
10. *Ashton A.D., Murray A.B.* High-angle wave instability and emergent shoreline shapes: 2. Wave climate analysis and comparisons to nature // J. of Geophys. Res. 2006. V. 111. F04012. Doi:10.1029/2005JF000423.
11. *Ashton A.D., Murray A.B., Arnault O.* Formation of coastline features by large-scale instabilities induced by high-angle waves // Nature. 2001. V. 414. P. 296–300.
12. *Bowen A.J., Huntley D.A.* Waves, long waves and nearshore topography // Marine Geol. 1984. V. 60. P. 1–13.
13. *Bowen A.J., Inman D.L.* Rip currents. Part 2. Laboratory and field observations // J. of Geophys. Res. 1969. V. 74. № 23. P. 5479–5490.
14. *Brander R.W.* Field observations on the morphodynamic evolution of a low-energy rip current system // Marine Geol. 1999. V. 157. P. 199–217.
15. *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.
16. *Falqués A.* Wave driven alongshore sediment transport and stability of the Dutch coastline // Coastal Eng. 2006. V. 53. P. 243–254.
17. *Falqués A., Coco G., Huntley D.A.* A mechanism for the generation of wave-driven rhythmic patterns in the surf zone // J. of Geophys. Res. 2000. V. 105. № C10. P. 24071–24087.
18. *Hino M.* Theory on formation of rip current and cuspidal coast // 14th Int. Conf. Coast. Eng. ASCE. 1974. P. 901–919.
19. *Holman R.A., Bowen A.J.* Bars, bumps and holes: models for the generation of complex beach topography // J. of Geophys. Res. 1982. V. 87. № C1. P. 457–468.
20. *Thevenot M.M., Kraus N.C.* Longshore sand waves at Southampton Beach, New York: observation and numerical simulation of their movement // Marine Geology. 1995. V. 126. P. 249–269.

## RHYTHMIC PATTERNS OF SHORELINE CONTOUR IN THE GULF OF TERPENYA OF SAKHALIN ISLAND

© 2019 I. O. Leont'yev<sup>1\*</sup>, V. V. Afanas'yev<sup>2\*\*</sup>, A. V. Uba<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

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

\*\*e-mail: vvasand@mail.ru

Received March 21, 2018

Revised version received May 31, 2018

After revision July 02, 2018

The results are discussed of the long-term observations of the system of mega-cusps (large-scale shoreline cusps) revealed on the coast of the Gulf of Terpenya of Sakhalin Island. Typical spatial step of the rhythmic forms is about 800 m and the amplitude of shoreline undulations is of tens of meters. Despite of significant changes in temporal scales of the seasons, years and decades the main morphological features of mega-cusps are kept over the period of more than 60 years. The model is suggested explaining creation of rhythmic shoreline patterns by self-organization of bottom relief under the wave impact. Development of mega-cusps is shown to be connected with generation of nearshore circulation cells. Due to flows within the cells a small initial perturbation of shoreline contour can increase in time. A positive feedback between the coastal morphology and the hydrodynamics arises when a certain relation is established between the length of perturbation, the width of surf zone and the velocities of nearshore currents. It is concluded that the system of mega-cusps in the Gulf of Terpenya is mainly supported by the moderate waves of significant wave height about 1.6 m.

**Keywords:** shoreline contour, megacusps, circulation cells, self-organization of bed relief