ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ, 2019, том 46, № 5, с. 474–484

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 556.54:(282.243.7)

МНОГОЛЕТНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ МОРСКОГО КРАЯ ДЕЛЬТЫ ДУНАЯ

©2019 г. М. В. Михайлова[1,*], В. И. Кравцова[2,], В. Н. Морозов[3,***]**

[1] *Институт водных проблем РАН*
Россия 119333 Москва
[2] *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*
Россия 119991 Москва
[3] *Дунайская гидрометеорологическая обсерватория*
Украина 68609 Измаил
*e-mail: *mv.mikhailova@gmail.com, **valentinamsu@yandex.ru, ***morozov@dhmo.org.ua*

Поступила в редакцию 06.10.2018 г.
После доработки 15.10.2018 г.
Принята к публикации 18.10.2018 г.

С помощью наземных (экспедиционных) и дистанционных (космических) методов проведены детальные исследования многолетних изменений морского края дельты Дуная. Установлено, что смещения морского края дельты (выдвижение или отступание) могут быть эффективным индикатором процесса дельтоформирования в целом: динамики русловой сети дельты и перераспределения стока воды и наносов между рукавами, воздействия на дельту внешних факторов (стока воды и наносов реки, ветра и морского волнения, повышения или понижения уровня моря). Для определения причин и особенностей изменения морского края дельты Дуная на семи генетически однородных участках оценен вклад разных факторов в баланс песчаных наносов. Определены места выдвижения или отступания морского края. Сравнение результатов исследования динамики морского края Дуная с данными об изменении строения и режима других крупных дельт может позволить оценить причины и тенденции современных процессов в речных дельтах.

Ключевые слова: Дунай, дельта, сток воды и наносов, уровень моря, волнение, морской край дельты, выдвижение и отступание дельты.

DOI: 10.31857/S0321-0596465474-484

Недавние публикации, посвященные современным изменениям строения, гидрологического режима и экологических условий дельт рек мира, выявили явную тенденцию к замедлению выдвижения многих дельт в моря, а в ряде случаев – к отступанию дельт или их частей, а также деградации дельтовых ландшафтов [5–7]. В качестве основных причин таких изменений указывается естественное и антропогенное сокращение стока воды и особенно наносов рек, а также повышение уровня Мирового океана, активизация циклонической деятельности и связанного с ней морского волнения. Главные причины перечисленных гидрометеорологических изменений – современное потепление климата и расширение хозяйственной деятельности в бассейнах рек и самих дельтах. Разработка методов анализа, расчета и прогноза изменения гидролого-морфологических и гидролого-экологических характеристик речных дельт становится важной задачей гидрологии устьев рек; без таких методов невозможны рациональное использование богатых земельных, водных, биологических, энергетических ресурсов речных дельт и их защита от опасных гидрологических процессов и событий.

При разработке упомянутых методов ключевой задачей становится исследование многолетних изменений не столько внутреннего строения дельт, сколько морского края дельты (МКД), который в первую очередь реагирует на изменения факторов дельтоформирования.

Уникальный материал для такого исследования представляют результаты многолетних исследований дельты Дуная [2, 4, 11], в которых участвовали Дунайская гидрометеорологическая обсерватория, Государственный океанографический институт, географический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Институт водных проблем РАН. Кроме того, авторы статьи принима-

ли участие в написании украинско-российской монографии по дельте Дуная [1].

В настоящей статье продолжены упомянутые исследования, представлен анализ изменений МКД Дуная после выхода в свет монографии [1], обзор новых космических снимков и данных полевых наблюдений, сопоставление динамики МКД с дельтоформирующими факторами – стоком воды и наносов Дуная, его распределением по рукавам дельты, влиянием изменения уровня Черного моря. Также использованы результаты новых исследований румынских специалистов [9, 10, 12].

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Современная дельта Дуная (рис. 1) имеет площадь 4200 км^2, на украинскую и румынскую части приходятся 830 и 3370 км^2 соответственно [1]. Граница между Украиной и Румынией в пределах дельты проходит по Килийскому рукаву и водотокам, входящим в его систему: Иванешть и Прямой (первая и вторая внутренние дельты соответственно); Старостамбульский и Лимба (внешняя или морская Килийская дельта) и далее на восток через бухту Мусура. Длина дельты Дуная от ее вершины (мыс Измаильсий Чатал) до моря по Килийскому рук. составляет 116 км, по прямой до МКД – 70–80 км; длина МКД от вершины Жебриянской бухты на севере дельты до середины косы, блокирующей лагунный комплекс Разельм-Синое, на юге ~215 км.

Рис. 1. Картосхема дельты Дуная с выделенными участками ее морского края (1–7).

Голоценовая дельта Дуная начала формироваться 10–8 тыс. лет назад в обширном морском заливе между плато Буджак на севере и Добруджа на юге в результате резкого повышения уровня Черного моря [1, 8]. В настоящее время устьевая область Дуная относится, согласно [6], к дельтово-эстуарному типу. Устьевую область Дуная составляют частично выдвинутые в море русловые системы трех крупных рукавов – Килийского (северного), Сулинского (среднего) и Георгиевского (южного). Наиболее сложное строение имеет очень изменчивая частная дельта в устье рук. Килийского (так называемая Килийская дельта, с вершиной у г. Вилково) (рис. 1). В устьевую область реки также входят крупные водоемы эстуарного типа (лагуны Разельм, Синое, Головица, Змейка и др.).

Важная особенность дельты Дуная (как и всех многорукавных неприливных дельт) – это единство всей русловой сети дельты, заключающееся в том, что любое естественное или искусственное изменение морфометрических характеристик (длины, ширины, глубины) любого участка этой сети приводит к изменению гидравлического сопротивления ее элементов и, как следствие, к перераспределению стока воды и наносов между рукавами (теоретическое обоснование этих закономерностей приведено в [6]). Данные наблюдений подтверждают эту особенность. Так, гидротехнические работы по спрямлению и углублению рук. Сулинского в 1868–1902 гг. и искусственное спрямление излучин в Георгиевском рук. в 1981–1992 гг. [1] привели к увеличению доли стока этих рукавов в стоке Дуная в вершине дельты с 7.0 до 20% и с 23 до 26% соответственно. В итоге доля стока рук. Килийского с конца 1980-х до начала 2000-х гг. уменьшилась с 58 до 54%. К перераспределению стока между рукавами ведет и крупный водозабор [1, 6].

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

При исследовании многолетних изменений МКД (его выдвижения или отступания) главным методическим вопросом становится подразделение МКД на генетически однородные участки. В качестве границ между участками МКД использованы устья основных рукавов, через которые выносятся речные наносы, наиболее круп-

ные фракции которых и формируют МКД. При этом необходимо учитывать преобладающее направление ветра, течений, волнения и вдольберегового потока наносов.

Для устьевого взморья Дуная наибольшей повторяемостью и силой обладают северо-восточные ветры, они и приводят к преобладающим течениям, волнению и вдольбереговому потоку наносов вдоль МКД с севера на юг [1].

При определении границ между участками МКД важно учитывать размер рукава и количество наносов, поступающих из него на МКД. Большие рукава в дельте Дуная (Потаповский, Быстрый, Георгиевский) имеют в своих устьях крупные неустойчивые устьевые бары, волновой размыв которых питает направленный к югу поток наносов. Кроме того, бары этих рукавов являются препятствием для наносов, поступающих вдоль МКД с севера. Поэтому в качестве границ смежных участков МКД следует принимать более устойчивые северные (левые) устьевые косы в устьях упомянутых рукавов. Малые рукава (Полуденный, Восточный), наоборот, имеют в своих устьях более устойчивые южные (правые) устьевые косы, поэтому границы между смежными участками в таких случаях следует проводить по этим косам. Особое место в МКД Дуная занимают устья Старостамбульского и Сулинского рукавов. Они впадают в море рядом и выносят свои наносы далеко от своих устьев. Молы в устье рук. Сулинского имеют длину ~13 км и служат препятствием для переноса в южном направлении наносов, поступающих с севера, в том числе и из рук. Старостамбульского. Поэтому в качестве границы между северным и южным участком МКД здесь следует принять сулинские молы. При назначении границ участков в румынской части МКД учитывались результаты исследований [1, 9, 10, 12].

В итоге для исследования динамики МКД выделено семь участков от вершины Жебриянской бухты на севере до прол. Портица в косе, блокирующей лагунный комплекс Разельм-Синое южнее дельты (рис. 1).

Один из основных методов, используемый авторами статьи при изучении динамики МКД Дуная, – это сравнение имеющихся в свободном доступе разновременных космических снимков высокого разрешения. Этот метод был применен еще в монографии [1]. В процессе новых исследований использованы усовершенствованные приемы дешифрирования космических снимков и компьютерные способы их наложения и точного расчета площадей выдвижения или отступания МКД. Подробности усовершенствованной методики изложены в [3].

Результаты расчета величин площадей выдвижения или отступания морского края по каждому из семи участков за 2002–2016 гг., а также интенсивности этих изменений приведены в табл. 1.

В качестве дополнительного метода количественной оценки смещения МКД авторами применены полевые измерения расстояния до МКД от установленных на берегу дельты специальных реперов. Метод отработан еще в 1970–2002 гг. и изложен в [1]. В 2003–2016 гг. измерения на профилях были продолжены. Результаты измерений расстояний от реперов до МКД на профилях *A*, *B*, *C* и *D* в наиболее характерных местах МКД за 1970–2016 гг. приведены на рис. 2.

Таблица 1. Результаты расчета смещения морского края дельты (МКД) Дуная за 2002–2016 гг. по космическим снимкам

Приморский район дельты Дуная	Участок МКД (рис. 1)	Длина L, км	Выдвижение МКД (отложение наносов) ΔF, км^2	Отступание МКД (размыв) ΔF, км^2	Итоговое выдвижение (отступание) МКД		Итоговое среднее выдвижение (отступание) МКД	
					ΔF, км^2	$\Delta F/\Delta t$, км^2/год	$\Delta F/\Delta L$, м	$\Delta F/L\,\Delta t$, м/год
Северный (Килийская дельта)	1	44.2	+1.58	–0.79	+0.79	+0.056	+17.9	+1.27
	2	14.9	+3.31	–1.94	+1.37	+0.098	+91.9	+6.58
	3	7.5	+1.00	0	+1.00	+0.071	+133.3	+9.47
	4	8.8	+0.89	–0.43	+0.46	+0.033	+52.3	+3.75
	5	36.5	+9.54	–0.81	+8.73	+0.624	+239.2	+17.1
	1–5	111.9	+16.32	–3.97	+12.35	+0.882	+110.4	+7.88
Центральный	6	33.9	+0.84	–1.71	–0.87	–0.062	–25.7	–1.83
Южный	7	69.5	+4.75	–4.63	+0.12	+0.0086	+1.73	+0.124
Вся дельта	1–7	215.3	+21.91	–10.31	+11.6	+0.829	+53.9	+3.78

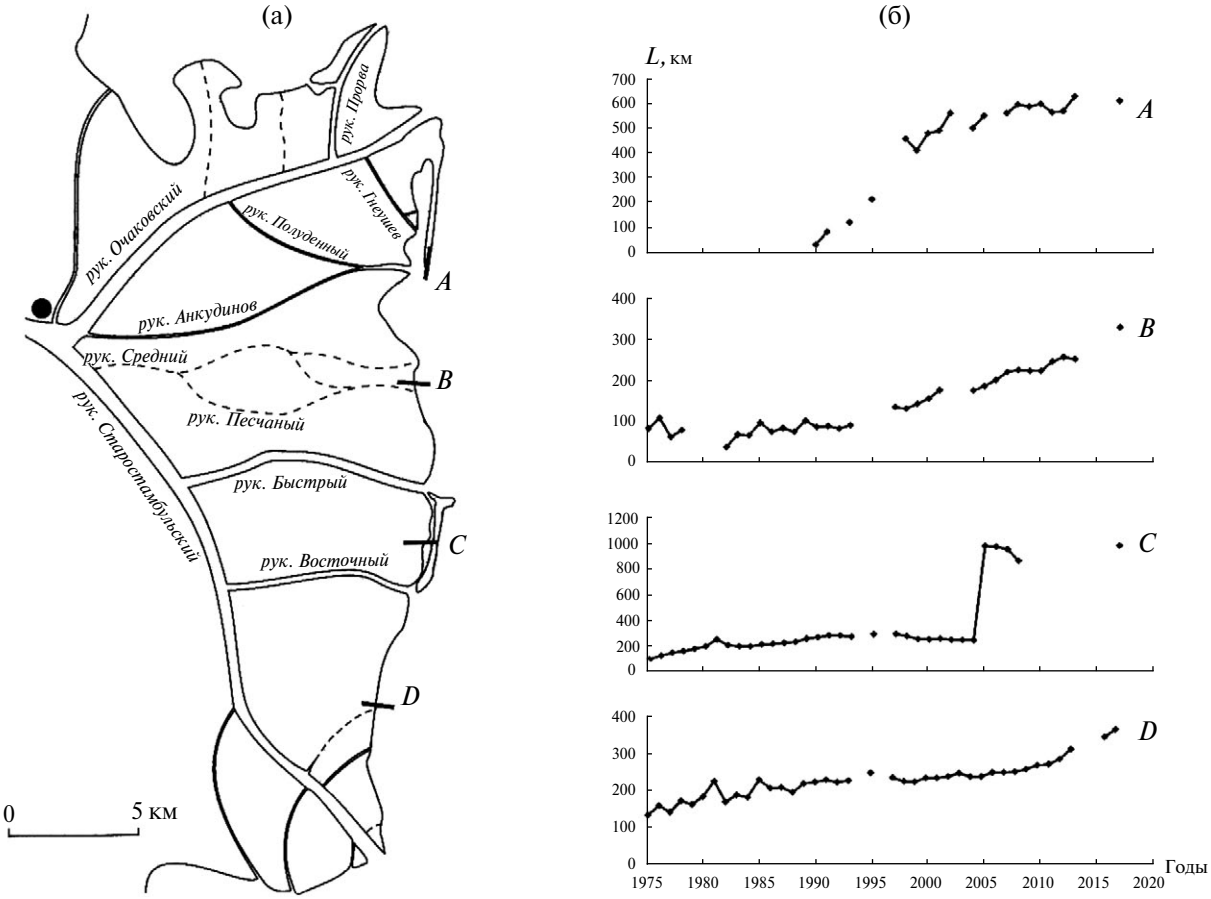

Рис. 2. Схема размещения профилей на морском крае Килийской дельты (а) и графики изменения расстояний от реперов до МКД за 1975–2016 гг. (б).

Профиль *A* отражает процесс изменения МКД в конце участка 2. Профили *B*, *C* и *D* находятся в середине участков 3, 4 и 5 и характеризуют изменения в МКД на этих участках в целом.

При анализе причин изменения МКД также учтены сведения об основных внешних факторах, влияющих на строение и гидрологический режим дельты. Сведения о стоке воды и наносов Дуная в вершине дельты за разные годы приведены в табл. 2. Данные этой таблицы показывают, что во второй половине XX в. водный сток Дуная в его устье увеличился на 12 км^3/год. Причина – в увеличении атмосферных осадков в бассейне реки. Сток взвешенных наносов, наоборот, сократился почти в два раза в результате сооружения многочисленных водохранилищ как на самом Дунае (самое крупное – Железные Ворота-1 в 1970 г.), так и на притоках реки.

Таблица 2. Сток воды и взвешенных наносов Дуная в вершине дельты, осредненный за отдельные периоды

Период, годы	Число лет	$Q_{ср}$, м^3/с	W_Q, км^3/год	$R_{ср}$, кг/с	W_R, млн т/год
1840–1920	81	6140	194	1990	62.8
1921–1960	40	6320	199	1660	52.4
1961–2002	42	6700	211	1230	38.8
2003–2016	14	6730	212	790	24.9

Результаты измерений на посту Приморское (Жебриянская бухта) свидетельствуют о том, что среднегодовые уровни воды на устьевом взморье Дуная в период с середины 1950-х гг. до начала XXI в. относительно быстро повышались (с интенсивностью >0.3 см/год). Причина этого – положительный водный баланс Черного моря, обусловленный увеличением атмосферных осадков и ростом водного стока рек, включая Дунай. В начале XXI в. повышение уровня моря замедлилось.

СОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ МОРСКОГО КРАЯ ДЕЛЬТЫ ДУНАЯ НА ОТДЕЛЬНЫХ УЧАСТКАХ

Новые исследования изменений МКД Дуная за 2002–2016 гг. в основном подтвердили предположения о тенденциях динамики МКД,

высказанные по результатам предыдущих исследований авторов [1]. Вместе с тем новые исследования позволили получить более детальные и надежные оценки современных процессов на МКД Дуная.

Рассмотрим эти процессы на выделенных участках 1–7 (рис. 1).

Участок 1 простирается от вершины Жебриянской бухты до косы к северу от устья рук. Потаповский (рис. 3а). МКД на этом участке сильно изрезан, глубоко вдающиеся в сушу заливы разделены выступами трех рукавов – действующего рук. Белгородского и отмерших рукавов Полуночного и Шабаш. По данным предыдущих исследований [1], на участке 1 за период с 1970 по 2002 г. выделены районы выдвижения МКД (косы, блокирующие вершину Жебриянской бухты, и устье рук. Белгородского) и отступания (размыв выступа бывшего рук. Полуночного). С 2002 по 2016 г. величина прироста площади дельты на участке 1 в два раза превышала величину размыва (табл. 1). На западном берегу бухты продолжает нарастать система Жебриянских кос. Источником песчаного материала с примесью битой ракуши для этих кос служит вдольбереговой поток наносов (продуктов волнового размыва морского берега к северу от дельты). Этот вдольбереговой поток наносов заполняет песчаными отложениями лишь вершину Жебриянской бухты и формирует МКД на западе участка 1. На его восточную часть этот поток наносов не распространяется и до участков 2, 3 и других не доходит. Дельтовые выступы отмерших рукавов Полуночный и Шабаш продолжают размываться. В целом для участка 1 характерна тенденция к выравниванию МКД. По-видимому, будут отчленяться и превращаться в лагуны вдающиеся в сушу заливы.

Участок 2 тянется от конца участка 1 до правой косы в устье рук. Полуденного (рис. 3б); рук. Потаповский (главный рукав в пределах этого участка) в прошлом был многоводным, его наносы в 1960–1970 гг. сформировали обширный устьевой бар. Волновой размыв гребня этого бара в дальнейшем привел к образованию огромной Новой Потаповской косы, примкнувшей к старому берегу и протянувшейся на юг от устья рукава. Возникшая в последней четверти XX в. коса названа Новой, так как в прошлом южнее устья рук. Потаповского уже возникали подобные косы, которые постепенно смещались к суше, смыкались с ней и зарастали густым лиственным лесом. По мере уменьшения водоносности рук. Потаповского Новая Потаповская коса стала размываться [1].

За 2002–2016 гг. на рассматриваемом участке МКД произошли большие изменения. Северная часть Новой Потаповской косы к югу от устья рук. Потаповского подверглась сильному волновому размыву и переместилась к суше на 250–300 м, отчленив лагуну. Однако в косе все еще остается небольшой проран (шириной всего 30 м). Южная часть Новой Потаповской косы блокирует устье рук. Правый Гнеушев; рук. Левый Гнеушев полностью заросс. Южная оконечность косы продвинулась в сторону устья рук. Полуденного. За 1990–2002 гг. удлинение косы в этом направлении (профиль *A* на рис. 2) составило 531 м (40.8 м/год). Удлинение косы подтверждает и рис. 3б. В целом размер Новой Потаповской косы немного увеличился. Дальнейшее продвижение косы к югу может привести к сужению устья рук. Полуденного. Это неизбежно приведет к уменьшению водоносности верхней части рук. Полуденный и впадающего в него рук. Анкудинов.

Участок 3 находится между правым берегом в устье рук. Полуденного и левой устьевой косой бара рук. Быстрого (рис. 3б, 4а). Участок 3 МКД ровный, слегка вогнутый, для него характерно наличие широкого пляжа и системы береговых валов. По данным [1], до 2002 г. на этом участке преобладал процесс выдвижения МКД. В 2002–2016 гг. площадь нарастания берега увеличилась (табл. 1), а размыв не проявился. На этом участке МКД раньше в море выходили рукава Отножный и Песчаный [1]. В последней трети XX в. устья этих рукавов были блокированы песчаными отложениями во время сильных осенних штормов. Источником наносов для формирования МКД на участке 3 служит поток наносов с севера, который создают выносы рук. Потаповского и продукты размыва его бара, не полностью отложившиеся на Новой Потаповской косе. Этот поток наносов частично обходит устье рук. Полуденного и поступает на участок 4. Выдвижение МКД на участке 3 подтверждают рис. 4а и данные измерений на профиле *B* (рис. 2).

Участок 4 тянется от левой устьевой косы бара в устье рук. Быстрого до правого берега в устье рук. Восточного (рис. 4а). “Входящий угол” между концом участка 3 и левой устьевой косой бара рук. Быстрого постепенно заполняется наносами, поступающими с севера. В сторону моря от этой косы отходит каменно-насыпная дамба, защищающая косу от размыва и предотвраща-

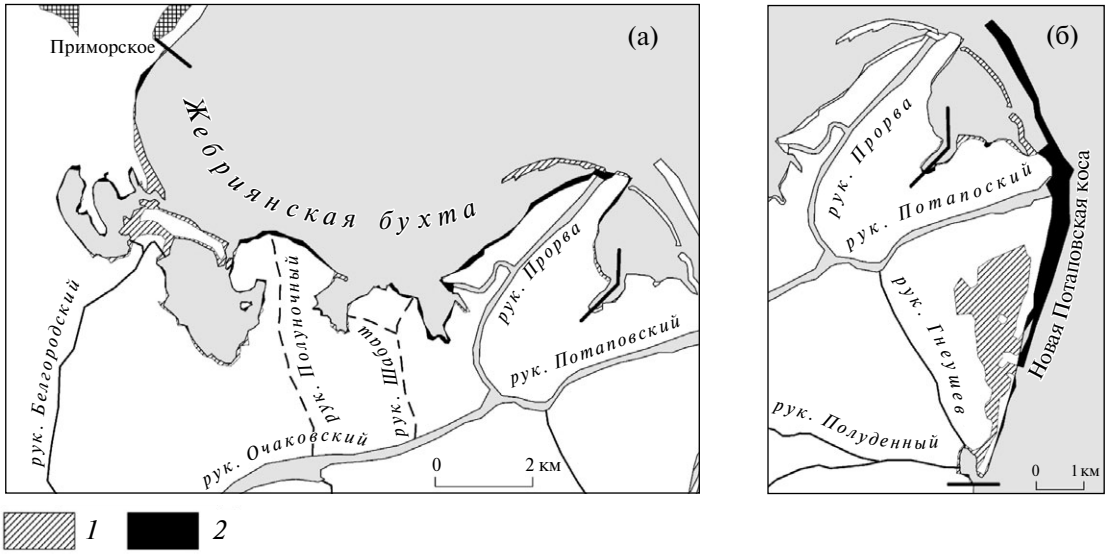

Рис. 3. Изменения МКД Дуная за 2002–2016 гг. на участках 1 (а) и 2 (б): *1* – выдвижение МКД, *2* – отступание МКД.

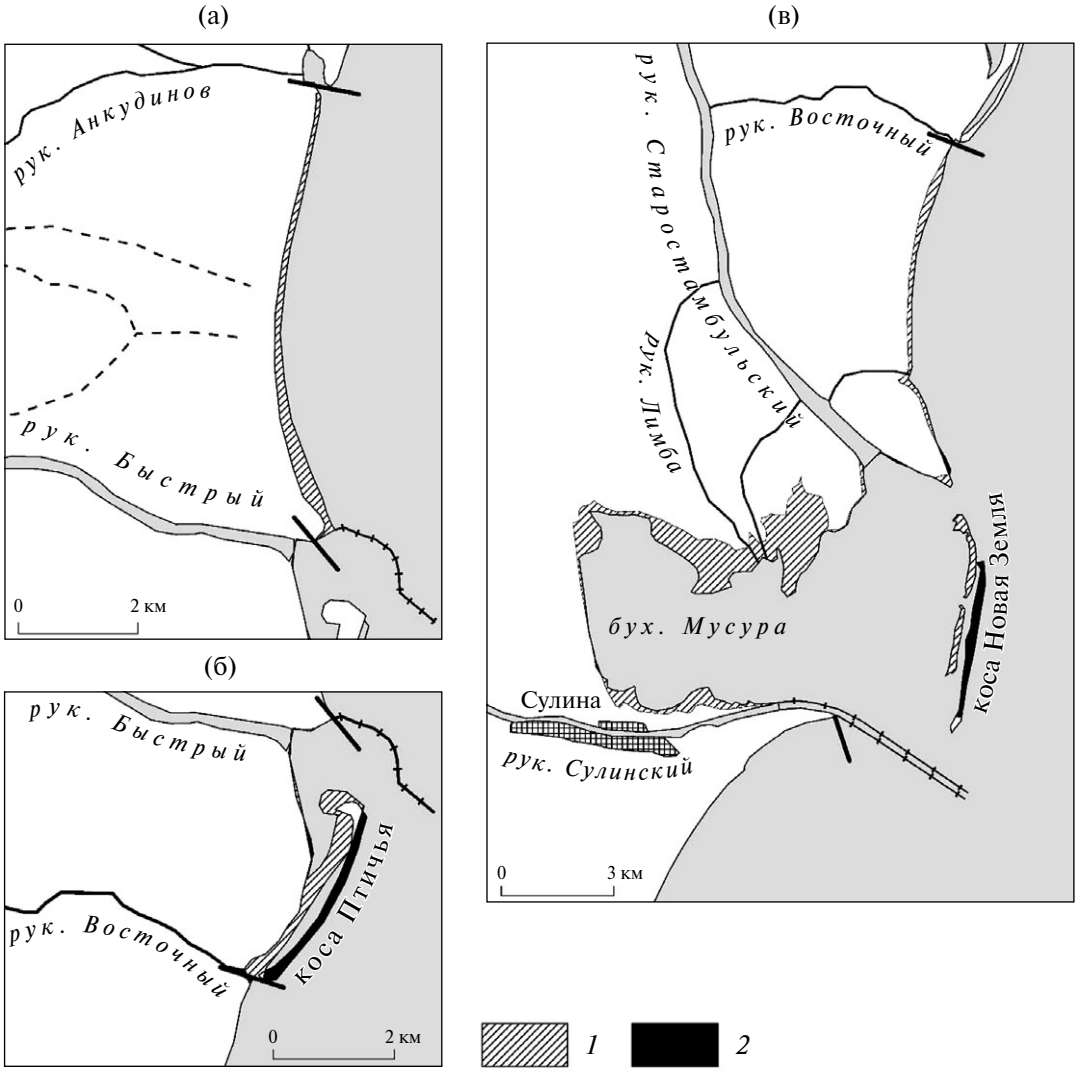

Рис. 4. Изменения МКД Дуная за 2002–2016 гг. на участках 3 (а), 4 (б) и 5 (в): *1* – выдвижение МКД, *2* – отступание МКД.

ющая занесение судоходной прорези через бар рукава.

Во второй половине XX в. в результате перераспределения стока между рукавами Килийской дельты сток воды и наносов рук. Быстрого заметно увеличился. Из речных наносов в его устье сформировался обширный бар. Морское волнение стало постепенно разрушать гребень этого бара; из продуктов размыва сначала сформировалась ориентированная на юг подводная отмель, а затем – параллельная берегу песчаная коса. В первые годы существования косы ее поверхность была песчаной и ровной. Со временем на поверхности появились песчаные бугры, а сама коса стала зарастать. Постепенно она приблизилась к берегу и увеличила свою длину. Лагуна, возникшая за косой параллельно старому берегу, стала местом обитания большого количества водоплавающих птиц. По этой причине коса получила название Птичьей. К 2005 г. южный конец косы достиг положения профиля *C* на рис. 2. Это отразилось на резком увеличении расстояния между репером на старом берегу дельты и новым МКД, т.е. внешним (морским) берегом косы. В последующие годы это расстояние стало медленно уменьшаться (рис. 2), что объясняется смещением косы в сторону старого берега дельты (рис. 4б). К 2007 г. южная оконечность Птичьей косы достигла левого берега в устье рук. Восточного. Началась блокировка этого рукава с морской стороны. Позже блокирующая коса была прорвана, уменьшение стока рукава прекратилось.

Участок 5 охватывает пространство от устья рук. Восточного до молов в устье рук. Сулинского (рис. 4в). Это последний и самый протяженный участок морского края Килийской дельты (табл. 1). На этом участке выходит в море крупный рук. Старостамбульский. В северной части этого участка МКД берег ровный, слегка вогнутый, песчаный, с береговыми валами; в южной части берег низменный, сильно заболоченный, с глубоко вдающейся в сушу бух. Мусура, которую с востока блокирует коса Новая Земля. К северу от устья рук. Старостамбульского до 2002 г. МКД находился в относительно стабильном состоянии с некоторым преобладанием аккумуляции наносов [1], поступавших с севера (профиль *D* на рис. 2). В конце XX в. отмерли отделившиеся от рук. Старостамбульского и выходящие на МКД небольшие водотоки Зуев и Заводнинский.

Наносы из рук. Старостамбульского выносятся далеко в море и в формировании МКД на участке 5 практически не участвуют. Продукты размыва устьевого бара этого рукава частично отлагаются слева и справа от бара. Преобладание аккумулятивных процессов на участке 5 объясняется перехватом баром в устье рук. Старостамбульского и сулинскими молами большей части берегового потока наносов вдоль МКД с севера. За 2002–2016 гг. прирост суши на участке 5 был максимальным – 9.54 км^2 (почти 60% прироста площади всей Килийской дельты), размыв составил всего 0.81 км^2; в итоге площадь дельты только на этом участке увеличилась на 8.73 км^2 (табл. 1).

В 1991–2002 гг. южнее устья рук. Старостамбульского образовалась коса Новая Земля. Ее длина составляет >4 км, ширина – от 20 до 150 м. К 2016 г. коса переместилась в северо-западном направлении на 400 м. Увеличение площади суши на участке 5 (табл. 2) частично объясняется разрастанием зарослей тростника на мелководье вдоль берегов бух. Мусура, а также аккумуляцией наносов в этой бухте, в частности по обеим сторонам от устья рук. Лимба.

За период исследований с 2002 по 2016 г. (табл. 1) по всей Килийской дельте прирост суши на МКД составил 16.32 км^2 (1.17 км^2/ год), а размыв – 3.97 км^2 (0.28 км^2/год). В итоге дельта приросла на 12.35 км^2, из них 71% пришелся на участок 5. По сравнению с данными за 1972–2002 гг. [1], прирост Килийской дельты увеличился в 2.25 раза, а размыв – в 1.5 раза. Возможно, эти изменения связаны также с уменьшением интенсивности повышения уровня Черного моря.

Участок 6 охватывает часть румынского побережья дельты Дуная между рук. Сулинским (точнее – сулинскимии молами) и устьем рук. Георгиевского (рис. 5а). На этом участке МКД ровный, низменный, слегка вогнутый в своей северной части. Вдоль побережья тянется песчаный пляж шириной 50–150 м. Участок 6 оказался единственным на МКД Дуная, где преобладает сильный размыв. Это объясняется отрицательным балансом крупных наносов на этом участке. Поток наносов с севера практически отсутствует (перехватывается сулинскими молами), а наносы рук. Георгиевского сюда не поступают. Размыв МКД на участке 6 выявлен авторами по итогам исследований еще в 2002 г. [1].

Румынские данные также подтверждают отступание МКД почти на всем участке [9, 10, 12]. Однако у изменений МКД на некоторых секторах участка 6 есть свои особенности. Так, по данным [9, 12], на отрезке протяженностью 5 км

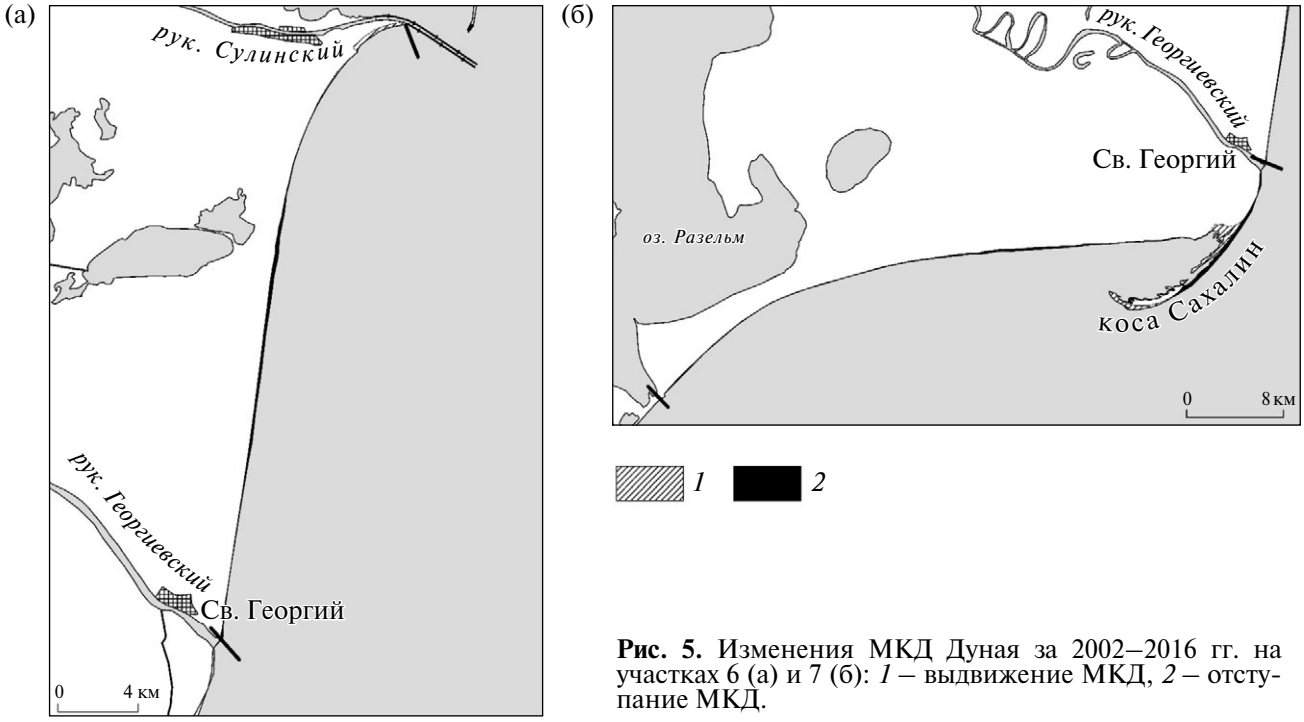

Рис. 5. Изменения МКД Дуная за 2002–2016 гг. на участках 6 (а) и 7 (б): *1* – выдвижение МКД, *2* – отступание МКД.

к югу от сулинских молов, находящемся в их "тени" от воздействия волнения с северо-востока, местный эпизодический вдольбереговой поток наносов в сторону молов приводит к локальному нарастанию суши со скоростью 5.8 м/год. Южнее участок МКД длиной 2 км относительно стабилен. Центральная часть МКД на участке 6 длиной ~20 км подвержена сильной эрозии интенсивностью от 5 до 20 м/год. К северу от устья рук. Георгиевского отрезок МКД протяженностью 6 км находится в динамическом равновесии (отрезки МКД с эрозией чередуются с отрезками с аккумуляцией наносов).

С 2002 по 2016 г. отступание суши на участке 6 составило 0.87 км^2 (табл. 1). По данным [1], в 1883–1972 гг. на этом участке интенсивность размыва была 11–17, в 1972–2002 гг. – 15 м/год. Скорость размыва в 2002–2016 гг., по расчетам авторов статьи, составила 7–10 м/год.

Участок 7 простирается от устья рук. Георгиевского до прол. Портица, соединяющего лагунный комплекс Разельм-Синое с морем (рис. 5б). МКД на участке 7 ровный, слабовогнутый и низменный. Вдоль побережья тянется песчаный пляж. На этом участке МКД площади прироста и размыва за 2002–2016 гг. приблизительно равны друг другу (табл. 1).

Основные многолетние изменения МКД на участке 7 связаны с возникновением и смещением косы Сахалин. В последней декаде XIX в. после крупных половодий в устье рук. Георгиевского образовался обширный бар. Его волновой размыв привел к возникновению ориентированной на юг отмели. В 1897 г. она вышла на поверхность. В прибрежной зоне возникла вытянутая вдоль берега песчаная коса, получившая название Сахалин. В 1900 г. длина и ширина косы составляли 3.2 км и 200 м соответственно [10]. В первой половине XX в. под влиянием вдольберегового потока наносов с севера и выноса речных наносов рук. Георгиевского коса Сахалин постоянно удлинялась в юго-западном направлении в среднем на 100–140 м/год. Одновременно с удлинением под воздействием волнения коса смещалась к берегу, иногда со скоростью 70 м/год [9]. В конце 1970-х гг. коса в северной части примкнула к берегу и изогнулась к западу, отделив от моря длинную лагуну. В 1990 и 2006 гг. длина и ширина косы Сахалин составили 16.7 км и 320 м и 19.2 км и 310 м соответственно [10]. Для косы характерен ровный песчаный берег с мористой стороны и изрезанный, поросший тростником – с другой.

Эволюция косы Сахалин за 1911–2006 гг. приведена на рис. 6.

За период исследований с 2002 по 2016 г. (табл. 1) по всей дельте Дуная прирост суши на МКД составил 21.91 км^2 (1.56 км^2/год), размыв – 10.31 км^2 (0.74 км^2/год). В итоге вся дельта приросла на 11.6 км^2.

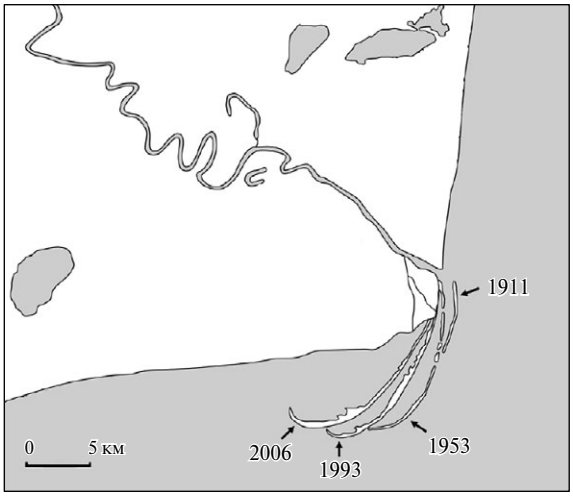

Рис. 6. Эволюция косы Сахалин в устье Георгиевского рук., по [10].

ПРИЧИНЫ ИЗМЕНЕНИЙ МОРСКОГО КРАЯ ДЕЛЬТЫ ДУНАЯ

Исследования динамики МКД Дуная до 2002 г. и в 2002–2016 гг. (с использованием новых космических снимков) позволили выявить основные причины и закономерности изменений МКД.

В качестве физической основы для оценки воздействия различных факторов на динамику МКД может быть использовано уравнение баланса песчаных наносов в береговой зоне.

Для любого участка МКД приходная часть этого уравнения включает в себя поступление на участок крупных наносов, формирующих МКД. Во-первых, это сток песчаных наносов за интервал времени Δt (годы) из ближайшего крупного дельтового рукава: $k_1 W_R \Delta t/\rho_{отл}$, где W_R, кг/год, – сток взвешенных и влекомых наносов рукава; k_1 – доля в этом стоке крупных наносов (обычно k_1 от 0.2 до 0.4), $\rho_{отл}$, кг/м^3, – плотность отложений. Во-вторых, это наносы, поступающие из-за пределов рассматриваемого участка с вдольбереговым потоком наносов: $W_И \Delta t/\rho_{отл}$, где $W_И$, кг/год, – мощность вдольберегового потока песчаных наносов.

Расходная часть уравнения баланса наносов – это песчаные наносы, выносимые за пределы данного участка МКД под воздействием морского волнения. Этот компонент уравнения баланса равен $k_2 Э \Delta t L$, где Э, Дж/м, – энергия волнения на 1 м МКД; L, м, – длина участка; k_2 – размерный коэффициент, связывающий величину волнового размыва МКД с энергией волнения.

Результирующий член уравнения баланса крупных наносов – это изменение за период Δt объема отложившихся или унесенных волнением наносов на участке МКД. Этот член уравнения равен $\Delta F h$, где ΔF, м^2, – изменение площади дельты на участке за период Δt в результате выдвижения МКД (при этом $\Delta F > 0$) или отступании МКД ($\Delta F < 0$), h, м, – толщина слоя отложений, близкая по величине к средней глубине взморья вблизи МКД.

После небольшого преобразования получим:

$$\Delta F = k_1 W_R \Delta t/\rho_{отл} h + W_И \Delta t/\rho_{отл} h - \\ - k_2 Э \Delta t L/h - k_3 \Delta H_м L/i. \quad (1)$$

В уравнение (1) добавлен член, учитывающий непосредственное влияние на ΔF (смещение МКД) изменения уровня моря $\Delta H_м$ (м) за период Δt. Если уровень моря повышается ($\Delta H_м > 0$), то МКД при прочих неизменных условиях либо замедляет выдвижение, либо отступает, если уровень моря понижается ($\Delta H_м < 0$), то МКД ускоряет свое выдвижение. В добавленном члене k_3 – эмпирический коэффициент; L, м, – длина участка; i, ‰, – уклон поверхности либо суши вблизи МКД (если $\Delta H_м > 0$), либо дна устьевого взморья в прибрежной зоне (если $\Delta H_м < 0$).

Уравнение (1) не может быть использовано для точных расчетов смещения МКД, так как коэффициенты k_1, k_2, k_3 заранее неизвестны. Но уравнение (1) позволяет качественно оценить вклад разных факторов в динамику МКД. Чем больше величины W_R и $W_И$, тем активнее выдвигается в море МКД на рассматриваемом участке; чем больше Э и h, тем медленнее выдвижение МКД. При значительной величине энергии волнения МКД может начать отступать.

Использование уравнения (1) позволило на качественном уровне выявить основные причины и особенности динамики МКД Дуная на разных участках.

1. На всех участках (кроме 6) баланс песчаных наносов положительный: в последнее столетие на этих участках преобладало выдвижение МКД; на участке 6 преобладал размыв. Основными источниками наносов на участках 2–5 и 7 с выдвижением МКД был сток крупных наносов рукавов, выходящих на эти или смежные участки рукавов (Потаповского, Быстрого, Георгиевского).

2. Главный приходный компонент баланса наносов – это сток наносов перечисленных рукавов; второстепенный – вдольбереговой поток наносов. При этом значение имеют преоблада-

ющее направление сильных ветров, волнения и, как следствие, мощность вдольберегового потока наносов: в береговой зоне дельты Дуная – с севера на юг. На участке 1 поток наносов с севера от дельты – главная причина заполнения наносами вершины Жебриянской бухты и выдвижения МКД.

3. Установлено, что на формирование дельты и ее морского края большее влияние оказывают не многолетние изменения стока наносов самого Дуная (табл. 2), а перераспределение стока между рукавами дельты. В пределах Килийской дельты перераспределение стока воды и наносов между рукавами привело к постепенному сосредоточению стока в наиболее крупных рукавах (Потаповском, Быстром и Старостамбульском). Этот процесс сопровождается отмиранием многих малых рукавов. Процесс отмирания обычно идет с обоих концов малого рукава: его исток "забивается" отмелями, сползающими вдоль подводящего рукава, а устье малого рукава – песком пляжа на МКД при прибое и накате во время осенних штормов. В Килийской дельте число устьев рукавов в середине XX в. достигало 19, а к 2018 г. сократилось до 10. Отмершие рукава хорошо выделяются на современных космических снимках по характерной древесной растительности на бывших прирусловых валах среди тростниковых плавней.

4. Для дельты Дуная характерны периодические возникновения и трансформации обширных кос к югу от устьев крупных рукавов Потаповского, Быстрого, Георгиевского (рис. 3б, 4б, 5б, 6). Развитие таких кос включает в себя несколько стадий. В период активизации рукава и в год с крупным половодьем в устье рукава формируется обширный устьевой бар. В последующие годы волновой размыв гребня бара приводит к образованию к югу от бара подводной отмели. Позже отмель выходит на поверхность, превращаясь в песчаную косу, которая в дальнейшем увеличивается в длину, смещается к старому берегу дельты, а затем в своей верхней (северной) части примыкает к нему, в результате чего образуется лагуна. Коса, постепенно смещаясь к югу, блокирует и устья небольших рукавов.

5. Особую роль играют огромный бар в устье рук. Старостамбульского и молы в устье рук. Сулинского. Они отклоняют наносы этих рукавов на большие морские глубины и практически исключают их из процесса формирования МКД.

6. Если вдольбереговой поток песчаных наносов, транзитных и образовавшихся в результате размыва МКД на конкретном участке, "упирается" в выдвинутый в море устьевой бар рукава в начале следующего участка, то во "входящем углу" часть наносов отлагается. Такие зоны аккумуляции отмечены к северу от баров рукавов Быстрого и Георгиевского. Такова же причина аккумуляции на участке 5 перед устьем рук. Старостамбульского.

7. На смещение МКД может влиять и изменение (повышение или понижение) уровня Черного моря. Для условий дельты Дуная уклоны поверхности пляжей вблизи МКД и уклоны дна устьевого взморья в прибрежной зоне составляют 3–5‰. При таких уклонах повышение или понижение среднего уровня Черного моря на 0.1 м может привести к смещению МКД в сторону суши (при $\Delta H_м > 0$) или в сторону моря ($\Delta H_м < 0$) на 33–20 м.

ВЫВОДЫ

Проведенные в дельте Дуная в последние десятилетия детальные исследования с применением комплекса полевых и усовершенствованных космических методов позволили сделать ряд важных выводов: 1) характерным индикатором гидролого-морфологических процессов в дельте в целом могут служить изменения МКД на отдельных участках; 2) смещение МКД – это следствие естественного и антропогенного перераспределения стока воды и наносов между рукавами дельты, изменения ветрового режима, волнения и создаваемого им вдольберегового потока наносов; 3) динамика МКД на каждом участке определяется балансом песчаных наносов.

Полученные выводы могут быть распространены на другие крупные неприливные и микроприливные дельты с приглубым или умеренно отмелым взморьем. Такое распространение (с учетом разрозненных сведений об изменениях в дельтах многих рек мира) позволяет сформулировать основные современные тренды в изменении строения и режима таких дельт.

Основные тенденции следующие. 1. Замедление выдвижения дельт в приемные водоемы. Причины этого замедления: выход дельт на большие глубины; антропогенное сокращение стока наносов многих рек в результате сооружения на них крупных водохранилищ; начавшееся в середине XX в. повышение уровня океанов и морей; активизация циклонической деятельности и, как следствие, морского волнения. 2. Сокращение числа устьев дельтовых рукавов, впадающих в море. 3. Увеличение протяженно-

сти участков МКД, подверженных волновому размыву. 4. Уменьшение обводнения пресными водами периферийных участков дельт. 5. Усиление роли водохозяйственных и гидротехнических работ в преобразовании естественного режима и строения дельт.

Некоторые из перечисленных тенденций уже проявились в дельтах Дона, Кубани, Терека, Лены, Яны, Индигирки, Колымы, а также Роны, По, Вислы, Хуанхэ, Янцзы, Инда, Годавари, Нила, Нигера, Миссисипи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидрология дельты Дуная. М.: ГЕОС, 2004. 448 с.
2. Гидрология устьевой области Дуная. М.: Гидрометеоиздат, 1963. 383 с.
3. *Кравцова В.И., Инюшин А.Н.* Динамика дельты Дуная в XXI веке: исследование по космическим снимкам // Геоинформатика. 2018. № 2. С. 45–62.
4. *Левашова Е.А. Михайлов В.Н., Михайлова М.В., Морозов В.Н.* Естественные и антропогенные изменения стока воды и наносов Дуная // Вод. ресурсы. 2004. Т. 31. № 3. С. 261–272.
5. *Михайлов В.Н., Михайлова М.В.* Дельты как индикаторы естественных и антропогенных изменений режима рек и морей // Вод. ресурсы. 2003. Т. 30. № 6. С. 655–666.
6. *Михайлов В.Н., Михайлова М.В., Магрицкий Д.В.* Основы гидрологии устьев рек. М.: Триумф, 2018. 313 с.
7. *Михайлова М.В.* Многолетние изменения строения речных дельт // Вод. ресурсы. 2016. Т. 43. № 5. С. 488–501.
8. *Петреску И.Г.* Дельта Дуная. Происхождение и развитие. М.: ИИЛ, 1963. 279 с.
9. *Dan S., Stive M.J.F., Walstra D.-J.R., Panin N.* Wave climate, coastal sediment budget and shoreline changes for the Danube Delta // Marine Geol. 2009. № 262. P. 39–49.
10. *Dan S., Walstra D.-J.R., Stive M.J.F., Panin N.* Processes controlling the development of a river mouth spit // Marine Geol. 2011. № 280. P. 116–129.
11. *Mikhailova M.V., Cheroy A.I., Mikhailov V.N.* Dynamics of the delta coastline as an indicator of the evolution of the Chilia delta at the Danube mouth // Proc. 23 Conf. Danube Countries on the Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Management. Belgrade, Serbia, 2006. P. 1–10 (CD).
12. *Stanica A., Dan S., Jiménez J.A., Ungureanu Gh.V.* Dealing with erosion along the Danube Delta coast. The CONSCIENCE experience towards a sustainable coastline management // Ocean & Coastal Management. 2011. № 54. P. 898–906.

MULTIYEAR CHANGES OF THE DANUBE DELTA MARINE EDGE

©2019 M. V. Mikhailova[1, *], V. I. Kravtsova[2, **], V. N. Morozov[3, *]**

[1] Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences
Russia 119333 Moscow
[2] Lomonosov Moscow State University
Russia 119991 Moscow
[3] Danube Hydrometeorological Observatory
Ukraine 68609 Izmail
*e-mail: *mv.mikhailova@gmail.com, **valentinamsu@yandex.ru,***morozov@dhmo.org.ua*

Received: 06.10.2018
Revised version received: 06.10.2018
Accepted: 18.10.2018

With the help of field and remote (space) methods, detailed studies of long-term changes of the Danube delta coastline (DCL) were carried out. It was established that the DCL displacements (progradation or retreat) can be an effective indicator of delta formation process as a whole: the dynamics of the delta channel network and the redistribution of water flow and sediment load between the branches, the impact of external factors on the delta (river water flow and sediment load, wind and wave action, rise or drop of the sea level). To determine the causes and characteristics of the Danube DCL changes on seven genetically homogeneous areas the contribution of various factors to the balance of sand sediments forming the DCL was evaluated. Locations of the DCL progradation or retreat were determined. Comparison of the results of a study of the Danube DCL dynamics with the data on changes of morphology and regime of other large deltas may allow one to assess the causes and trends of modern processes in river deltas.

Keywords: Danube, delta, water flow and sediment load, sea level, wave action, delta coastline, delta progradation and retreat.

DOI: 10.31857/S0321-0596465474-484