ГЕОМОРФОЛОГИЯ, 2021, том 52, № 4, с. 125–136

НАУЧНЫЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 551.468 →551.435.3 (282.243.76)

СОВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА МОРСКОГО КРАЯ КИЛИЙСКОЙ ДЕЛЬТЫ ДУНАЯ: ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ И ПРОГНОЗ

© 2021 г. Ю. Д. Шуйский[1,*], Г. В. Выхованец[1,*], А. Л. Чепалыга[2,], Л. В. Орган[1,*], Д. О. Адаева[2,***]**

[1] *Одесский национальный университет им. И.И. Мечникова, Одесса, Украина*

[2] *Институт географии РАН, Москва, Россия*

* *E-mail: physgeo_onu@ukr.net*

** *E-mail: tchepalyga@mail.ru*

*** *E-mail: do.adaeva@igras.ru*

Поступила в редакцию 03.08.2020 г.
После доработки 07.06.2021 г.
Принята к публикации 28.06.2021 г.

Килийская дельта представляет собой самую молодую (возраст 200–300 лет) часть дельты Дуная. Она относится к типу дельт выдвижения, впадает в неприливное море, отличается высокой динамичностью и находится сейчас на стадии интенсивного формирования. Об этом свидетельствуют наши исследования, включавшие в себя полевые маршрутные и стационарные геоморфологические и гидролого-морфологические, а также камеральные работы, проводившиеся на протяжении минувших десятилетий, начиная с 1962 г. Собраны данные о морфологических особенностях устьев рукавов Дуная, аккумуляции наносов, о вдольбереговом распределении волновой энергии. Выделены 3 участка морского края дельты. Северный участок связан, главным образом, с Очаковским и Потаповским рукавами, находится под влиянием порта Усть-Дунайск, в его пределах активно растет подводная аккумулятивная терраса и появляется новая суша. Центральный участок формируется под воздействием значительно увеличенного вдольберегового стока наносов, направляющегося от северного участка дельты и изменения водности Старо-Стамбульского и Быстрого (Ново-Стамбульского) русел, а также новейших прорезей русел Цыганского и Мусура. Наиболее динамичные процессы перераспределения стока воды, донных наносов и изменений рельефа происходят на южном участке Килийской дельты, где образовались новые русла (Лебединка, Курильское, Абазычное и др.), и в стадии формирования находятся озера (Цыганское, Мусура, Попина́, Сулинское), а также новые дельтовые острова, например островной бар Новая Земля. Разработан предварительный общий прогноз развития южного участка дельты на ближайшие 20–30 лет, которое может затронуть не только природную среду дельты, но и хозяйственные объекты (порты Усть-Дунайск и Сулина, судоходную прорезь сквозь устьевой бар на входе в рукав Быстрый), а также пересмотреть расположение государственной границы с Румынией.

Ключевые слова: Черное море, Дунай, русло, наносы, рельеф, портовые молы, динамика проток, заиление

DOI: 10.31857/S043542812104009X

ВВЕДЕНИЕ

Дельта одной из крупнейших рек Европы, Дуная, относится к весьма динамичным экзогенным образованиям. В течение десятков лет контуры береговой линии, отдельных рукавов, положение морского края, глубины способны быстро меняться. На эти изменения накладываются долговременные колебания уровня неприливного Черного моря и климатических характеристик (рис. 1). Поэтому изменения, вызванные природными и антропогенными факторами в течение минувших двух-трех десятилетий требуют дальнейших исследований.

Регулярные прямые стационарные, маршрутные и дистанционные исследования Килийской дельты Дуная коллективом авторов Одесского университета им. И.И. Мечникова и Института географии РАН обеспечили получение качественных данных о формах рельефа и об их динамике на различных частях морского края дельты. Полевые исследования выполнялись вдоль всего морского края Килийской части дельты Дуная, с топографическими съемками на стационарных участках, в общем, каждые 3–4 года. На участках

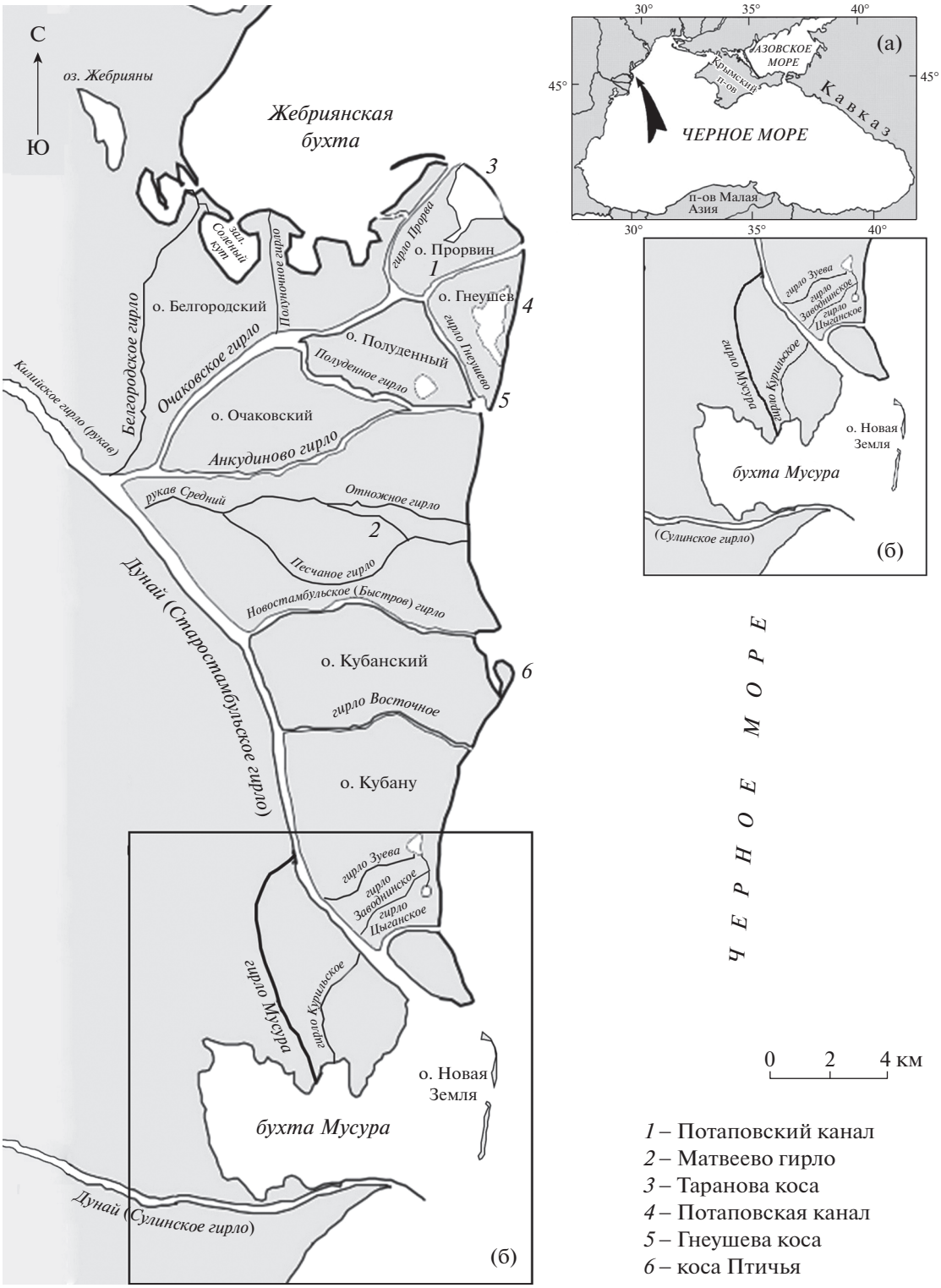

Рис. 1. Географическое месторасположение Килийской части дельты Дуная на побережье Черного моря (а). Границы южной части Килийской дельты (б) также охватывают Сулинское устье. Несколько маловодных проток из гирл Старо-Стамбульского и Мусуры достигают юго-западной акватории бухты Мусура, часть их соединена с Сулинским гирлом.

отбирались пробы наносов, в основном с новообразованных форм рельефа и с подводного склона. Работами были охвачены все части дельты: северная, центральная и южная (рис. 1). Активно использовались данные с топографических карт и космических снимков 1984–2017 гг.

На сегодня научные исследования позволили оптимизировать использование природных ресурсов (рыболовство, животноводство, промысел зеленой растительной массы, использование дунайских вод и проч.). Особое значение придается судоходству по рукавам дельты. К настоящему времени особенно сложные процессы, изменяющие облик рукавов и кардинальные изменения рельефа дельты, происходят в месте контакта Старо-Стамбульского (Украина) и Сулинского (Румыния) рукавов [1–4]; они сложились под влиянием оградительных молов из порта Сулины, изменения водного режима в Черном море и на водосборном бассейне Дуная, и твердого речного стока. Возможные сценарии развития Сулинского устья на территории Румынии были рассмотрены ранее, например, в работах [5–7]. Регулярные геоморфолого-гидрологические исследования выполняются учеными разных организаций [1, 8, 9]. Подробные морфометрические и литодинамические натурные исследования проводились не только Дунайской Гидрометеорологической обсерваторией (Украина), Институтом Водных проблем РАН, Институтом географии РАН и других, а также Одесским национальным университетом [1, 5, 8–12], т.е. более 40% от числа цитированных источников. Вместе с тем до настоящего времени южная часть Килийской дельты оставалась наименее исследованной. Заметные изменения затронули весь морской край Килийской дельты Дуная. Обзор предыдущих исследований достаточно полно был изложен в работах [4, 6, 8, 13, 14].

Цель статьи – выявить основные закономерности динамики рельефа на морском крае Килийской дельты, особенно в ее южной части, на участке взаимовлияния Килийского и Сулинского рукавов дельты Дуная, необходимых для понимания процессов формирования речных дельт выдвижения и оптимизации использования природных ресурсов. Для достижения цели работы нами решаются такие главнейшие задачи: а) общие вопросы развития Килийской дельты; б) динамика рельефа в ее северной части; в) динамика рельефа в южной части дельты. Мы исследовали формы рельефа и их преобразование в процессе взаимодействия речных и морских факторов, включая подводный склон устьевого взморья, а также ряд характеристик дельтовых наносов.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основная часть материалов статьи получена авторами во время полевых маршрутных и стационарных геоморфологических и гидролого-морфологических, а также камеральных исследований на протяжении минувших десятилетий. Среди них – профилирование небольших русел с помощью троса и наметки длиной 6 м, с измерениями глубин и скоростей течений, с отбором проб речной воды батометром-бутылкой (емкость 1 л). Выполнялись повторные тахеометрические съемки пляжей и прилегающего берега дельты в масштабах 1:2000 и 1:1000, достаточно точное нивелировочное и эхолотное профилирование. Местоположение створов и отдельных станций производилось с помощью прибора GPS OTREX фирмы Garmin. Для промера глубин на широких рукавах дельты применялся электронный эхолот Humminbird Piranha-210 (USA), а для нивелирования – нивелир Karl-Zeiß-27H производства ГДР. Использовались морские навигационные карты, особенно листы, обозначающие подходы к портам Сулина и Усть-Дунайск, а также к входу в рукав Быстрый, различных лет составления (начиная с 1940 г.). В качестве вспомогательных использовались данные, которые содержатся в публикациях В.Н. Михайлова и В.Н. Морозова [7], М.В. Михайловой и др. [8], Н.А. Берлинского [9], а также А.И. Череня [12] и румынских авторов [2, 3, 11]. В течение последних 20 лет каждый год нами ведется маршрутное обследование морского берега дельты, с полным соблюдением правил природоохраны на территории Дунайского Биосферного заповедника и использования новых дистанционных масштабированных изображений дельты.

Все новые изменения берега фиксировались прежде всего с помощью прибора GPS, а также путем тахеометрической съемки форм первичного дельтового рельефа. Полученные натурные и лабораторные материалы были дополнены маршрутными исследованиями, наблюдениями на береговых стационарных участках. На всех первичных новообразованных террасах и островах установлены жесткие репера (16 шт.), которые служат началом постоянного теодолитного хода вдоль общего направления береговой линии и поперечного промерно-грунтового профиля пляжа и подводного склона. На каждом участке одновременно выполнялись съемка рельефа (масштаб 1: 2000) и нивелирование поперечных профилей с отбором проб наносов ручным колонковым пробоотборником (длина керна 0.25 м). Активно использовались космические снимки системы GOOGLE Earth и их оптическое дешифрирование. В лаборатории Одесского университета образцы наносов обрабатывались стандартными методами водного и ситового анализа, с дальнейшим применением методов статистического анализа и с учетом предыдущей лабораторной обработки материалов. Сопоставление крупномасштабных карт с данными прямых топографических съемок и космическими снимками позволило получить достоверную информацию о динамике морского края дельты и прилегающего подводного склона.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ЧЕРТЫ РАЗВИТИЯ КИЛИЙСКОЙ ДЕЛЬТЫ

К современному состоянию любой части природной системы приводит ее предшествующая эволюция. В речных дельтах, в том числе и Дунайской, она напрямую зависит от стока воды и наносов, а также от волнового режима на приглубом взморье и механизма разноса наносов в волновом потоке. Как известно, в 50–60-х годах XX века средний сток воды за год на Килийском гирле Дуная мог достигать 70% всего количества воды, протекающей до вершины дельты Дуная [13–15]. С того времени в дельте происходили особенно сильные антропогенные изменения.

Наши длительные маршрутные исследования подтвердили, что изменения заключаются в искусственном перехвате воды для ирригационных и бытовых нужд, для заполнения зарыбленных внутридельтовых озер, для пополнения водой небольших внутренних судоходных русел. Повышение средних многолетних приземных температур воздуха T_{at} усиливает испарение воды на площади дельты [4]. Нередко донный русловой грунт после дноуглубления судоходной службой Румынии перебрасывался в украинский Килийский рукав из Сулинского и Георгиевского с целью стимулировать заносимость украинского навигационного пути и создать значительные трудности для прохождения плавсредств. Значительным явился перехват воды из Килийского рукава путем возведения струенаправляющей дамбы в устье Тульчинского рукава и выравнивания меандров Георгиевского рукава: в 1950-е годы его длина была равной 108 км, а сегодня – 67 км (по топографической карте дельты Дуная масштаба 1:25000, корректировка 2011 г.).

Сравнение навигационных и топографических карт между собой и с космическими снимками за минувшие десятилетия показало: дельтовый Килийский конус выноса существенно нарастал [4, 6, 13, 14]. Такое явление было предопределено тем, что вся масса дунайского аллювия от 28.5 до 50.4 млн т/год (т.е. от 713 до 1260 т/пог. м) в течение разных лет периода 1893–2008 гг. не могла быть переработана морскими волнами полностью, как и во время предшествующих 50 лет наших исследований [8, 15]. Общий сток водотоков Очаковской части Килийской дельты сократился в среднем на 17%. За это время на построение новообразования Килийского конуса расходовалось в среднем 360 кг/сек осадочной взвеси (31.536 млн т/год) плюс 5% (1.6 млн т/год) влекомого материала вдоль берега дельты от середины Белгородского бара в вершине Жебриянской бухты и до корня Отножной косы.

Сценарий последующей стадии развития Килийской дельты Дуная был предварительно предсказан в общих чертах в работах [1, 15], по которому сокращение водоносности сопровождалось некоторым небольшим ростом стока наносов. Основная причина этого дополнительного притока – активизация смыва осадочного материала со склонов Южных Карпат и Старой Планины в Дунай и в его притоки в условиях роста количества атмосферных осадков, в основном ливневых, как, например, в июне 2020 г. Свою долю внесли румынские навигационные службы, выбрасывая материал дноуглубления в Килийский рукав дельты. Произошло заметное усиление размыва склонов в долинах притоков, у берегов речных русел в Сербии, Румынии и Болгарии и активной вырубки лесов на водосборе Нижнего Дуная [11, 16, 17].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Северная часть Килийской дельты. Северная (Очаковская) часть Килийской дельты получает около 35 млн т/год (или 790 т/пог. м) дунайского аллювия при среднем многолетнем расходе воды около 3800 м^3/год, включая не только гирла Очаковское и Потаповское, но также Гнеушево, Белгородское, Полуденное, “технический канал” и др.

Это привело к активизации прироста подводной аккумулятивной террасы на взморье вокруг морского края в северной части дельты и формированию резкого свала глубины на подводном склоне, от 2–3 м до 8–18 м на разных галсах. Согласно расчетам по методу Р.Я. Кнапса [10, 11], доминирующие северные волнения подходят к береговой линии под острыми углами от 30 до 89. Результаты расчетов показаны на рис. 2. Сложившееся русловое удлинение привело к замедлению течений в руслах, отложению наносов и к обмелению дельтовых русел. Стоковое течение из того или иного русла на морском крае превращается в “гидравлическую буну”, которая отклоняет к югу нарастающие в море прирусловые валы, а затем может превратить их во вдольбереговую косу, как, например, Потаповскую, Птичью или Цыганскую. Соответственно, значительно активизируется русловое удлинение на морском крае, особенно у русел Очаковского, Потаповского, Цыганского и Старо-Стамбульского дельтовых рукавов. При этом морские волнения не в состоянии переработать весь речной аллювий, и порядка 20–25% его уходит на юг, в сторону устья рукавов Быстрого и Старо-Стамбульского, по определению В.И. Череня [12] и нашим более ранним расчетам [15]. Небольшая часть речных наносов, преимущественно влекомых, относительно крупных (главным образом ≥0.08 мм), остаются в составе подводной террасы. Во время небольших и умеренных волнений они, переотлагаясь, продвигаются в сторону береговой линии и образуют при этом первичные бары и косы (“пионерные формы”), согласно [1, 10]. Поэтому пер-

вичные формы образуются, прежде всего, при устьях соответствующих рукавов на поверхности отмелой подводной террасы.

Первичные (“пионерные”) формы рельефа распространяются в виде продолжения прирусловых валов на поверхности подводной террасы вдоль морского края Килийской дельты. В условиях действия морских волнений вдоль береговой линии валы удлиняются также и вдоль берега, вслед за направлением действия волнового энергетического потока. Одновременно на соседних участках формируются волновые микро-косы и микробары [1, 11]. Все они, как выяснилось в результате полевых обследований, обеспечивают нарастание береговой линии. Причем названные первичные формы сложены наносами из русел рек и с подводного склона, в основном самыми крупными влекомыми. Примерами могут служить Гнеушева коса, Потаповские мелкие бары, Таранова коса, мелкие бары Прорвины, бары Полуночной бухты и др. в море вокруг северной части Килийской дельты вблизи рукавов Прорва, Очаковский и Потаповский (рис. 1). Отчлененные ими мелкие отрицательные формы могут заполняться наносами и зарастать водными растениями, превращаться в плавни или озера. Но они могут быть размыты частично или полностью, а затем восстановиться в другом месте и в виде другой микроформы рельефа. Поэтому нами обнаружено возвратно-поступательное нарастание морского края большей части дельты [10, 11], а не поступательное, как считают другие исследователи [4, 13].

Под влиянием этих рельефообразующих процессов полоса морского края Килийской дельты Дуная может выдвигаться в море, чему способствует окаймляющая подводная терраса. Но такое выдвижение не происходит непрерывно. Неравномерный волновой режим и водный режим Килийского гирла, наряду с наращиванием морского края, могут приводить и к размыву, и отступанию берега. С другой стороны, мы не раз наблюдали процессы нарастания берега во время сильных половодий, во время которых даже значительные по размерам волны не могли размыть дельтовый берег. При этом в море из реки выносилось повышенное количество крупных наносов (Md = 0.060 мм), а в межень при уменьшении водности и уклонов воды в русле размер частиц на дне уменьшается до Md = 0.016 мм. Такие мелкие наносы в основном выносятся в море и в построении пионерных форм рельефа почти не участвуют. Таким образом, толщи отложений в дельте Дуная формируются во время разных фаз волнового режима, отличающихся силой волнений и направлением их действия, и наложения на них режима стока речных наносов (в фазы нарастания половодья, спада половодья и межени). Процесс становления и развития состава и структуры новейших отложений в дельтах выдвижения происходит в условиях активной гидрогенной сепарации и многократного переотложения.

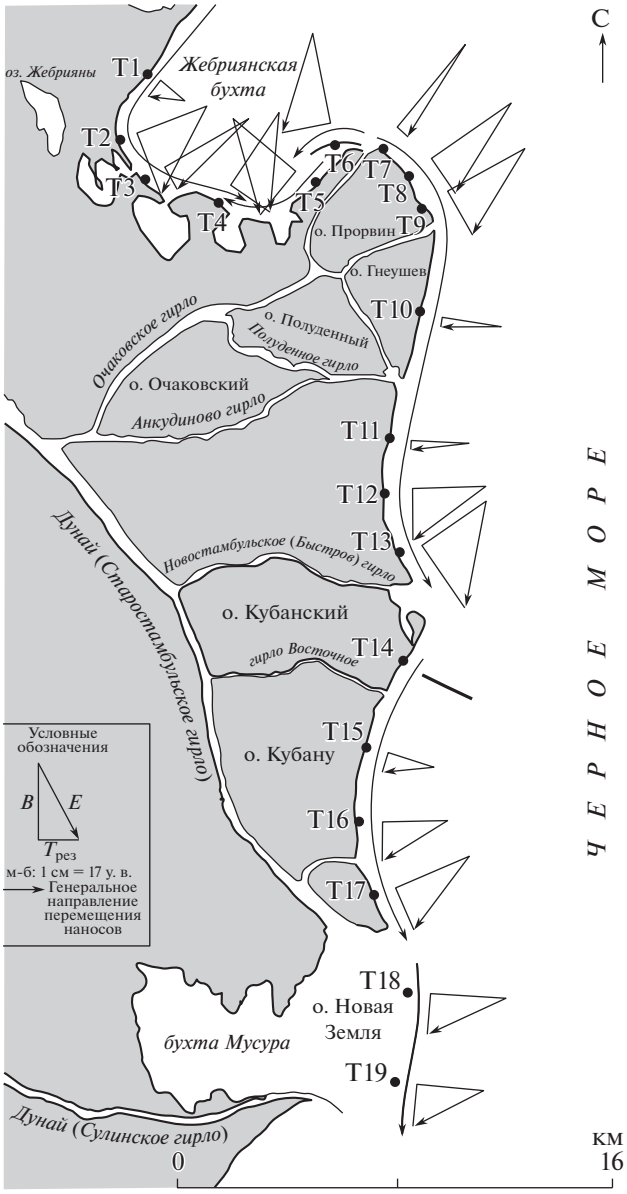

Рис. 2. Схема экспозиции энергетических характеристик Килийской части дельты Дуная (среднее за год период 1984–2018 гг.).

E – волно-энергетическая равнодействующая; $T_{рез}$ – вдольбереговая наносодвижущая сила; B_n – нормальная к берегу составляющая – “прибойная сила”; сплошная линия-стрелка указывает направление вдольберегового потока волновой энергии и наносов.

Центральная часть Килийской дельты. Бóльшая часть взвешенных наносов Очаковской (Северной) системы движется вдоль морского края на юг, в направлении устьев рукавов Быстрого и Старо-Стамбульского, согласно расчетам вдольберегового потока ветро-волновой энергии по

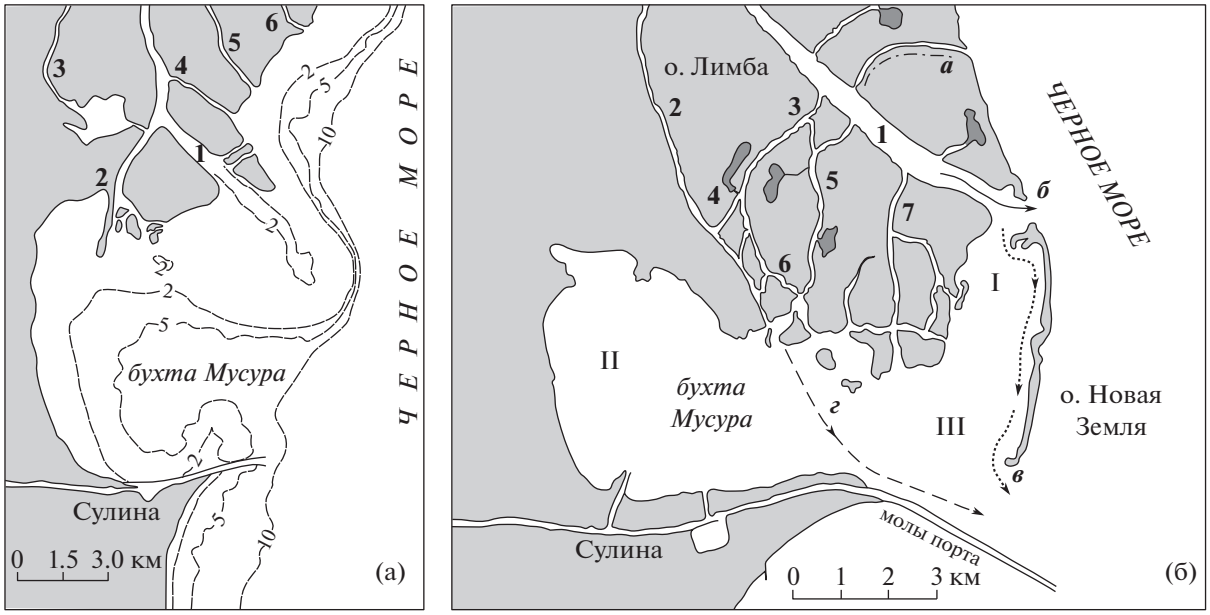

Рис. 3. Схема строения южной части Килийской дельты Дуная и контуров изобат (глубины 2, 5 и 10 м), включая бухту Мусура и портовые молы Сулины по данным Государственной гидрографической съемки 1940 г. (а) и схема строения южной части Килийской дельты Дуная по данным географического анализа космической съемки в системе Google Earth в июне 2020 г. (б).

(а) – *дельтовые гирла:* 1 – Старо-Стамбульское, 2 – Лимба (Мусура), 3 – Попина́, 4 – Харлашкин желобок, 5 – Ананькино, 6 – Абазичное.

(б) – *действующие русла:* 1 – основное Старо-Стамбульское, 2 – Лимба, 3 – Лебединка, 4 – Дальнее, 5 – Курильское, 6 – Харлашкин желобок, 7 – Купеческое. *Основные новейшие направления течения речной воды по руслам*: ***а*** – Цыганскому, ***б*** – Старо-Стамбульскому, ***в*** – Южной протоке, ***г*** – по Мусуре. *Прогнозируемые крупные внутридельтовые озера:* I (Цыганское), II (Мусура), III (Сулинское). *Заливка:* светлым тоном – поверхность дельты и плавни, темным тоном – внутридельтовые озера.

методу Р.Я. Кнапса (рис. 2). В целом расчеты результативного вектора энергии E весьма близки расчетам по другим методам (до ±4°), что вполне достаточно. К югу движутся наносы из большинства дельтовых русел Килийского гирла, т.е. в среднем около 70% за минувшие десятилетия (или от 22.0 до 36.0 млн т/год). Этот осадочный материал является аллювием, вынесенным из Килийской дельты в глубоководную часть дна Черного моря. Остальные 30% поддерживают размеры подводной окаймляющей террасы, первичных баров и кос, пляжей на протяжении до Сулинского гирла. Формирующиеся при этом значительные концентрации наносов могут обеспечить весьма высокую динамичность дельтового рельефообразования при волновом влиянии неприливного моря.

Однако, начиная от устьевых участков Отножного и Песчаного рукавов, по мере движения на юг, на траверсе гирл Быстрого и Восточного (рис. 1), ширина подводной террасы резко уменьшается (в 2.7 раза). Данное явление обусловлено тектоническим опусканием этой части дельты, на котором расположен один из крупных дельтовых рукавов – Быстрый [1, 8]. Поэтому внешняя кромка террасы (глубины 2–5 м) со свалом глубин на отметках –11–16 м приближается к берегу, который здесь образует вогнутую дугу. В этих условиях значительная часть наносов из волнового потока уходит от внешнего края дельты на глубины более 16 м, где подхватывается струей Западного Черноморского течения и переносится в сторону мысов Калиакра и Инеада далеко на юг, вплоть до турецкого побережья. Часть наносов, в которой доминируют частицы с Md = 0.015–0.018 мм, достигает Старо-Стамбульского гирла, участков возле устья гирла Цыганского и островного бара Новая Земля (рис. 3). В результате значительно усиливается мутность вод в южной части Килийской дельты, а крупность наносов может быть высокой ($Md \leq 0.31$ мм) под влиянием волновой дифференциации.

В целом во фронтальной части морского края Килийской дельты, между Гнеушевым и Цыганским устьями сформировались короткие отрезки нарастающих берегов и более протяженные отрезки динамически стабильных и размываемых. Типичными нарастающими устьями являются Потаповское, Гнеушево, Быстрое и некоторые другие. К наиболее протяженным вогнутым участкам берега относится участок между устьями Быстрого и Цыганского рукавов. На аккуму-

лятивных участках берег нарастает с трендом до 8–10 м/год. На вогнутых берегах чаще всего происходит отступание на 1–2 м/год. Но при этом отступание может смениться гораздо более быстрым нарастанием, чего мы не наблюдали на околоустьевых участках накопления наносов. Именно за счет периодов сильного нарастания дельтового берега моря в вогнутых дугах происходит нарастание общего размера Килийской дельты Дуная.

Южнее принесенные с севера наносы присоединяются к небольшим выносам малых рукавов Заводнинского, Цыганского, Курильского, Лебединки, Мусуры и главного русла Старо-Стамбульского в южной части Килийской дельты. Все они принимают участие в текущих изменениях рельефа южной части Килийской дельты. По своей крупности и количеству наносы этих рукавов достаточно крупные и подходящие для существенных изменений рельефа, поскольку прошли достаточно сильную первичную дифференциацию во вдольбереговом потоке и в сумме обладают огромной массой (>1 млн т/год) [11, 13, 17]. Основная их масса наращивает подводную аккумулятивную террасу и надводный бар Новая Земля. Значительная часть наносов продолжает откладываться на дне бухты Мусура. При этом важной особенностью является наличие необычайно длинных портовых молов, заметно влияющих на развитие исследованной нами дельты (рис. 4) [5, 8]. В частности, они постоянно удлиняются, и сегодня их длина превышает 10 км.

Южная часть Килийской дельты Дуная. Эта часть дельты – еще одна, где в море впадает крупный рукав (Старо-Стамбульский, длина ≈25 км в 2019 г.), как показано на рис. 3. В море он несет ≈37% того количества воды, которое измерялось на створе "Килийский рукав 20-й км", а сток наносов на том же участке русла был равен ≈36% (по данным В.Н. Михайлова и В.Н. Морозова [7]). Наиболее интенсивно развиваются гирла Цыганское и Лимба, причем, второе подвержено воздействию также и течения при ветровых сгонах и нагонах. Если в 1960 г. Цыганское пропускало по руслу 0.7% воды от количества на гидрологическом створе "Килийский рукав 20-й км", то в 2015 г. уже 4.2%. Аналогичная тенденция действует и по совершенно новым рукавам Лебединка (≈1.8%) и Курильское (≈0.8%). В них отрицательные изменения происходят в основном за счет руслового удлинения, которое постепенно активизировалось по мере обмеления бухты Мусура.

Как видим, тренд отражает отмирание рукавов, которые впадают в бухту Мусура. В ней же четко выражены заносимость и обмеление, появляются низкие островки, часто заросшие водными растениями. Вместе с тем в минувшие десятилетия эта бухта отчленяется от Черного моря,

Рис. 4. Общий вид парных защитных молов Сулинского порта, которые перекрыли движение влекомых и части взвешенных наносов из Дуная на юг. Вид с северо-запада на юго-восток.

прежде всего островным баром Новая Земля (рис. 3). Складывается тенденция, согласно которой Мусура может превратиться в одно или несколько внутридельтовых мелководных озер. В этом процессе немалую роль играют парные молы на продолжении Сулинского гирла, выдвинутые в открытое море на расстояние около 14 км, начиная от портового гидрометеорологического поста (рис. 4). Они стали на пути движения наносов к югу, соответственно ветро-волновому режиму на придунайской акватории Черного моря. Это повлекло за собой дальнейшее обмеление Мусуры (сравнить рис. 3, (а) и (б)). На морском крае этой отмели, как и на подводной аккумулятивной террасе северной Очаковско-Потаповской части Килийской дельты, сложились условия для образования бара по генезису, подобному Новой Земле [5]. После этого Мусура хоть и оказалась блокированной, но в ней сложилось стоковое течение вдоль тыльной части бара – из Старо-Стамбульского рукава напрямую к Сулинским

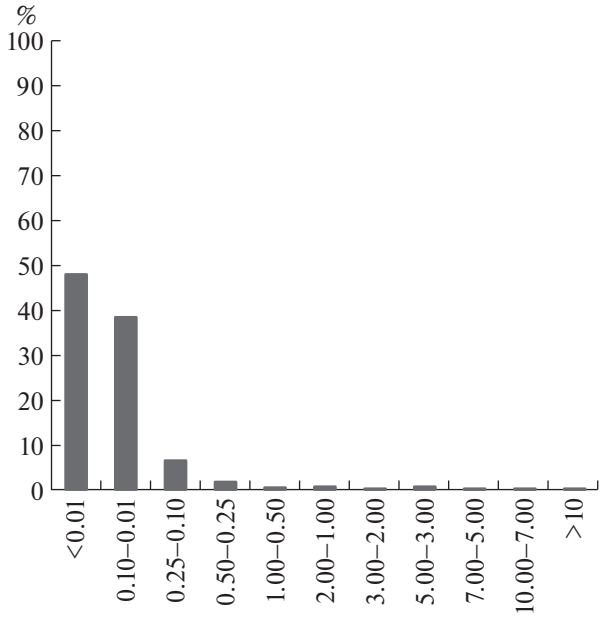

Рис. 5. Гистограмма распределения фракций речных/дельтовых наносов в составе аллювиального материала (среднее из 74 проб наносов) в южной части Килийской дельты Дуная.

молам и далее в море по проливу между баром и молами. Значительная часть движущихся с севера речных наносов стала проходить мористее бара далее на юг, а в нарастании непосредственно дельты она в общем перестала участвовать. Зато сложилась новая проблема для безопасного судоходства по огражденному молами судоходному каналу в порт Сулина и в Сулинское гирло в целом [5]. На это явление было обращено внимание, с соответствующими объяснениями после полевых исследований 1970-х годов и исследований новейшего картографического материала и данных космосъемок [1, 3].

Островной бар Новая Земля закрепился, отодвинул береговую линию в сторону моря настолько, что вдольбереговой поток наносов достиг выхода из молов Сулинского порта и создал реальные перспективы для усиления заносимости этого судового пути. Волновой бар сложен достаточно мелкими и подвижными наносами, которые течения способны рассеивать в море на расстояние до глубин >20–30 м (рис. 5). Приходится снова удлинять молы и выдвигать их все глубже в море, возможно, создавать новые искусственные формы рельефа для обеспечения безопасного судоходства по Сулинскому гирлу. В общем, взаимовлияние Старо-Стамбульского и Сулинского гирл обеспечивается воздействием оградительных молов и процессом смешения речных и морских вод. Особенно заметны смешения планктонных организмов, растворенных и взвешенных веществ, ряда растворенных газов.

ЭЛЕМЕНТЫ ПРОГНОЗА ЮЖНОЙ ЧАСТИ ДЕЛЬТЫ

Охарактеризованные выше изменения рельефа создали новую ситуацию в южной части Килийской дельты. За период с 1940 до 2020 г. длина бухты Мусура, вытянутой субширотно, стала больше, от 6.2 до 9.3 км, за счет выдвижения в море соседних участков (о-ва Цыганского и бара Новая Земля). Одновременно ширина (с севера на юг) бухты составила по центру в 1940 г. 7.6 км, а в 2020 г. – 2.6 км (рис. 3, (а) и (б)). Зарождение отмели, будущего бара Новая Земля прослежено по топографической карте масштаба 1:25000 в 1987 г., а основные его черты оформились в 2002–2004 гг. Что касается глубин, то 80 лет назад в третьей части дна бухты преобладали глубины 5–7 м (максимум 11 м) [5]. Средняя глубина была равной 5.8 м в то время, как в 2020 г. только 0.32 м. При этом усилилось сгонно-нагонное влияние на заполнение наносами, – включился механизм общей гидрогенной “откачки” взвеси из бухты. Все это признаки очень быстрого переформирования южной части Килийской дельты Дуная.

Наиболее интенсивное нарастание морского края дельты начинается с такого усиления сброса речных наносов в море, при котором подводная аккумулятивная терраса создает устойчивое прибрежное мелководье [1, 15]. В южной части дельты это четко видно по мощному конусу из Старо-Стамбульского русла, оконтуренному глубинами 2–5 м, с очень крутым подводным склоном (i = = 0.039–0.052). Такая пологая и очень широкая терраса служит эффективным гасителем ветровых волн, причем, при встрече на ее верхней кромке волна почти мгновенно теряет наносодвижущую способность. Поэтому вдоль кромки происходит отложение наносов определенного состава (рис. 5) в виде баров и кос, как мы видим на примерах кос: Портовой, Тарановой, Потаповой, Птичьей и прочих, включая бар Новая Земля (рис. 3, б). Размеры этого бара растут, но, согласно [14], – медленно, питаясь при этом наносами из русел севернее Цыганского и Старо-Стамбульского.

Одновременно с ростом бара увеличивается количество наносов, выносимых из Старо-Стамбульского русла в бухту Мусура и снижается количество наносов, приносимых вдольбереговым потоком от северной стороны дельты. Видимо, со временем, учитывая изменения прошедших десятилетий, вероятно, через 20–25 лет данный бар закроет бухту Мусура и сток воды из второстепенных рукавов Старо-Стамбульской системы. Одновременно поток речной воды из главного рукава будет “искать” наиболее короткий путь в море. Если в течение 2–3 ближайших десятилетий водность в главном рукаве будет повышаться, то наиболее вероятно, что он станет закрываться южнее

о-ва Цыганского по трассе вдольберегового волнового потока. Тогда восстановится и расширится гирло Цыганское, и по нему пойдут воды главного рукава (***а*** на рис. 3, б), тем более что этот рукав пока еще короткий, с повышенным уклоном поверхности воды на акватории и продолжает перехватывать воды из главного русла на юге – Старо-Стамбульского. Если же в последнем начнет понижать водность, то вероятнее всего речная вода будет выливаться в море по устью ***б***, с последующим русловым удлинением под влиянием сокращения скоростей стокового течения, роста крупности наносов и значительного понижения наносодвижущей способности руслового потока.

Если отложения речных наносов в Старо-Стамбульском гирле будут наращиваться, как и в Очаковском на севере дельты, то активизируются соседние новые малые рукава. В частности, это могут быть Лебединка, Мусуна, Купеческое, Курильское и др. В итоге складывается слабое течение вдоль портовых молов, которое выйдет в море в проливе ***в***, как показано на (рис. 3, б). Наиболее вероятно, что часть воды устойчиво двинется от устья ***б*** на юг вдоль тыльной стороны Новой Земли при усилении северных ветров в ближайшее десятилетие [2, 8, 16,]. В итоге можно ожидать общее ослабление Старо-Стамбульского русла, снижение его доли в стоке воды Килийской дельты в целом.

Пока мы не видим признаков существенного нарастания подводной аккумулятивной террасы с внешней стороны Новой Земли. Свал глубин остается весьма крутым. Именно поэтому ряд авторов [4, 10, 14] обращают пристальное внимание на смещение бара на запад по поверхности уже существующей очень узкой террасы. Получается, что Мусура продолжает закрываться, но при этом заметно активизируется течение ***в***. Летом 2020 г. ширина этого пролива составляла примерно 1 км, а в будущем вероятно сохранится тенденция уменьшения его ширины и роста скорости течения, при прочих равных условиях. Изложенные изменения, вполне вероятно, могут повлиять на распределение глубин на дне всей акватории I–III (рис. 3, б). В подобных условиях пологие положительные формы донного рельефа в виде отдельных гряд и промоин в состоянии оконтурить три песчано-илистые депрессии, как, например, будущие озера: Цыганка (I), Мусура (II), Сулина (III), обнаруженные с вертолета во время штиля с высоты 250 м (рис. 3, б – I, II и III).

Пока еще трудно точно определить время, когда вся акватория бухты и прилегающего дельтового мелководья превратится в отдельные озера, а нарастание мелководной аккумулятивной террасы продолжится. Сегодня можно утверждать, что в первую очередь появятся, по крайней мере, три таких озера: I, II и III с основными руслами ***а***, ***б***, ***в*** и ***г***, с двумя основными рукавами: ***в*** и ***в–г***. При этом произойдет хоть и относительно небольшое, но все же выдвижение в море внешней береговой линии за счет отложения алевритовых и более мелких наносов (рис. 5). Для этого на внешнем крае Килийской дельты находится достаточное количество наносов необходимой крупности. Кроме того, это процессы приводят к появлению новой суши (острова, бары типа о-ва Новая Земля и протоки, например, Южная) как дальнейшее развитие динамики морского края данной части дельты.

ВЫВОДЫ

Изложенный материал исследований и его анализ позволили сделать следующие основные выводы.

1) Северная часть Килийской дельты Дуная развивается в условиях мощной аккумуляции речных наносов вдоль ее морского края. В результате формируется широкая подводная аккумулятивная терраса. Она регулирует появление и развитие первичных форм волнового рельефа как опорный “скелет” нарастания площади дельты. Эти формы представляют в основном мелкие островные бары и подводные гряды. Сливаясь воедино, со временем они в итоге наращивают площадь дельты и ее плавней.

2) Последние несколько десятилетий средняя часть морского края Килийской дельты Дуная оказалась в сфере наиболее активного влияния гирла Быстрое. На его конечном створе концентрация влекомых наносов составляет от 5 до 14%. При высокой водности рукава и ярко выраженном отклонении стокового течения на юг под влиянием вдольберегового потока ветро-волновой энергии $T_{рез}$, в том же направлении проявляется эффект “гидравлической буны”. Высокая скорость стокового течения гасит поток волновой энергии E и в ее тени образуется очаг аккумуляции наносов (о-в Птичий), как у реальной буны в натуре. В очаге накопились наиболее крупные наносы в первую очередь. Масса взвешенных сбрасывается далеко в море, по причине очень узкой окаймляющей подводной террасы.

3) Южная часть Килийской дельты Дуная является наиболее динамичной. Ее изменения диктуются влиянием количества, направления движения, крупностью дельтовых наносов, изменчивостью ветрового и волнового режима, а также необычайно большой длины искусственного препятствия для дунайских наносов. Препятствие качественно изменило процесс развития данной дельты. Но эти изменения не улучшат условия судоходства по Сулинскому гирлу, а также могут создать проблемы для демаркации границы с Румынией. Остался остроактуальным вопрос о сохра-

нении благоприятных условий судоходства по Сулинскому гирлу.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено по Госзаданию Института географии РАН № 0148-2019-0007. Благодарим доцентов А.А. Стояна и А.Б. Муркалова, аспиранта В.Н. Неведюка из Одесского национального университета за техническую помощь в выполнении полевых работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шуйський Ю.Д., Жмуд М.Е.* До питання про вплив портових споруд Суліни на динаміку дельти Дунаю // Науковий Вісник Чернівецького університету. Географія. 2015. Вип. 685. С. 67–75.
2. *Gashtescu P.R.* Danube delta – Biosphere Reserve: present-day conditions and ecological recorvery // Geojournal. 1993. Vol. 29. No. 1. P. 57–67.
3. *Romanescu G.* Morphology and dynamics of the Danube delta littoral between the Sulina an d Sfântu Gheorghe river mouths (Romania) // Pontica. 2010. Vol. 43. P. 517–531.
4. *Шуйский Ю.Д.* Гидролого-морфологические черты формирования современной Килийской дельты Дуная // Вісник Одеського національного університету. Серія Екологія. 2003. Т. 8. Вип. 11. С. 4–17.
5. *Шуйский Ю.Д.* Современные морфодинамические механизмы нарастания морского края дельты Дуная // Екологія довкілля та безпека життєдіяльності (Киев). 2006. № 1. С. 17–28.
6. *Шуйский Ю.Д., Выхованец Г.В., Гыжко Л.В., Орган Л.В.* О формировании наносов на древних и современных косах Килийской (позднеголоценовой) дельты Дуная // Физическая география и геоморфология (Киев). 2020. Вып. 3–4 (101–102). С. 52–60.
7. Гидрология дельты Дуная / Михайлов В.Н., Морозов В.Н. М: ГЕОС, 2004. 450 с.
8. *Михайлова М.В., Кравцова В.И., Морозов В.Н.* Многолетние изменения морского края дельты Дуная // Водные ресурсы. 2019. Т. 46. № 5. С. 474–484.
9. Динамика техногенного воздействия на природные комплексы устьевой области Дуная / Берлинский Н.А. Одесса: Астропринт, 2012. 252 с.
10. *Шуйский Ю.Д.* Динамика морского края Килийской дельты Дуная // Труды Госуд. Океаногр. института. 1984. Вып. 172. С. 50–60.
11. *Vispermeanu E.E.* The geomorphologic evolution of Sulina mouth (North-Western Black Sea, Danube delta) in the last 200 years // Analele Univ. Bucureşti: Geografia. 1986. No. 35. P. 84–89.
12. *Черой А.И.* Сток воды, наносов и морфологические процессы в устьевой области реки Дуная. Автореферат дисс. канд. геогр наук. Одесса: ОДЭКУ, 2009. 18 с.
13. Гидрометеорологические условия морей Украины. Т. 2. Черное море / Ильин Ю.П., Репетин Л.Н., Белокопытов В.Н., Горячкин Ю.Н., Дьяков Н.Н., Кубряков А.А., Станичный С.В. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. 422 с.
14. Hydrology of the River Danube / Stančik A. Bratislava: Priroda Publ. Co., 1988. 272 p.
15. *Шуйский Ю.Д., Орган Л.В.* Основные закономерности развития вдольберегового потока наносов в береговой зоне Черного моря // Austrian Science (Innsbruk). 2017. № 6. С. 4–8.
16. *Выхованец Г.В., Орган Л.В.* Основные закономерности изменения морского края Килийской дельты Дуная // Материалы Международной научной конференции “Современные направления развития физической географии: научные и образовательные аспекты в целях устойчивого развития” / Под ред. М.М. Ермолович. Минск: Изд-во БГУ, С. 55–59.
17. *Выхованец Г.В., Лихоша Л.В., Кадурин С.В.* Основные закономерности распределения наносов на устьевом взморье Килийской дельты Дуная // Людина і довкілля: проблеми неоекології. 2005. Вип. 7. С. 15–26.

Modern dynamics of the sea edge of the Kilian Danube delta: basic patterns and forecast

Yu. D. Shuisky[a,#], G. V. Vykhovanetz[a,#], A. L. Chepalyga[b,##], L. V. Organ[a,#], and D. O. Adajeva[b,###]

[a] *National Mechnikov's University of Odessa, Ukraine*
[b] *Institute of Geography RAS, Moscow, Russia*
[#] *E-mail: physgeo_onu@ukr.net*
[##] *E-mail: tchepalyga@mail.ru*
[###] *E-mail: do.adaeva@igras.ru*

The Kiliya delta is the youngest (up to 250–350 years old) part of the Danube delta. It belongs to the extension delta type and is protruding into the non-tidal sea. Based on long-ternm field investigation, analysis of Sattelite images, measurement of hydrological parameters in its channels (depth, flow rates, river water flow rates, bottom sediment composition) collected over decades since 1962 it is established that the Kiliya delta

is highly dynamic, and is currently at the stage of the intensive development. According to delta channels morphology, sediment accumulation, and distribution of wave energy along the delta shoreline, three sections of delta were distinguished. The northern section, that is connected with the Ochakovsky and Potapovsky branches, located in the vicinity of Novo-Dunaisk port and therefore experiencing anthropogenic impact. The development of submerged accumulative terrace and the appearance of emerged land were documented in this section of delta. The central section is forming under the influence of significant increase in alongshore sediment runoff from the northern sector, changes in discharge in the Starostambul and Novostambul channels, as well as the most recent cuts of the Tsyganka and Musur channels. The southern section of the Kiliya delta is most dynamic. Redistribution of water runoff and bottom sediments, restructuring of the relief; formation of new channels (Yuzhny), current development of lakes (Tsyganka, Musura, Sulinsk), as well as new delta islands, Novaya Zemlya are recorded in the southern delta section. An attempt to forecast further development of the southern delta section has been made for the next 20–30 years. Future changes may affect not only the natural delta environment, but also economic facilities (the ports of Yuzhno-Dunaisk and Sulina, a navigable canal at the entrance to the Bystry branch), and create problems of delimitation of the state border with Romania.

Keywords: Black Sea, Danube, channel, sediments, relief, port breakwaters, channel dynamics, siltation

ACKNOWLEDGMENTS

The scientific investigation was carried out according to state tasks of Geography institute RAS No. 048-2019-0007. Gentle thank for Ass. Prof. A.A. Stoyan, Ass. Prof. A.B. Murkalov and post graduate student V.N. Neveduk which helped us during field expedition research.

REFERENCES

1. Shuiskii Yu.D. and Zhmud M.E. *Do pitannya pro vpliv portovikh sporud Sulini na dinamiku del'ti Dunayu* (On the question of the influence of Sulina port facilities on the dynamics of the Danube Delta). *Naukovii Visnik Chernivets'kogo universitetu. Geografiya* (Scientific Bulletin of Chernivtsi University. Geography). 2015. Issue 685. P. 67–75. (in Ukr.)
2. Gashtescu P.R. Danube delta – Biosphere Reserve: present-day conditions and ecological recorvery. *Geojournal*. 1993. Vol. 29. No. 1. P. 57–67.
3. Romanescu G. Morphology and dynamics of the Danube delta littoral between the Sulina and Sfântu Gheorghe river mouths (Romania). *Pontica*. 2010. Vol. 43. P. 517–531.
4. Shuiskii Yu.D. *Gidrologo-morfologicheskie cherty formirovaniya sovremennoi Kiliiskoi del'ty Dunaya* (Hydrological and morphological features of the formation of the modern Kiliya Danube Delta). *Visnik Odes'kogo natsional'nogo universitetu. Seriya Ekologiya* (Bulletin of the Odessa National University. Ecology series). 2003. Vol. 8. Issue 11. P. 4–1. (in Russ.)
5. Shuiskii Yu.D. *Sovremennye morfodinamicheskie mekhanizmy narastaniya morskogo kraya del'ty Dunaya* (Modern morphodynamic mechanisms of growth of the sea edge of the Danube Delta). *Ekologiya dovkillya ta bezpeka zhittєdiyal'nosti (Kiev)* Environmental Ecology and Life Safety (Kiev). 2006. No. 1. P. 17–28. (in Russ.)
6. Shuiskii Yu.D., Vykhovanets G.V., Gyzhko L.V., and Organ L.V. *O formirovanii nanosov na drevnikh i sovremennykh kosakh Kiliiskoi (pozdnegolotsenovoi) del'ty Dunaya* (About sediment composition within relict and modern spits of Kiliya delta (neoholocenic age) of Danube). *Fizicheskaya geografiya i geomorfologiya (Kiev)* (Journal of Physical Geography and Geomorphology (Kiev)). 2020. Issue 3–4 (101–102). P. 52–60. (in Ukr.)
7. *Gidrologiya del'ty Dunaya* (Hydrology of the Danube Delta). V.N. Mikhailov, V.N. Morozov (Eds.). Moscow: GEOS (Publ.), 2004. 450 p. (in Russ.)
8. Mikhailova M.V., Kravtsova V.I., and Morozov V.N. *Mnogoletnie izmeneniya morskogo kraya del'ty Dunaya* (Long-term changes in the sea edge of the Danube delta). *Fizicheskaya geografiya i geomorfologiya (Kiev) (Water resources)*. 2019.Vol. 46. No. 5. P. 474–484. (in Russ.)
9. *Dinamika tekhnogennogo vozdeistviya na prirodnye kompleksy ust'evoi oblasti Dunaya* (Dynamics of technogenic impact on natural complexes of the Danube deltaic area). N.A. Berlinskii (Ed.). Odessa: Astroprint (Publ.), 2012. 252 p. (in Russ.)
10. Shuiskii Yu.D. *Dinamika morskogo kraya Kiliiskoi del'ty Dunaya* (Dynamics of the maritime region of the Kiliya delta of the Danube). *Trudy Gosud. Okeanogr. instituta (Proceedings of the State. Oceanogr. Institute)*. 1984. Issue. 172. P. 50–60. (in Russ.)
11. Vispermeanu E.E. The geomorphologic evolution of Sulina mouth (North-Western Black Sea, Danube delta) in the last 200 years. Analele Univ. Bucureşti: Geografia (Publ.), 1986. No. 35. P. 84–89.
12. Cheroi A.I. *Stok vody, nanosov i morfologicheskie protsessy v ust'evoi oblasti reki Dunaya* (Runoff of water, sediment and morphological processes in the mouth area of the Danube River). PhD thesis. Odessa: ODEKU (Publ.), 2009. 18 p. (in Ukr.)
13. *Gidrometeorologicheskie usloviya morei Ukrainy. T. 2. Chernoe more* (Hydrometeorological conditions of the seas of Ukraine. Vol. 2. Black Sea.). Yu.P. Il'in, L.N. Repetin, V.N. Belokopytov, Yu.N. Goryachkin, N.N. D'yakov, A.A. Kubryakov, S.V. Stanichnyi (Eds.). Sevastopol: ECOSI-Hydrophysics (Publ.), 2012. 422 p. (in Russ.)

14. Stančik A. Hydrology of the River Danube. Bratislava: Priroda Publ. Co. (Publ.), 1988. 272 p.

15. Shuiskii Yu.D. and Organ L.V. *Osnovnye zakonomernosti razvitiya vdol'beregovogo potoka nanosov v beregovoi zone Chernogo morya* (The main regularities of the development of alongshore sediment flow in the coastal zone of the Black Sea). *Austrian Science (Innsbruk)*. 2017. No. 6. P. 4–8. (in Russ.)

16. Vykhovanets G.V. and Organ L.V. *Osnovnye zakonomernosti izmeneniya morskogo kraya Kiliiskoi del'ty Dunaya* (Basic peculiarities of sea margin changes in Kiliya part of the Danube delta). *Materialy Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii "Sovremennye napravleniya razvitiya fizicheskoi geografii: nauchnye i obrazovatel'nye aspekty v tselyakh ustoichivogo razvitiya"* (Proceedings of Intern. Sci. Confer. "Modern directions of a physical geography evolution"). By edition M.M. Ermolovich. Minsk: BSU Publ. Co (Publ.), 2019. P. 55–59. (in Russ.)

17. Vykhovanets G.V., Likhosha L.V., and Kadurin S.V. *Osnovnye zakonomernosti raspredeleniya nanosov na ust'evom vzmor'e Kiliiskoi del'ty Dunaya* (The main regularities of sediment distribution at the estuary seaside of the Kiliya delta of the Danube). *Lyudina and Dovkilla: problems of neo-ecology (Khar'kov)*. 2005. Issue 7. P. 15–26. (in Russ.)