

**В.В. Янко<sup>1</sup>, Т.О. Кондарюк<sup>1</sup>, О.Г. Лиходедова<sup>1</sup>, И. Мотненко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Одесский национальный университет имени И.И. Мечникова

<sup>2</sup> Институт прикладных наук "Авалон", Виннипег, Канада

## **ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РЕЧНОГО СТОКА НА МОРСКИЕ ДОННЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ ПО БЕНТОСНЫМ ФОРАМИНИФЕРАМ И ЛИТОЛОГИИ ДОННЫХ ОСАДКОВ**

---

*В рамках международного проекта BS-ERA.NET 076 «Water pollution prevention options for coastal zones and tourist areas: Application to the Danube Delta front area», WAPCOAST (2010—2012 гг.) впервые в Европе представлены результаты исследований по использованию бентосных фораминифер и литологии донных осадков для оценки влияния пресного стока Дуная на донные экосистемы румынского шельфа Черного моря. Установлено 15 видов фораминифер. Их количественные показатели и перестройка структуры комплексов, скоррелированные с серией гидрологических и геохимических параметров придонной толщи воды и донных осадков, включая их гранулометрический состав, позволяют установить три главных фактора, влияющих на состояние донных экосистем. К ним относятся: (1) расстояние от берега и сопутствующие ему параметры (глубина, соленость, прозрачность, температура); (2) эвтрофикация придонной толщи воды и (3) ее загрязнение органикой, принесенной с континента. Бентосные фораминиферы в совокупности с литологией донных осадков позволяют оценить степень влияния этих факторов на донные экосистемы и проследить распространение пресных вод Дуная у дна бассейна.*

**Ключевые слова:** Черное море, Дунай, соленость, эвтрофикация, загрязнение, экологическая микропалеонтология

### **Введение**

Речной сток оказывает существенное влияние на морскую среду посредством формирования солевого баланса, термохалинной структуры и конвекционной циркуляции водных масс [3]. Будучи обогащенным различными компонентами органического и неорганического происхождения, речной сток активно участвует в биологических процессах и осадкообразовании, оказывая воздействие на равновесное состояние донных экосистем.

Пространственное распределение речного стока в морской среде зависит от метеорологических и гидрологических условий, характеризуется межгодовой изменчивостью и близостью к ис-

© В. В. ЯНКО, Т. О. КОНДАРЮК, О. Г. ЛИХОДЕДОВА., И. В. МОТНЕНКО, 2014

точнику [1]. Особенно сильное воздействие на морское дно оказывают крупные реки. К таким районам относится северо-западный шельф Черного моря, куда впадает вторая крупнейшая река Европы — Дунай. Водный и твердый сток Дуная составляет 190,7 км<sup>3</sup>/год и 51,7 млн т/год соответственно [12, 33].

Прослеживание распространения речных вод в море и оценка их влияния на донные экосистемы имеет важное теоретическое и практическое значение как для понимания причин, нарушающих их равновесие, так и для разработки методов и подходов к поддержанию их стабильности. Поэтому выбор надежной группы организмов в качестве индикаторов представляет первостепенное значение. Такие организмы должны быть бентосными, иметь широкое распространение, прочную раковину (скелет), быть многочисленными и небольшими по размерам (для статистической достоверности популяционного анализа) и иметь короткий жизненный цикл.

Этим требованиям отвечают бентосные фораминиферы. Они играют важную роль в глобальном биогеохимическом цикле органического и неорганического вещества, что делает их одной из наиболее важных групп организмов на Земле [10]. Они чрезвычайно обильны в морских осадках, имеют мелкий размер (> 1 мм), огромное таксономическое разнообразие, короткий жизненный цикл (от 6 месяцев до года) [11], ускоренный рост [39], специфическую реакцию на загрязнение [2, 42, 43, 44], хорошо развитые защитные механизмы [14, 15, 16] и, будучи типично морскими организмами, крайне чувствительны к изменению солености [38]. К тому же, обладая твердой раковиной, они прекрасно сохраняются в ископаемом состоянии, а морфофункциональные особенности раковины (деформации, размер пролокула) и ее геохимический состав, наряду с количественными показателями и структурой сообществ, зарекомендовали себя как надежные индикаторы состояния морских экосистем во времени и пространстве [43].

Использование бентосных фораминифер для мониторинга состояния донных экосистем началось в 70-х годах XX столетия и на сегодняшний день является одним из приоритетных направлений экологической микропалеонтологии [43]. Большинство исследований по влиянию речного стока на бентосные фораминиферы проведено в бассейнах с нормальной океанической соленостью [22, 23, 29, 32]. В таких бассейнах вопросы, связанные с выбором видов-индикаторов речного стока, представляются более простыми, чем во внутриконтинентальных бассейнах типа Черного моря со средней соленостью у дна 18 psu и сероводородным заражением ниже изобаты 200 м. Это связано с тем, что в бассейнах с нормальной океанической соленостью морская биота таксономически гораздо более разнообразна, а дифференциация организмов, приспособленных (толерантных) и не приспособленных (устойчивых или прогрессивных) к изменению солености, более четкая.

В Черном море основная масса организмов по своей природе хорошо приспособлена к колебаниям солевого и кислородного режима, что затрудняет выбор видов-индикаторов. К тому же, сама по себе проблема воздействия пресных вод на донные экосистемы в условиях Черного моря — многоплановая. С одной стороны, речные воды понижают соленость и без того опресненного морского бассейна. С другой стороны, они приносят огромное количество органического вещества, способствующего росту и метаболизму микроорганизмов, утилизации ими кислорода и эвтрофикации морской воды. Вдобавок речные воды обогащены

антропогенными загрязнителями, как в растворенном, так и в твердом состоянии, и активно участвует в загрязнении донных осадков, которые фораминиферы используют в качестве субстрата. Это угнетает и без того хрупкие донные экосистемы Черного моря, приводя зачастую к непоправимым последствиям.

Протокол использования фораминифер для мониторинга морской среды включает определение следующих характеристик: (1) видовое разнообразие фораминифер, представленное либо простым количеством видов, либо соотношением между количеством видов и их численностью в каждой конкретной пробе, выраженным коэффициентами разнообразия (в нашей работе Shannon-Wiener index  $H'$ ); (2) численность представителей каждого вида и их сумма; (3) частота встречаемости (процентное содержание каждого вида в пробе), отражающая структуру комплекса; (4) морфология, размеры раковины и ее начальной камеры (пролокулума); (5) ультраструктура стенки; (5) химический состав раковины; и (8) реакция цитоплазмы на изменения среды [14, 15, 16, 42, 43]. Эти характеристики зависят от солености [36, 41, 46], растворенного в воде кислорода [9], органического углерода в осадках [21]; рН [37], бактериальной реминерализации органического вещества, определяемого с помощью  $\delta^{15}N$  [27]; окислительно-восстановительного или редокс потенциала  $E_h$  [18], содержания питательных веществ (хлорофилл- $a$ ,  $PO_4$ ,  $NO_3$ ) [25] и других факторов. Знание ответной реакции фораминифер на параметры среды позволяет решать обратную задачу, в том числе и геологическую, — определения состояния донных экосистем во времени и пространстве.

**Цель исследований** — оценка современного влияния речного стока на донные экосистемы Черного моря.

**Объект исследований** — бентосные фораминиферы как индикаторы влияния речного стока на донные экосистемы.

**Предмет исследований** — поиск взаимосвязи между распределением бентосных фораминифер и абиотическими параметрами морской среды (вода + осадки) и решение по ним обратной задачи определения пространственного распределения речного стока и его влияния на донные экосистемы Черного моря.

Бентосные фораминиферы как биологические индикаторы донных экосистем морей имеют ряд преимуществ по сравнению с другими организмами. Они крайне чувствительны к изменениям среды и обладают уникальной способностью ретроспективного анализа ее динамики во времени и пространстве [5, 6, 7, 8, 14, 15, 45, 46, 41], что и определяет актуальность и важность предлагаемой работы.

## **Район исследований**

Район исследований охватывает южную (румынскую) часть северо-западного шельфа Черного моря, расположенную между дельтой Дуная и мысом Калиакра (Рис. 1). На долю румынской части приходится 83,0 % дельты (3446 км<sup>2</sup>) [34].

Район исследований включает взморье (глубина >5 м), подводную часть дельты (5—25 м), авандельту, расположенную на внутреннем и частично внешнем шельфе (25—50 м), и часть внешнего шельфа (50—81 м) Черного моря.

Взморье дельты Дуная представляет собой прибрежную опресненную полосу шириной 8—10 км, в которой происходит смешение морских и речных вод. В

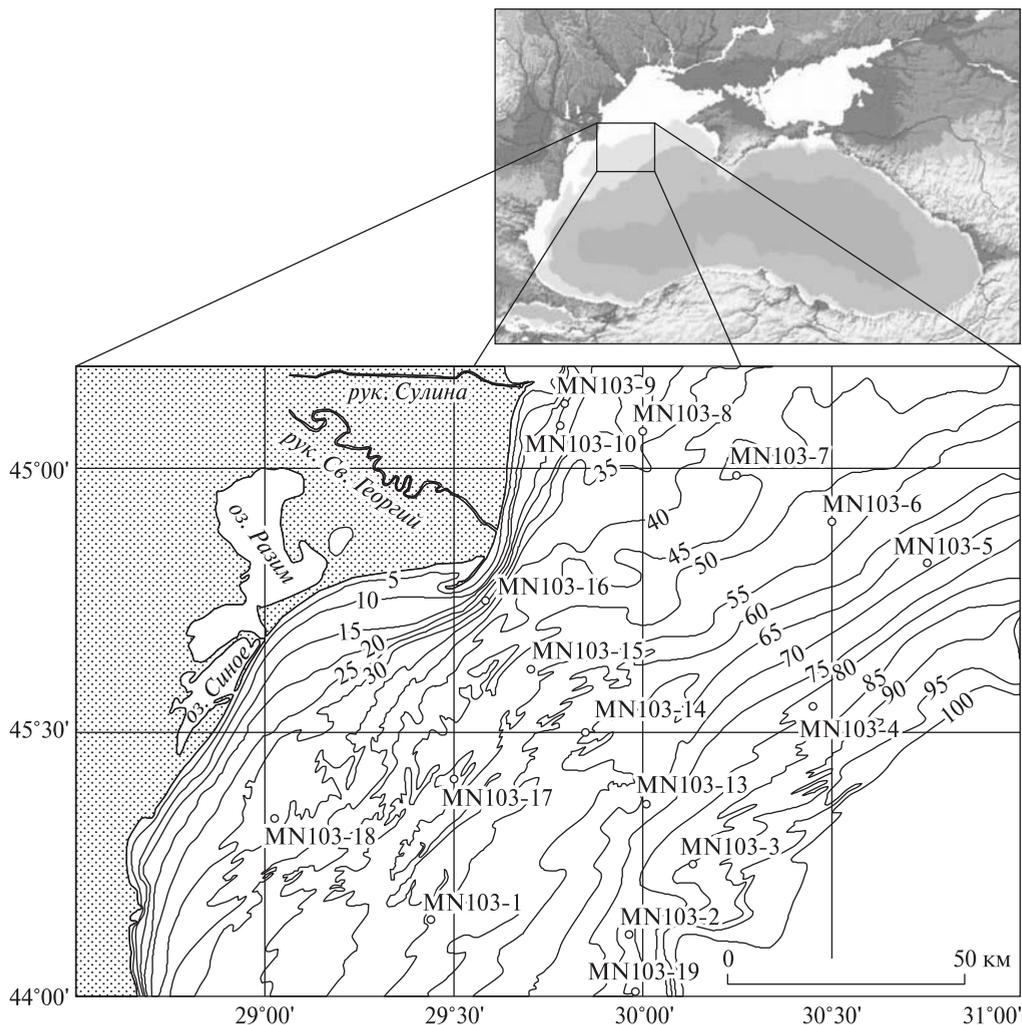


Рис. 1. Район исследований и расположение станций опробования

зависимости от величины твердого стока Дуная, ширина взморья варьирует, то приближаясь к берегу, то удаляясь от него. На распределение осадков влияют вдольбереговые течения, благодаря которым попадающий на взморье осадочный материал перераспределяется в прибрежной части, приводя к формированию серии барров и кос в волноприбойной зоне.

Подводная часть дельты имеет относительно крутой уклон морского дна. Рельеф формируется, в основном, за счет выноса и осаднения твердого стока. Несмотря на то, что ежегодно Дунай сбрасывает в Черное море 25–35 млн т твердых осадков, его основная масса уносится на юг течениями, подвергаясь размыву южнее устья Сулинского рукава. Поэтому скорости осадконакопления здесь не превышают 5–10 см за 1000 лет [34].

В авандельте происходит осаднение осадочного материала. Из-за слабого воздействия волновых процессов и активной аккумуляции осадочного материала авандельта нарастает достаточно быстро. На границе взаимодействия речных и

морских вод формируется зона геохимического барьера с интенсивным развитием процессов абиогенной флокуляции, приводящей к образованию обширных полей пелитов.

## Материал и методы

Семнадцать станций опробовано с борта румынского НИС «Mare Nigrum» в период с 3 по 7 мая 2012 года в рамках проекта BLACK SEA ERA.NET-WAPCOAST «Water pollution prevention options for coastal zones and tourist areas: Application to Danube Delta front area» (Рис. 1, табл. 1).

Отбор донных осадков произведен дночерпателем (0,1 м<sup>2</sup> van Veen) и мультикорером (Mark II-400 с четырьмя трубками, каждая 60 см длиной и 10 см в диаметре), позволившими вскрыть осадки на глубину до 40 см. В настоящей работе приводятся результаты фораминиферовых исследований проб, отобранных дночерпателем. Гранулометрический состав донных осадков изучен в пробах, отобранных мультикорером.

Измеренные с помощью гидрологического зонда Neil Brown Instruments Systems (CTD), оснащенного 11 батометрами и электронными датчиками, гидрологические параметры придонной воды включают глубину (D=depth), растворенный кислород (DO=Dissolved Oxygen), степень насыщения кислородом (SI=Saturation Index of oxygen), соленость (Salinity=S), электропроводность (Conductivity=U), прозрачность (Tr=Transparency), температуру (T °C), водородный показатель (pH), окислительно-восстановительный потенциал (Eh), впоследствии нормализованный к стандартному pH=7 и обозначенный в табл. 3 как

Таблица 1. Координаты и глубина опробованных станций

№ станции	Latitude, N	Longitude, E	Глубина, м
MN103-1*	44° 08' 43,3680"	29° 26' 21,5280"	58,0
MN103-2*	44° 06' 58,2660"	29° 58' 00,3120"	67,0
MN103-3*	44° 15' 07,9020"	30° 07' 52,3260"	80,5
MN103-4*	44° 33' 00,3780"	30° 27' 01,1040"	78,0
MN103-5*	44° 49' 13,2660"	30° 45' 04,5720"	65
MN103-6*	44° 54' 00,0780"	30° 30' 00,4500"	54,7
MN103-7*	44° 59' 06,0600"	30° 15' 02,1120"	46,0
MN103-8*	45° 04' 13,1400"	29° 59' 58,2060"	33,6
MN103-9*	45° 07' 22,4460"	29° 47' 33,7920"	17,5
MN103-10*	45° 04' 54,1860"	29° 46' 49,4580"	20,7
MN103-11***			
MN103-12***			
MN103-13*	44° 21' 52,8960"	30° 00' 36,0900"	68,9
MN103-14*	44° 29' 57,7200"	29° 50' 55,5720"	61,5
MN103-15*	44° 37' 10,5120"	29° 42' 11,2920"	50,4
MN103-16*	44° 44' 57,7920"	29° 34' 56,4120"	24,6
MN103-17*	44° 24' 52,5900"	29° 30' 03,6060"	53,0
MN103-18*	44° 20' 08,3160"	29° 01' 36,0300"	34,5
MN103-19**	44° 00' 34,4820"	29° 58' 50,9220"	73,8

\* Станции, опробованные дночерпателем и мультикорером, \*\* только дночерпателем, \*\*\* станции, запланированные для исследования, но не опробованные по ряду причин

$E_h'$ . Прозрачность измерена при помощи диска Секки. Содержание фосфатов ( $PO_4$ ) и кремнезема ( $SiO_2$ ) определено при помощи Molybdovanadate Method with Acid Persulfate Digestion (HASH equipment) на борту судна. Содержание  $CaCO_3$  определено методом титрования. Содержания углерода (C), органического углерода ( $C_{org}$ ) и азота (N) в донных осадках определены методом газовой хроматографии на приборе Carlo Erba NA 1500. Точность метода измерений составляет 0,01 %, 0,02 % и 0,002 % для C,  $C_{org}$  и N, соответственно. Соотношение стабильных изотопов азота  $^{15}N/^{14}N$ , выраженное как  $\delta^{15}N$ , определено при помощи газового изотопного масс-спектрометра Finnigan MAT 252 после обработки проб при температуре 1100 °C в газовом хроматографе. Полученные значения откалиброваны по стандартным эталонам IAEA-N-1 и IAEA-N-2 Международного атомного агентства. Точность измерения 0,1 ‰. Химический анализ проведен для верхнего слоя осадков (0—1 см), отобранных мультикорером, в Институте биогеохимии и морской химии Гамбургского университета в Германии.

Гранулометрический (ситовой и отмучивание) и фораминиферовый анализы проб из поверхностного (0—2 см) слоя осадков проведены по методике [4, 5, 7, 42] в микропалеонтологической лаборатории Одесского национального университета имени И.И. Мечникова. По результатам гранулометрического анализа подсчитано процентное содержание каждой фракции в пробе, рассчитаны Md и So и построены карты пространственного распределения фракций.

Для фораминиферового анализа пробы отобраны из верхнего ненарушенного слоя осадков посредством кольца диаметром 10 см и высотой 2 см, зафиксированы формалином, разбавленным морской водой в пропорции 3:1, с добавкой красителя Бенгальская Роза для окрашивания живых форм, выдержаны в течение 48 часов и промыты на судне через сита 0,063 мм и 0,25 мм. Изучение фораминиферов проведено в сухом осадке. Живые (окрашенные) и мертвые фораминиферы подсчитаны вместе, поскольку, во-первых, живых фораминифер чрезвычайно мало, а во-вторых, общее число раковин лучше характеризует сезонную динамику популяций [20]. Под бинокулярным микроскопом вручную отобрано 300 раковин фораминифер (для популяционной статистики), среди которых подсчитана частота встречаемости каждого вида/подвида. Общая численность фораминифер пересчитана на 50 г сухого осадка.

Все обнаруженные виды/подвиды изучены и сфотографированы в электронном сканирующем микроскопе в университете Манитобы (Виннипег, Канада). Особое внимание уделено деформированным раковинам как возможным показателям стрессовых условий [42, 43], создаваемых речным стоком. Коллекция фораминифер хранится в Палеонтологическом музее Одесского национального университета имени И.И. Мечникова (Одесса, Украина).

Фораминиферы разделены по солености: на олигогалинные (1—5 psu), стриктоэвригалинные (11—26 psu), полигалинные (18—26 psu) и голэвригалинные (1—26 psu); по глубине: мелководные (0—30 м), относительно глубоководные (31—70 м) и глубоководные (71—220 м) [5, 7, 41, 45]. Необходимо отметить, что, в отличие от нормальных океанических бассейнов, в Черном море нет глубоководных отрядов (например, *Cassidulina* и др.), что обусловлено историческими причинами. Подавляющая часть видов (87 %) — это средиземноморские иммигранты, попавшие в Черное море в ходе серии четвертичных трансгрессий через проливы Дарданеллы (максимальная глубина 106 м) и Босфор (96 м), мел-

ководность которых препятствовала и препятствует прохождению через них глубоководных форм [5, 7]. Поэтому понятие глубоководности довольно условное, поскольку все бентосные фораминиферы представлены только шельфовыми формами, обитающими на инфра (5—35 м)-, цирку (35—100 м)- и батилиторали (100—220 м). Глубже изобаты 220 м аэробная жизнь в Черном море отсутствует из-за сероводородного заражения.

С целью вычленения главной причины или совокупности причин, определяющих распределение фораминифер в зависимости от абиотических параметров среды, использованы статистические методы (кластерный, корреляционный, факторный анализы и многомерное шкалирование) из пакета Статистика 7. Корреляция рассматривается как значимая, если  $r \leq 0.52$  ( $P < 0.05000$ ) при доверительном интервале 95 %. Только такие коэффициенты учтены при сравнении. Если  $r = 0,5-0,4$  ( $P < 0,0500$ ), такая корреляция рассматривается как трендовая.

## Результаты и обсуждение

Планктонные фораминиферы не обнаружены. Бентосные фораминиферы представлены 15 видами (14 известковых и один агглютинированный) из 3 отрядов, 7 семейств и 14 видов. Отряды *Rotaliida*, *Lagenida*, *Ataxophragmiida* представлены 8, 5 и 1 видами, соответственно. Среди отряда *Rotaliida* доминантными являются виды рода *Ammonia* (*A. tepida*, *A. compacta*, *A. ammoniformis*), среди отряда *Lagenida* — вид *Fissurina lucida*. Остальные виды относятся к числу акцессорных (рис. 2).

Для определения станций, сходных по видовому и количественному составу фораминифер, использована Q-модификация кластерного анализа. Матрица данных состоит из 17 объектов (станций) и 15 переменных (частота встречаемости фораминифер) и стандартизована по объектам (станциям). Для оптимизации минимальной дисперсии внутри кластеров реализован метод Варда. В качестве меры сходства выбран коэффициент корреляции Пирсона. В результате анализа получена дендрограмма, на которой можно выделить 2, 3 или 4 кластера, соответствующих Linkage Distance 3, 1 и 0,6, соответственно (рис. 3, а). Для визуализации полученных данных использован метод многомерного шкалирования (рис. 3, б).

Кластер А включает мелководные станции MN103-9, MN103-10 и MN103-16, расположенные на глубинах 17,5 м — 24,6 м напротив устьев рукавов Сулина (станции MN103-9 и MN103-10) и Св. Георгий (станция MN103-16) (рис. 4).

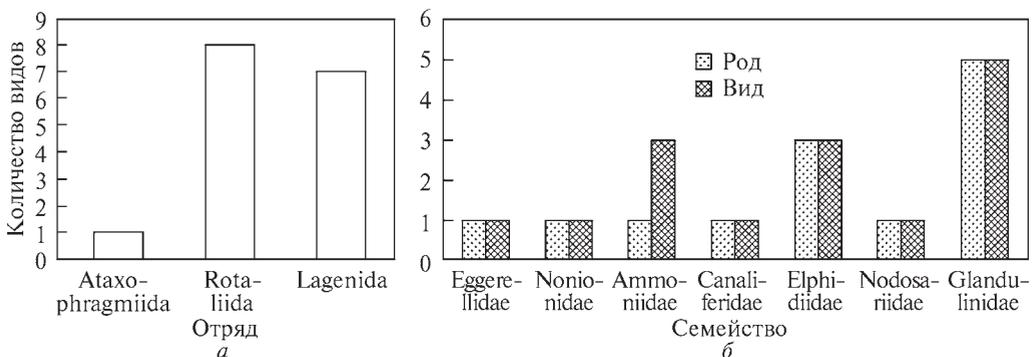


Рис. 2. Распределение видов по отрядам (а), родам и семействам (б)

Эти станции характеризуются наименьшей соленостью (17,8—18,0 psu). Численность фораминифер 11,123—15,616 экз./50 г, средняя 13,798 экз./50 г; количество видов на станции 3—4, среднее 3;  $H'$  от 0,38 до 1,47, средний 0,88; общее количество видов на всех станциях — 6, руководящим видом является *A. tepida*, который доминирует на всех станциях и по имени которого назван комплекс, аксессуарным — *Porosonion subgranosus mediterranicus* (рис. 5).

Кластер Б включает станции MN103-7, MN103-8 и MN103-18, расположенные на глубинах 33,6—46 м и солености 18,2—18,3 psu. Численность фораминифер 5540—10,368 экз./50 г, средняя 8065 экз./50 г; количество видов на станции

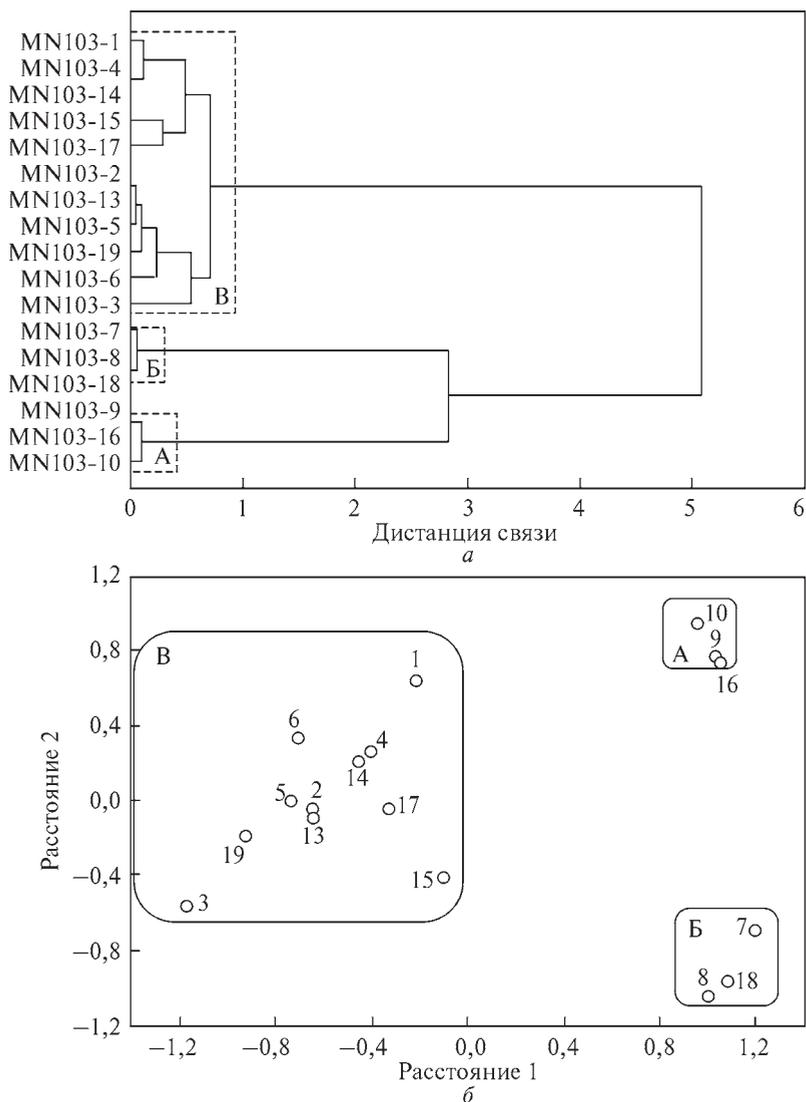


Рис. 3. Группировка станций со схожими фораминиферовыми параметрами, полученная Q-модификацией кластерного анализа (а) и многомерным шкалированием (б). Последний метод позволил разделить станции на группы, «урезать» дендрограмму на Дистанции связи 1 (пунктирная линия на рис. 3, а) и выделить три кластера станций А, Б, В. На рис. 3, б конфигурация расположения станций показана в метрических шкалах, а из нумерации станций удален номер рейса «MN103» для упрощения чтения рисунка

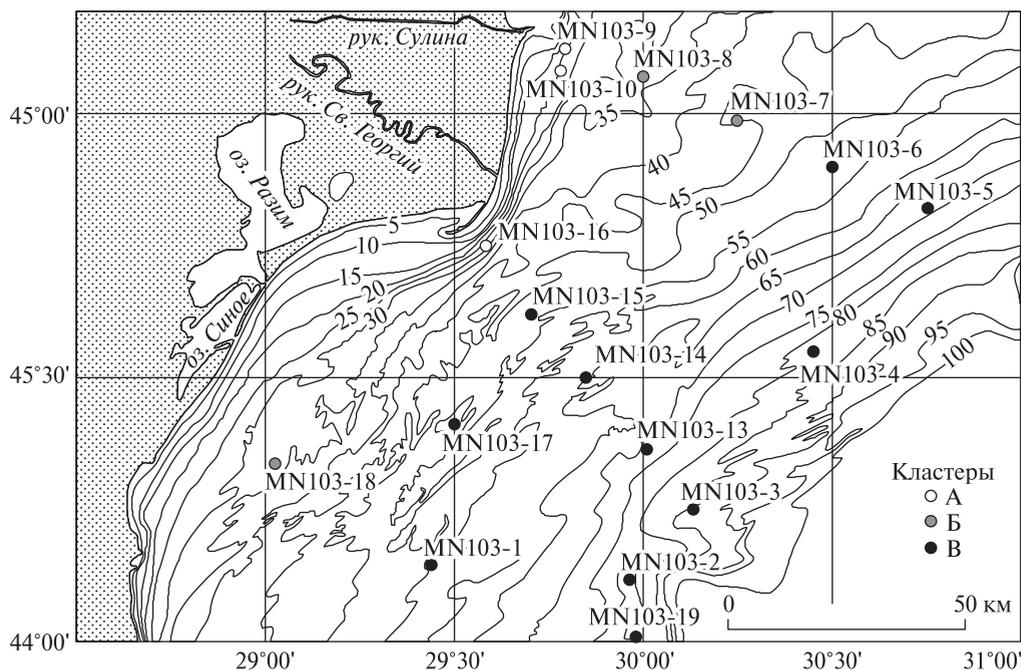


Рис. 4. Пространственное распределение трех кластеров, полученных в результате кластерного анализа (см. рис. 3, а) и многомерного шкалирования (см. рис. 3, б)

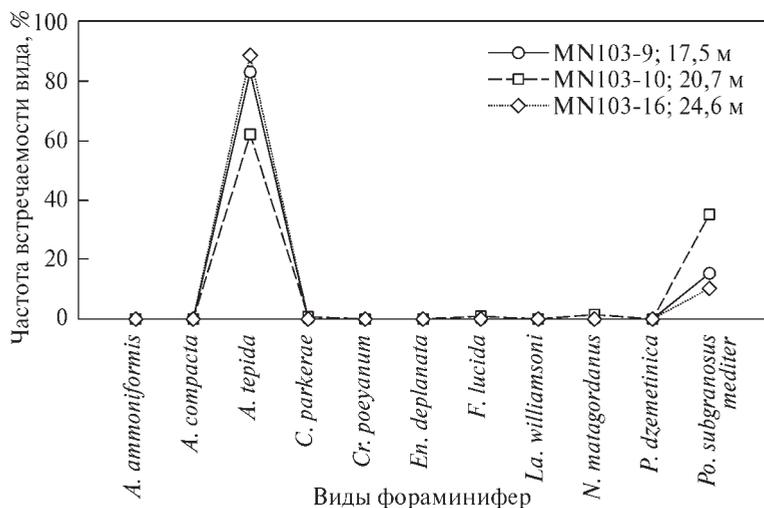


Рис. 5. Структура комплекса фораминифер в кластере станций А, показывающая доминантную роль вида *A. tepida*

3—6, среднее 4;  $H'$  от 0,19 до 1,21, средний 0,6; общее количество видов на всех станциях — 8, руководящим является вид *A. compacta*, который доминирует на всех станциях и по имени которого назван комплекс. Аксессуарную роль играют виды *C. parkerae* и *N. matagordanus* (рис. 6).

Кластер В включает станции MN103-1, MN103-2, MN103-3, MN103-4, MN103-5, MN103-6, MN103-13, MN103-14, MN103-15, MN103-17 и MN103-19, расположенные на глубинах 50,4—80,0 м, солености 18,2—18,9 psu (рис. 9).

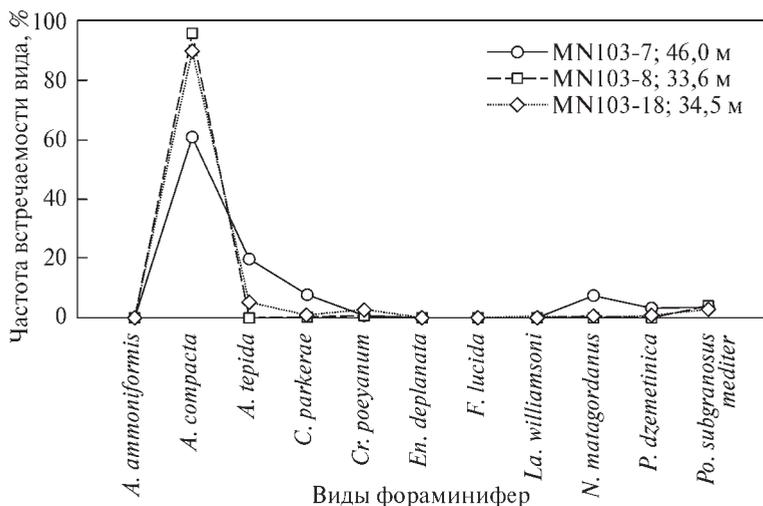


Рис. 6. Структура комплекса фораминифер в кластере станций Б, показывающая доминантную роль вида *A. compacta*

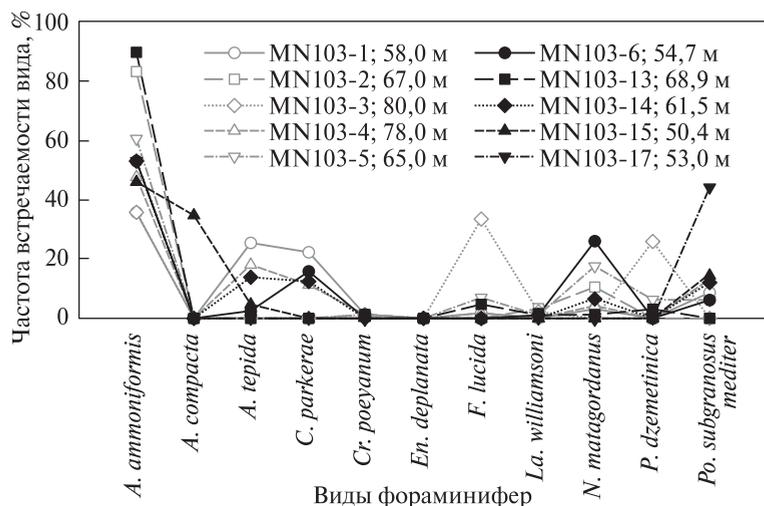
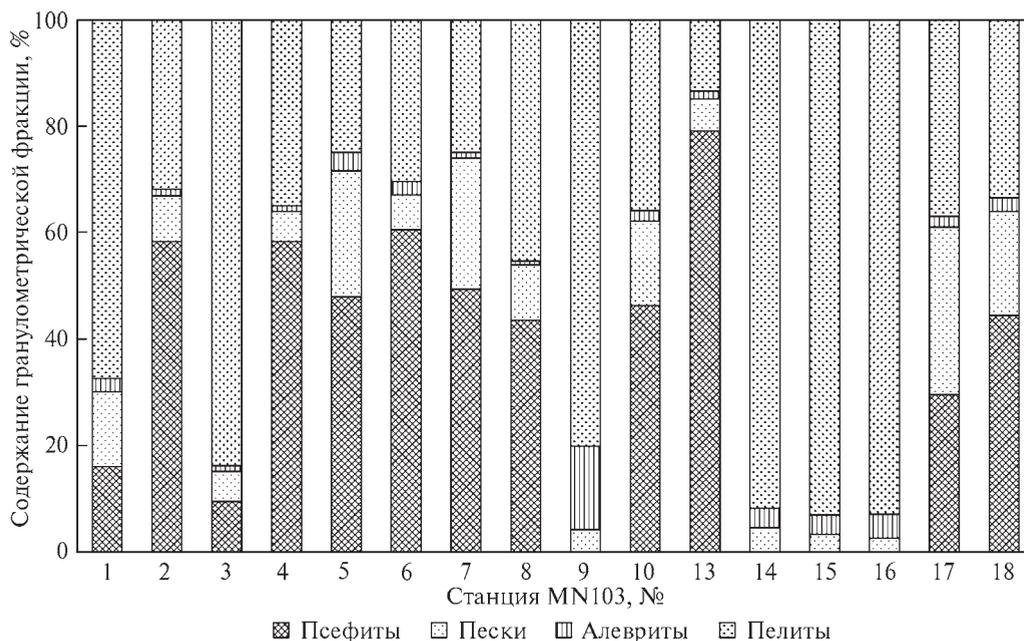


Рис. 7. Структура комплекса фораминифер в кластере станций В, показывающая доминирующую роль вида *A. ammoniformis* и видов отряда *Lagenida*

Численность фораминифер 2519—13,348 экз./50 г, средняя 8605 экз./50 г; количество видов 4—11, среднее 6;  $H'$  от 0,4 до 1,6, средний 1,12; общее количество видов на всех станциях — 14, руководящий — *A. ammoniformis*, доминирующий на всех станциях и по имени которого назван комплекс (рис. 5). Аксессуарными видами являются представители отряда *Lagenida* (*Es. jatzkoi*, *F. lucida*, *La. williamsoni*, *P. dzemetinica*, *E. deplanata*) (рис. 7).

Распределение гранулометрических фракций в поверхностном слое осадков крайне неравномерное (рис. 8).

Псефиты присутствуют на большинстве станций с содержанием до 79 %. Представлены преимущественно раковинами и детритом моллюсков *Mytilus galloprovincialis* (на средних глубинах) и *Modiolus phaseolinus* (на больших глубинах),



**Рис. 8.** Процентное содержание гранулометрических фракций поверхностного слоя (0–2 см) донных осадков

которые формируют ракушечники на востоке и юго-востоке изучаемого района в интервале глубин 40–80 м.

Содержание песчаной фракции не превышает 31 %. Полоса песков в виде языка протягивается от устья рукава Св. Георгий до изобаты 75 м, а также в виде пятна присутствует напротив Сулинского рукава. Под микроскопом пески сложены преимущественно зернами кварца, полевых шпатов, слюды, минералами тяжелой фракции и незначительной примесью биогенного материала (детрит, раковины фораминифер и остракод).

К этим же районам приурочены осадки алевритовой и пелитовой размерности. Алевриты доминируют в выносах Сулинского, а пелиты — Св. Георгия рукавов, где их содержание достигает 89 % и 70 % соответственно.

Практически на всех точках наблюдения вблизи дельты Дуная, на поверхности донных осадков обнаружены следы вторичного заиления — наилок.

**Измеренные параметры придонной воды и осадков** перечислены ниже. Прозрачность изменяется от 2 м (ст. MN103-9, –17,5 м) до 12,5 м (ст. MN103-3, –80,5 м); соленость — от 17,8 psu (ст. MN103-9, –17,5 м) до 18,9 psu (ст. MN103-3, –80,5 м); электропроводность — от 29,6 мСм/см (ст. MN103-9, –17,5 м) до 31,1 мСм/см (ст. MN103-3, –80,5 м); температура от 6,9 °С (ст. MN103-9, –17,5 м) до 10,9 °С (ст. MN103-3, –80,5 м), повышение температуры придонной воды с глубиной, а не наоборот, связано с тем, что измерения были проведены ранней весной, когда вода на мелководье еще не прогрелась и была холоднее, чем на глубине 80 м; растворенный в воде кислород — от 4,05 мг/л (ст. MN103-3, –80,5 м) до 9,21 мг/л (ст. MN103-6, –54,7 м). Степень насыщения воды кислородом варьирует от 36,5 % (ст. MN103-3, –80,5 м) до 78,7 % (ст. MN103-6, –54,7 м); pH - от 8,1 (ст. MN103-

18, — 34,5 м) до 8,65 (ст. MN103-4, —78,0 м);  $E_h$  — от 93,0 мВ (ст. MN103-14, —61,5 м, расположенная напротив рукава Св. Георгий) до 258 мВ (ст. MN103-2, —67,0 м, расположенная на внешнем шельфе в стороне от речного стока);  $PO_4^{3-}$  — от 0,01 мг/л (ст. MN103-18, —34,5 м) до 0,22 мг/л (ст. MN103-1, —58 м). Содержание  $SiO_2$  — от 0,43 мг/л (ст. MN103-16, —24,6 м) до 1,13 мг/л (ст. MN103-3, —80,5 м). В донных осадках:  $Org$  изменяется от 2,034 % (ст. MN103-16, —24,6 м) до 4,39 % (ст. MN103-6, —54,7 м);  $CaCO_3$  — от 9,126 % (MN103-9, —17,5 м) до 44,38 % (ст. MN103-7, —46,0 м); C/N — от 8,311 (ст. MN103-8, —33,6 м) до 11,43 (ст. MN103-3, —80,5 м);  $\delta^{15}N$  — от 4,936 (ст. MN103-8, —33,6 м) до 6,35 (ст. MN103-1, —58 м).

**Статистический анализ.** С целью нахождения главных факторов, влияющих на состояние донных экосистем, использован факторный анализ гидрологических характеристик. Полученные результаты скоррелированы как с геохимическими параметрами придонной воды и осадков, так и с гранулометрическим составом последних. В факторном анализе использован метод главных компонент (Principal components) с последующей процедурой ортогонального вращения варимакс (Varimax normalized).

По результатам анализа выделено три фактора Ф-1, Ф-2 и Ф-3. Матрица факторных нагрузок приведена в табл. 2. Процент вклада каждого фактора в общую дисперсию (eigenvalue) показан в табл. 3, на которой видно, что суммарный вклад всех факторов в общую дисперсию составляет 89 %, а следовательно полученные результаты статистически достоверны.

Фактор 2 имеет отрицательную факторную нагрузку к Фактору 1. Поэтому на факторной диаграмме Ф-1 и Ф-2 располагаются в противоположных углах, в то время как Ф-3 занимает промежуточное положение между ними (рис. 9).

Таблица 2. Матрица факторных нагрузок

Variable	Factor Loadings (Varimax normalized) Extraction: Principal components (Marked loadings are >700 000)			Variable	Factor Loadings (Varimax normalized) Extraction: Principal components (Marked loadings are >700 000)		
	Factor 1	Factor 2	Factor 3		Factor 1	Factor 2	Factor 3
Tr	<b>0,792884</b>	0,021982	0,252292	SI	-0,178741	<b>-0,977285</b>	0,086757
S	<b>0,879245</b>	0,323744	0,161215	pH	0,138411	-0,148953	<b>0,925920</b>
U	<b>0,952359</b>	0,117612	0,124429	Eh'	0,164461	0,055610	<b>0,943288</b>
T °C	<b>0,844465</b>	0,193317	-0,006921	Expl. Var	3,141982	2,085955	1,859969
DO	-0,204896	<b>-0,974213</b>	0,012217	Prp.Totl	0,392748	0,260744	0,232496

Жирным шрифтом выделены наивысшие значения.

Таблица 3. Процент вклада каждого фактора в общую дисперсию и их накопленную сумму

Value	Eigenvalues. Extraction: Principal components			
	Eigenvalue	% Total variance	Cumulative Eigenvalue	Cumulative, %
Ф-1	3,859 515	48,24 394	3,859 515	48,24 394
Ф-2	2,063 716	25,79 645	5,923 231	74,04 039
Ф-3	1,164 675	14,55 843	7,087 906	88,59 882

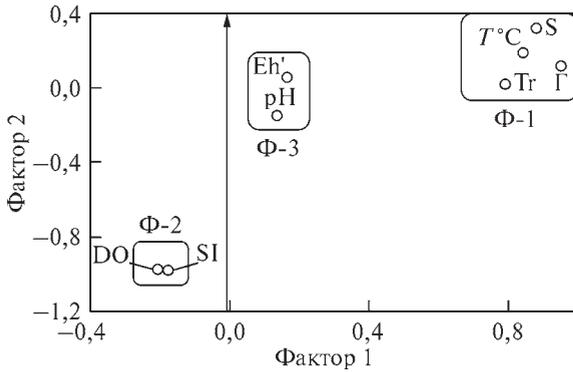


Рис. 9. 2D диаграмма факторного анализа, показывающая положение трех факторов в плоскости Фактор 1 — Фактор 2

Для выяснения физической природы каждого фактора предпринят корреляционный анализ. Значимые и трендовые коэффициенты корреляции представлены в табл. 4.

Наиболее значимым является Фактор 1, вклад которого в общую дисперсию исходных данных составляет 48 % (табл. 3). Фактор 1 положительно коррелируется с глубиной, прозрачностью, соленостью, электропроводностью, температурой, содержанием  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaCO}_3$ , C/N и отрицательно с алевритами. Вторым по значимости является Фактор 2, на долю которого приходится 26 % дисперсии исходных данных. Фактор 2 положительно коррелируется с растворенным кислородом, степенью насыщения воды кислородом и отрицательно с  $\text{SiO}_2$ . Наименее значимым является Фактор 3, вклад которого в дисперсию исходных данных составляет 15 %. Этот фактор положительно коррелируется с  $E_h$  и коэффициентом сортировки осадков So (табл. 4)

Фактор 1 представляет собой расстояние от берега или глубину бассейна — чем дальше от берега, тем глубже и тем выше соленость и тесно связанная с ней электропроводность, а значит тем слабее опресняющее влияние дунайских вод.

Таблица 4. Коэффициенты корреляции между Факторами 1, 2, 3 и абиотическими параметрами среды

Параметры среды	Факторы		
	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3
Глубина	<b>0,67</b>		
Прозрачность	<b>0,78</b>		
Соленость	<b>0,75</b>		
Электропроводность	<b>0,70</b>		
T °C	<b>0,71</b>		
DO		<b>0,86</b>	
SI		<b>0,89</b>	
pH			<i>0,50</i>
$E_h$			<b>0,72</b>
$\text{SiO}_2$	<b>0,59</b>	<b>-0,60</b>	
Сорг	<b>0,44</b>		
$\text{CaCO}_3$	<b>0,52</b>		<i>0,42</i>
C/N	<b>0,61</b>		
Псефит		<i>0,43</i>	
Алеврит	<b>-0,62</b>		
Пелит		<i>-0,40</i>	
Md		<i>0,47</i>	
So			<b>0,66</b>

Жирным шрифтом выделены значимые коэффициенты корреляции; курсивом — трендовые.

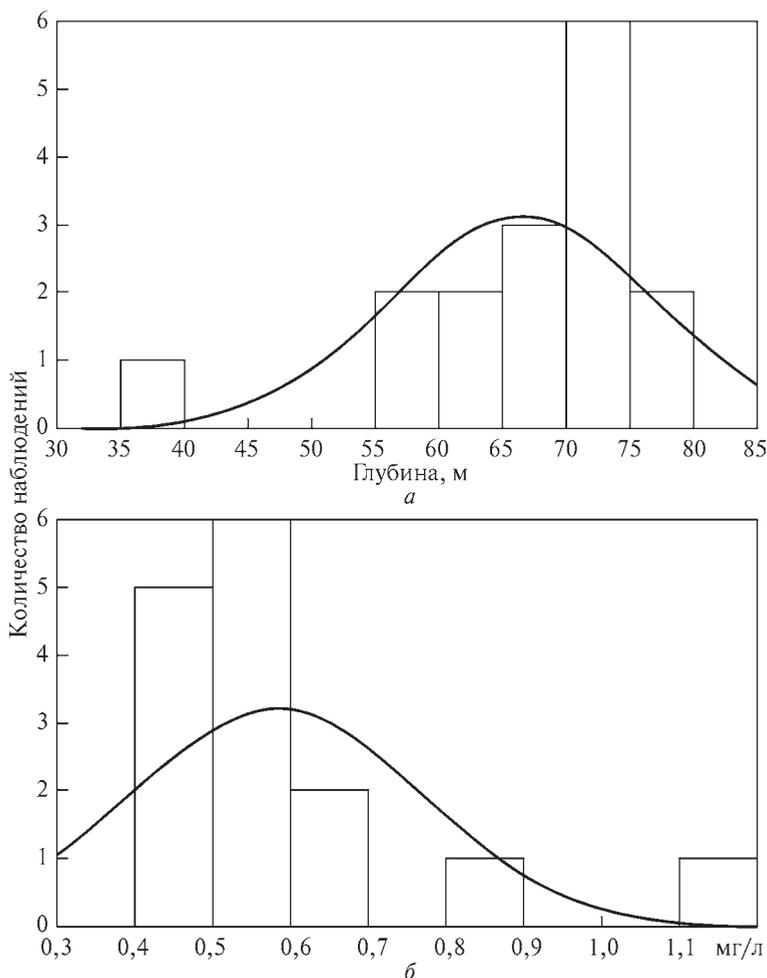
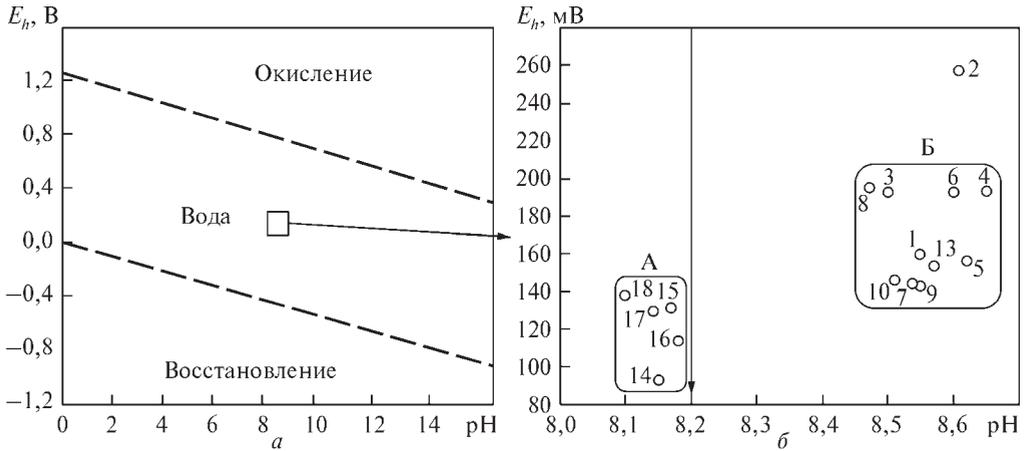
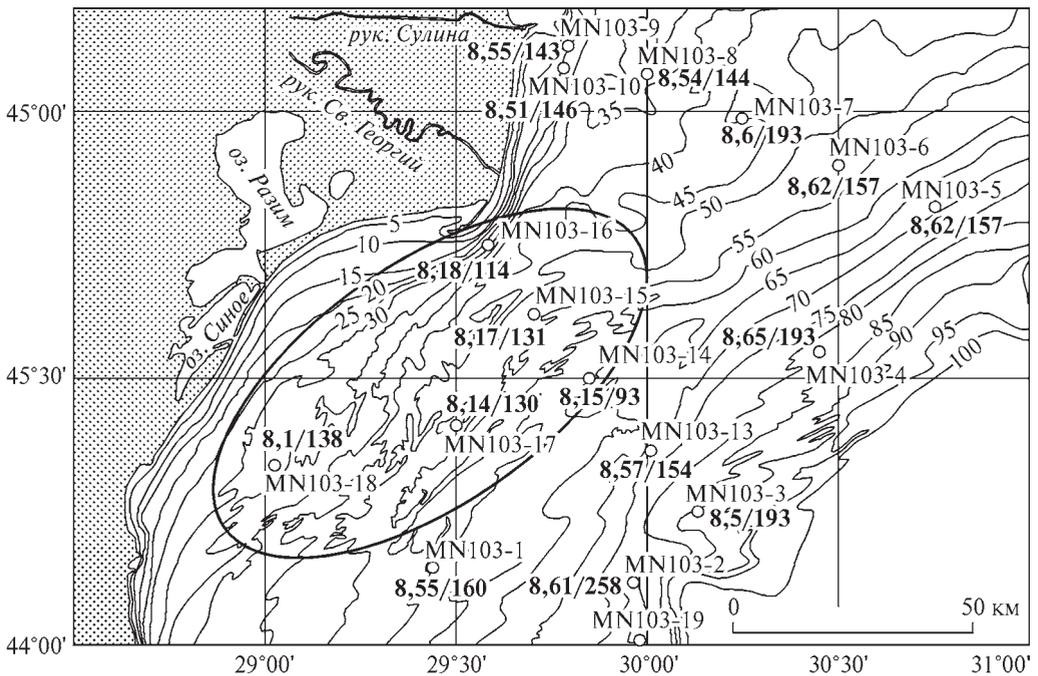


Рис. 10. Гистограммы распределения DO (а) и SiO<sub>2</sub> (б) придонной воде

Положительная корреляция Фактора 1 с SiO<sub>2</sub> говорит о том, что накопление кремнезема происходит более интенсивно на внешнем шельфе. Это подтверждают аналитические измерения SiO<sub>2</sub> в водной толще. Так, на ст. MN103-3, расположенной на внешнем шельфе (–80,5 м), содержание SiO<sub>2</sub> увеличивается от 0,204 до 0,210, 0,962 и 1,13 мг/л в слое воды 0, 15, 76,0 и 80,5 м соответственно. В тоже время на ст. MN103-6, расположенной на краю авандельты (–54,7 м), содержание SiO<sub>2</sub> в тех же слоях водной толщи практически не изменяется, колеблясь от 0,487 до 0,438 мг/л в поверхностном и донном слое воды, соответственно. Морской генезис кремнезема подтверждает показатель C/N, значения которого варьируют между 8,3 и 11,5. Этот показатель указывает на процессы, происходящие с органическим веществом по мере его достижения дна бассейна и последующего захоронения в донных осадках. Значения C/N между 4 и 10 свидетельствует о морском, а более 20 — о континентальном генезисе органического вещества [30]. Источником кремнезема являются диатомовые водоросли, панцири которых в пробах осадков более обильны на внешнем шельфе, чем в более мелководных районах.

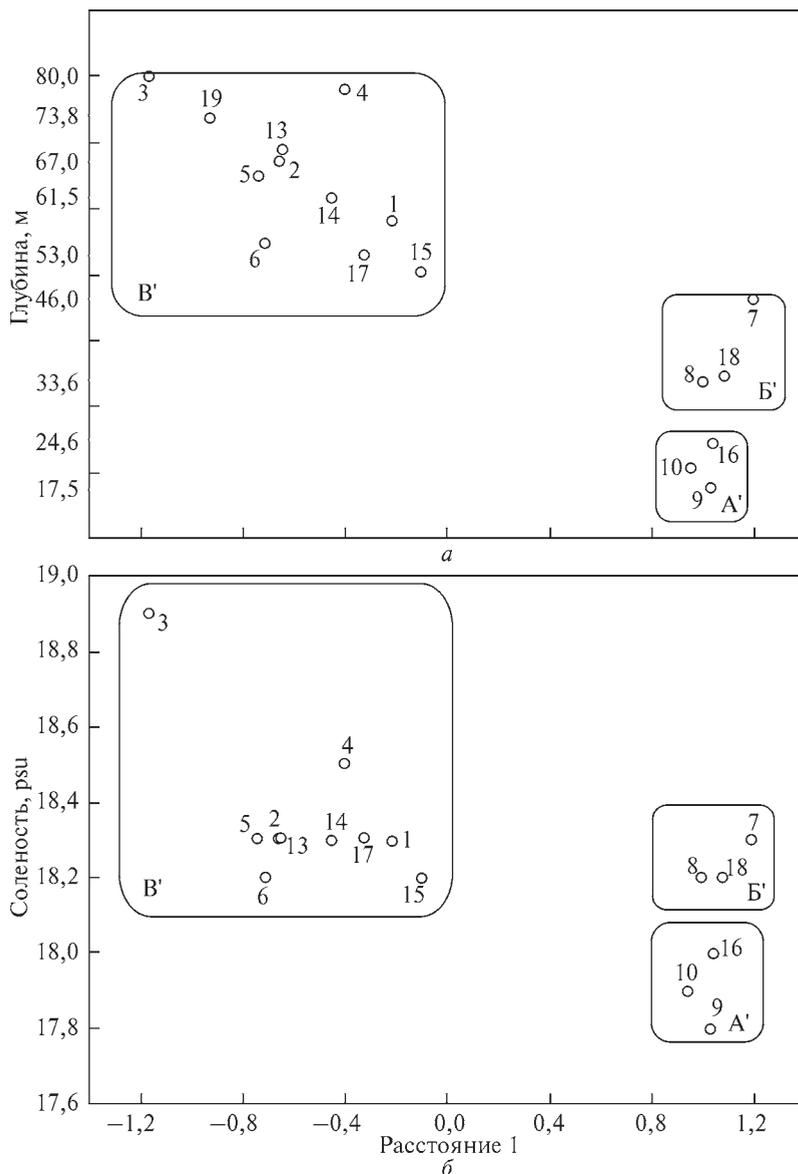


**Рис. 11.** Диаграмма Пурбе, отображающая термодинамически устойчивые формы существования  $O_2$  и  $H_2$  в морской воде при различных значениях pH и Eh. В квадрате - поле нахождения значений Eh, увеличенное на скатерплоте (б). Стрелкой показан pH = 8,2, который разграничивает растворимость (наличие)  $CO_2$  в воде. При pH < 8,2 условия окислительно-восстановительные, а при pH > 8,2 — окислительные



**Рис. 12.** Пространственное распределение pH (числитель) и Eh (знаменатель) в исследуемом районе

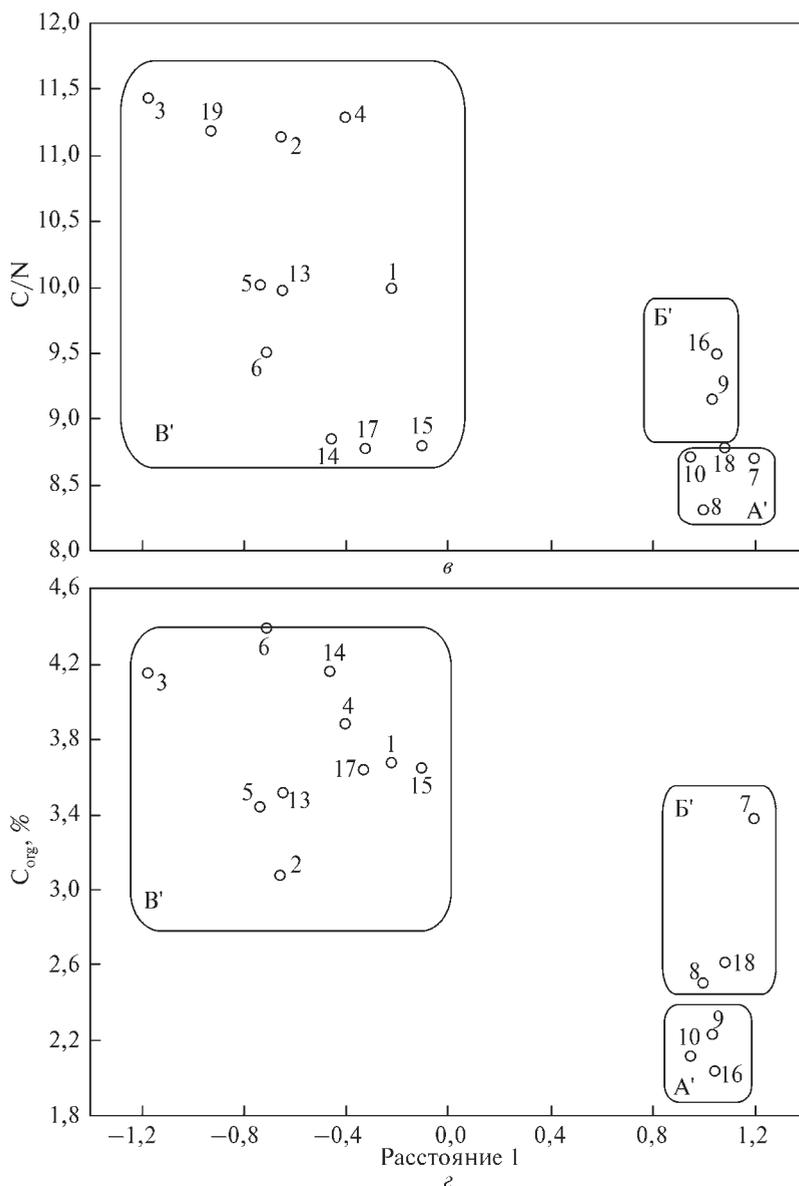
Положительная корреляция Фактора 1 с  $CaCO_3$  говорит об увеличении содержания карбонатного материала с глубиной. Положительная корреляция  $CaCO_3$  с псефитовой ( $r = 0,57$ ) фракцией свидетельствует в пользу биогенного генезиса псефитов (за счет раковин моллюсков). Ареалы распространения



псефитов определяются наиболее благоприятными для жизни моллюсков условиями внешнего шельфа, куда не достигает речной сток Дуная.

Отрицательная корреляция между Фактором 1 и алевритовой фракцией указывает на то, что расстояние от берега (глубина моря) играет обратную роль в накоплении тонкозернистого материала. Классическая модель седиментации, при которой аккумуляция тонкозернистых осадков осуществляется на значительных глубинах и/или при низкой гидродинамической активности, здесь не выдерживается, поскольку основным поставщиком осадков алевритовой размерности является Дунай. Об этом свидетельствуют поля алевритов напротив устьев рукавов Сулина и Св. Георгий.

Негативная корреляция  $\text{CaCO}_3$  с пелитовой фракцией ( $r = -0,51$ ) показывает, что карбонатное вещество не принимает участия в ее формировании. Наряду



**Рис. 13.** Структура групп станций в плоскостях: Dimension 1 — Глубина (а), Dimension 1 — Соленость (б), Dimension 1 — C/N (в) Dimension 1 — C<sub>орг</sub> (г). Графики указывают на то, что по указанным параметрам среды выделенные группы станций практически не пересекаются и совпадают с кластерами А, Б, В, выделенными по фораминиферам (см. рис. 3 а, б)

с преобладанием пелитов в аванделйте, это свидетельствует в пользу формирования геохимического барьера с интенсивным развитием процессов абиогенной флокуляции, приводящей к накоплению толщи пелитов.

Фактор 2 представляет собой эвтрофикацию водной толщи, эффект которой возрастает от поверхности ко дну моря. На это указывает отрицательная корреляция SiO<sub>2</sub> с DO и SI ( $r = -0,65$ ;  $-0,68$  соответственно) и положительная — с C/N ( $r = 0,61$ ). Понижение содержания кислорода связано с его утилизацией

при разложении диатомовых водорослей — чем больше водорослей, тем ниже содержание кислорода и тем выше содержание углерода и эвтрофикация придонной толщи воды.

Судя по неравномерному распределению кислорода (рис. 10, а) и кремнезема (рис. 10, б) в придонной воде, эвтрофикация носит «пятнистый» характер.

Фактор 3 представляет собой антропогенное загрязнение придонной толщи воды органикой, привносимой Дунаем. Это отражают значения тесно связанных между собой показателей  $E_h$  и рН, которые характеризуют состояние воды, показанное на диаграмме Пурбе (рис. 11).

Рис. 11, а показывает, что реальные значения  $E_h$  сконцентрированы в диапазоне рН от 8,1 до 8,7 и располагаются в срединной зоне между окислением и восстановлением. На рис. 11, б выделяется две группы станций А и Б с разделительной границей, проходящей по рН = 8,2. Группа станций А располагается напротив устья рукава Св. Георгий (рис. 12) и находится под сильным воздействием речных вод.

Пресные воды понижают рН морской воды [1], а антропогенное загрязнение обогащает их органическим веществом. Поэтому станции группы А имеют пониженные рН < 8,2 и  $E_h$  < 140 мВ. Понижение  $E_h$  обусловлено интенсивным ростом популяций микроорганизмов и их метаболизмом [19]. Судя по увеличению рН и  $E_h$  в группе станций Б, загрязнение здесь несравненно меньше. Оно практически не ощущается на внешнем шельфе, где располагается ст. MN-103-2 (рис. 12) с наиболее высокими показателями рН и  $E_h$  (рис. 11, б).

Положительная корреляция Фактора 3 с коэффициентом сортировки осадков ( $S_o$ ), который в свою очередь имеет наиболее высокий положительный коэффициент корреляции с псефитовой ( $r = 0,66$ ) и наиболее низкий отрицательный — с пелитовой фракцией ( $r = -0,73$ ), говорит о том, что наиболее благоприятные условия для жизни морских организмов складываются по мере удаления от берега, увеличения глубины моря и уменьшения влияния речного стока (загрязнения) и наоборот.

**Фораминиферы и среда.** Позиция кластеров станций А, Б, В с комплексами *A. tepida*, *A. compacta*, *A. ammoniformis*, соответственно, в прямоугольной системе координат демонстрирует их четкое разделение на координатной плоскости Расстояние 1 — Расстояние 2 (рис. 3, б). Это говорит о том, что Расстояние 1 является ведущим фактором, определяющим распределение фораминифер в изучаемом районе. Корреляционный анализ показывает значимые коэффициенты корреляции между Расстояние 1,  $\Phi-1$ , C/N, Corg и  $SiO_2$  (табл. 5).

На рис. 13, а—г видно, что выделенные по гидрологическим и геохимическим параметрам группы станций А', Б', В' практически не пересекаются, а их сравнение с рис. 3 б показывает, что это те же самые группы станций А, Б, В, которые выделены по фораминиферам.

Кластер станций А с комплексом *A. tepida* и группа станций А', выделенных по солености, расположены в мелководной зоне с пониженной соленостью. Кластер Б и группа станций Б' с комплексом *A. compacta* занимают промежуточное положение и расположены на краю авандельты. Кластер станций В с комплексом *A. ammoniformis* и группа станций В' расположены на внешнем шельфе, где соленость повышена.

Аналогичное сравнение, проведенное в плоскости Расстояние 1 — Гранулометрические фракции — не выявило совпадений между группами станций, выделенных по грансоставу и фораминиферам. Однако, отдельные виды обнаруживают корреляцию с некоторыми гранулометрическими параметрами (табл. 6), что требует дальнейшего изучения.

Следует отметить, что распределение гранулометрических фракций само по себе отбивает границы распространения речного стока. В частности, распространение пелитовой фракции четко приурочено к выходу дунайских вод на шельф Черного моря. Ее максимальные содержания расположены напротив рукава Св. Георгия, уменьшаясь по мере удаления от источника сноса (рис. 14).

Области высокой сортированности донных отложений расположены в непосредственной близости от дельты Дуная и протягиваются в глубоководную часть исследуемого района по направлению, соответствующему основному потоку выносимых Дунаем вод. Области плохой сортированности расположены на некотором удалении от дельты Дуная и на значительных глубинах. Таким образом, сортированность осадков (рис. 15) также отражает направление распространения речного стока Дуная, который ослабевает по мере удаления от берега

Корреляция частоты встречаемости главных видов фораминифер в комплексах с Факторами 1, 2, 3 показывает, что каждый комплекс является индикатором определенного состояния донных экосистем румынского шельфа Черного моря (табл. 7).

Комплекс *A. tepida* включает три главных вида. Два из них *A. tepida* и *H. anglica* имеют отрицательные коэффициенты корреляции с Фактором 1 и связанными с ним геохимическими параметрами. Вид *Porosonion markobi ponticus* имеет отрицательный коэффициент корреляции с рН. Все виды комплекса являются голэври-

Таблица 5. Значимые коэффициенты корреляции между Dimension 1, гидрологическими и геохимическими параметрами среды

Абиотические параметры	Придонная вода				SiO <sub>2</sub>	Донные осадки	
	Фактор 1					C/N	C <sub>org</sub>
	D	S	Tr	U			
Расстояние 1	<b>-0,89</b>	<b>-0,64</b>	<b>-0,70</b>	<b>-0,79</b>	<b>-0,55</b>	<b>-0,64</b>	<b>-0,81</b>

Таблица 6. Коэффициенты корреляции между фораминиферовыми характеристиками и гранулометрическими параметрами донных осадков

Фораминиферы	Гранулометрические характеристики донных осадков					
	Гранулометрические фракции				Md	So
	Псефитовая	Песчаная	Алевритовая	Пелитовая		
<i>A. ammoniformis</i>	<i>0,41</i>				<b>0,52</b>	
<i>A. tepida</i>	<b>-0,53</b>		<b>0,72</b>	<i>0,51</i>		
<i>E. scabra</i>		<b>0,52</b>				
<i>En. deplanata</i>						<i>-0,50</i>
<i>H. anglica</i>			<b>0,94</b>			
<i>N. matagordanus</i>	<i>0,44</i>				<i>0,50</i>	

Жирным шрифтом выделены значимые коэффициенты корреляции; курсивом — трендовые.

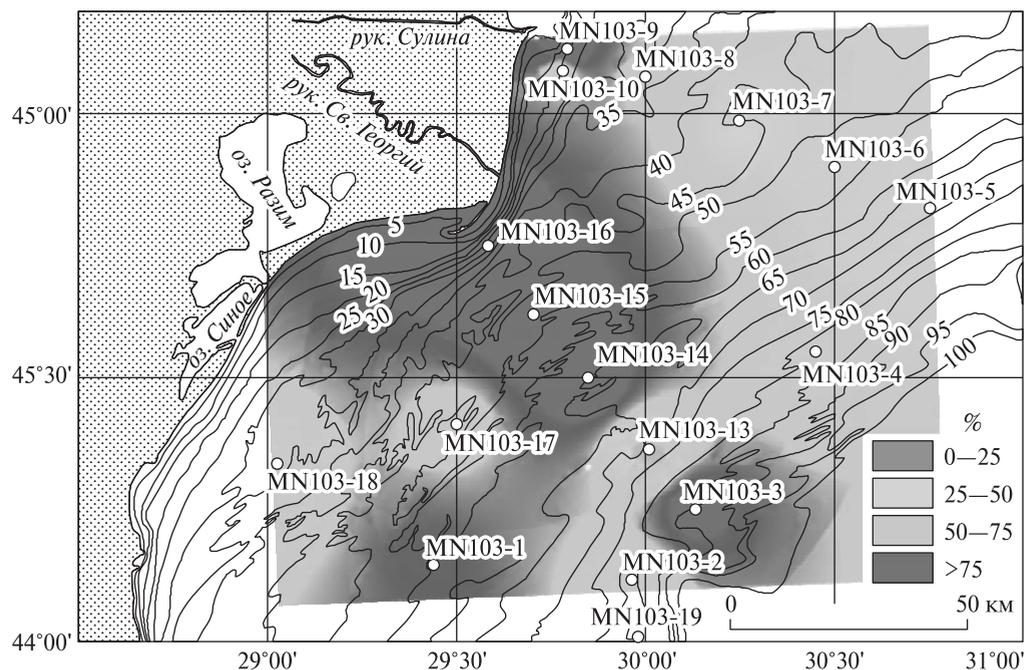


Рис. 14. Пространственное распределение пелитовой фракции в донных осадках румынского шельфа Черного моря

Таблица 7. Коэффициенты корреляции между фораминиферовыми характеристиками и Факторами 1, 2, 3

Фораминиферы	Абиотические параметры среды											
	Фактор 1					Фактор 2		Фактор 3		SiO <sub>2</sub>	C <sub>org</sub>	C/N
	D	Tr	S	U	T °C	DO	SI	pH	E <sub>h</sub>			
<i>A. tepida</i>	<b>-0,65</b>	<b>-0,61</b>	<b>-0,62</b>	<b>-0,67</b>							<b>-0,62</b>	
<i>H. anglica</i>	<b>-0,52</b>	<b>-0,41</b>	<b>-0,56</b>	<b>-0,52</b>	<b>-0,40</b>							
<i>Porosononion subgranosus mediterranicus</i>								<b>-0,44</b>				
<i>A. ammoniformis</i>	<b>0,78</b>	<b>0,63</b>		<b>0,57</b>							<b>0,60</b>	<b>0,51</b>
<i>En. deplanata</i>	<b>0,47</b>	<b>0,47</b>		<b>0,48</b>	<b>0,40</b>						<b>0,47</b>	
<i>Es. jatzkoi</i>	<b>0,42</b>		<b>0,74</b>	<b>0,66</b>	<b>0,75</b>	<b>-0,76</b>	<b>-0,75</b>				<b>0,80</b>	<b>0,52</b>
<i>F. lucida</i>	<b>0,48</b>	<b>0,44</b>	<b>0,75</b>	<b>0,68</b>	<b>0,66</b>	<b>-0,79</b>	<b>-0,75</b>				<b>0,85</b>	<b>0,54</b>
<i>La. williamsoni</i>	<b>0,54</b>	<b>0,56</b>	<b>0,54</b>	<b>0,58</b>	<b>0,45</b>	<b>-0,44</b>		<b>0,41</b>	<b>0,71</b>		<b>0,48</b>	<b>0,72</b>
<i>P. dzemetinica</i>	<b>0,47</b>	<b>0,43</b>	<b>0,75</b>	<b>0,68</b>	<b>0,67</b>	<b>-0,77</b>	<b>-0,73</b>				<b>0,83</b>	<b>0,51</b>
<i>A. compacta</i>	<b>0,44</b>											<b>-0,58</b>
<i>C. parkerae</i>											<b>0,53</b>	
<i>E. scabra</i>					<b>-0,42</b>							<b>-0,40</b>
<i>N. matagordanus</i>						<b>0,48</b>	<b>0,51</b>	<b>0,46</b>			<b>0,45</b>	
Суммарная численность, экз./50 г	<b>-0,40</b>	<b>-0,43</b>										
Количество видов Н'	<b>0,53</b>	<b>0,63</b>		<b>0,51</b>	<b>0,57</b>						<b>0,59</b>	<b>0,57</b>

Жирным шрифтом выделены значимые коэффициенты корреляции; курсивом — трендовые.

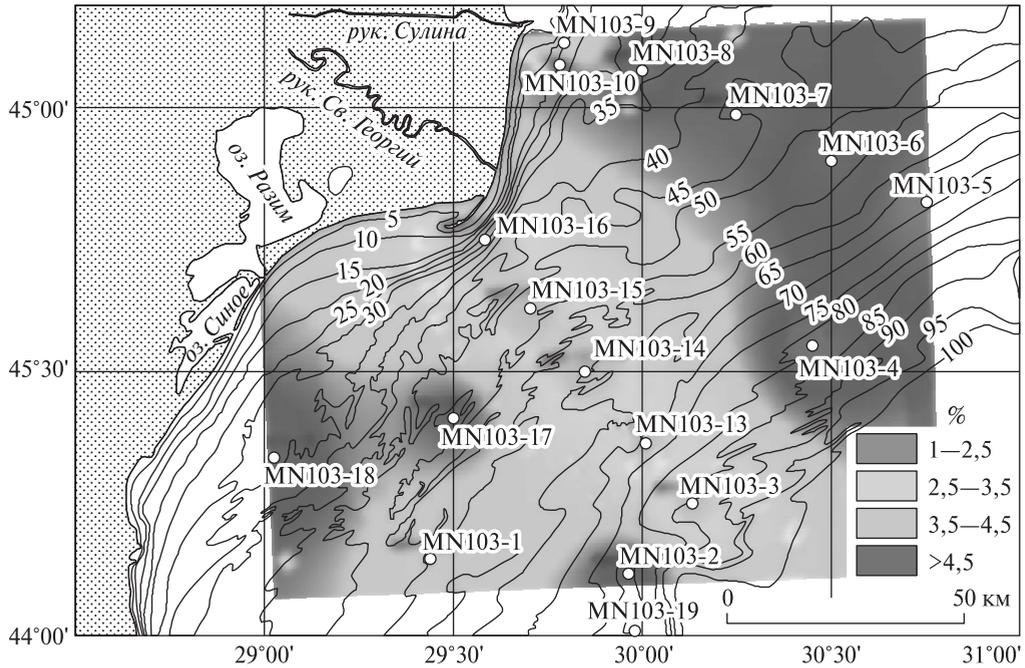


Рис. 15. Пространственное распределение коэффициента сортировки  $S_o$  донных осадков румынского шельфа Черного моря

галинными, мелководными, хорошо приспособленными (толерантными) к опреснению и загрязнению. Данный комплекс является показателем влияния дунайских вод на донные экосистемы.

Комплекс *A. ammoniformis* включает шесть главных видов. Все они имеют положительные коэффициенты корреляции с Фактором 1 и связанными с ним геохимическими параметрами. Часть видов имеет отрицательную корреляцию с Фактором 2 и только один вид *La. williamsoni* положительно коррелируется с Фактором 3. Вид *A. ammoniformis* — это стриктоэвригалинный относительно глубоководный тепловодный вид, приспособленный к жизни на внешнем шельфе. Остальные виды, принадлежащие к отряду Lagenida, являются полигалинными, глубоководными, тепловодными обитателями внешнего шельфа, которые не переносят понижения солёности [5, 6, 7, 45]. Будучи представителями инфауны, эти виды приспособлены к пониженным содержаниям кислорода в придонном слое воды, о чем говорят их отрицательные коэффициенты корреляции с DO и SI. Все виды комплекса *A. ammoniformis* являются «прогрессивными по отношению к солёности» и «толерантными по отношению к эвтрофикации». В целом, комплекс *A. ammoniformis* является показателем отсутствия влияния дунайских вод на донные экосистемы. Он также может говорить об эвтрофикации слоя воды у дна.

Комплекс *A. contracta* не имеет четко выраженных коэффициентов корреляции с параметрами среды, очевидно потому, что занимает промежуточное положение между краем авандельты и внешнего шельфа. Поэтому с одной стороны на этот комплекс воздействуют пресные воды, потерявшие свою интенсивность и свойства по мере удаления от берега, а с другой — морская среда. Все виды

данного комплекса эпифитные, и большинство из них стриктоэвригалинные. Их можно назвать «условно прогрессивными по отношению к солености». По-видимому, комплекс может служить в качестве индикатора ослабления влияния речных вод на донные экосистемы.

Виды-индикаторы, позволяющие оценить экологическое состояние донных экосистем изучаемого района, показаны в табл. 8.

В качестве дополнительных индикаторов может быть использована агрегированность (по численности), число видов и разнообразие (H') фораминифер на станциях. Наибольшая агрегированность характерна для подводной части дельты Дуная, а наибольшее количество видов фораминифер и видовое разнообразие — для внешнего шельфа.

Таким образом, латеральное распределение фораминифер в изучаемом районе подчиняется определенной зональности. Подводная и внутренняя часть авандельты населены наиболее мелководным голэвригалинным комплексом *A. tepida*, «толерантным по отношению к солености и загрязнению». Наружная часть авандельты населена относительно глубоководным стрикто-полигалинным комплексом *A. compacta*, «прогрессивным по отношению к солености и загрязнению». Внешний шельф населен глубоководным полигалинным комплексом *A. ammoniformis* также «прогрессивным по отношению к солености» и «толерантным по отношению к эвтрофикации». Переход от одного комплекса к другому знаменует ослабление влияния дунайских вод, обогащенных органикой и твердым стоком, по мере возрастания глубины бассейна и солености, потому что именно соленость является критическим фактором, обуславливающим специфику органического мира. Изменения солености влияют на ход процесса метаболизма и активность организмов через изменения: 1) общей концентрации солей,

Таблица 8. Координаты и глубина опробованных станций

№	Фораминиферы	Ф-1				Ф-2	Ф-3	Геохимические параметры		
		D	Tr	S	T °C	DO	E <sub>h</sub>	SiO <sub>2</sub>	C <sub>org</sub>	C/N
1	<i>A. ammoniformis</i>									
2	<i>A. compacta</i>									
3	<i>A. tepida</i>									
4	<i>C. parkerae</i>									
5	<i>Es. jatzkoi</i>									
6	<i>F. lucida</i>									
7	<i>H. anglica</i>									
8	<i>La. williamsoni</i>									
9	<i>P. dzemetinica</i>									

Черным цветом отмечена положительная реакция фораминифер на Факторы 1, 2, 3 и связанные с ними геохимические параметры среды, серым цветом — отрицательная. Жирным шрифтом выделены «прогрессивные по отношению к солености виды», остальные виды являются «толерантными по отношению к солености»

2) соотношения различных ионов и 3) степени насыщенности растворенными газами, особенно кислородом и углекислым газом.

Фауна фораминифер румынского шельфа обеднена по сравнению не только с сопредельными бассейнами, но и с другими районами Черного моря. В румынском секторе Черного моря при солёности 17,8—18,9 psu обнаружено 15 видов, в то время как на юго-западном шельфе (20 psu) их 49, а в прибухорском районе (26 psu) их 78. Всего же в Черном море обитает 101 вид фораминифер [5, 7, 45], а в Средиземном (33—39 psu) их количество достигает 580 [17, 24]. На крайнюю обедненность указывает также коэффициент разнообразия фораминифер. В румынском секторе  $H' = 1,6$ , в то время как в Средиземном море он варьирует от 3,1 на израильском шельфе Средиземного моря [42] до 3,65 на португальском шельфе Атлантического океана [28]. Согласно [31], коэффициент разнообразия фораминифер  $H' > 2$  типичен для солоноватоводных водоёмов и является также результатом пониженной солёности. Фауна фораминифер румынского шельфа также обеднена в количественном отношении. Здесь наиболее высокая численность фораминифер составляет 15,616 экз./50г осадка, в то время как на португальском шельфе Атлантического океана она достигает 28,000 экз./г осадка [26]. Обедненность родового и видового состава фораминифер Черного моря объясняется его крайне ограниченной связью с океаном, а на румынском шельфе еще и сильным влиянием распресняющего стока Дуная. Речные воды не только понижают солёность, но и обуславливают возникновение геохимического барьера на границе их встречи с морскими водами, приводя к формированию обширных полей пелитов. Последние неблагоприятны для жизни фораминифер и других бентосных организмов из-за дефицита питательных веществ и загрязнения.

Таким образом, речной сток неблагоприятно влияет на морские донные экосистемы, приводя к нарушению их равновесного состояния. Перестройка комплексов фораминифер по латерали позволяет дифференцировать степень влияния речного стока на донные экосистемы от сильного (комплекс *A. tepida*) до слабого (комплекс *A. compacta*) и отсутствующего (комплекс *A. ammoniformis*). Граница между первым и вторым комплексами проходит по изобате 25 м, т.е. совпадает с фронтальной зоной подводной части дельты Дуная. Граница между вторым и третьим комплексами проходит по изобате 50 м, т.е. отвечает наружной границе авандельты Дуная. Здесь также ощущается влияние речного стока, но в значительно меньшей степени. Глубже изобаты 50 м влияние речного стока не ощущается.

## Выводы

Три главных фактора определяют таксономическое разнообразие и количественные характеристики фораминифер на румынском шельфе Черного моря. Главный из них — глубина бассейна, которая проявляется опосредованно, в первую очередь через влияние солёности придонной воды.

Увеличение разнообразия ( $H'$ ) фораминифер отражает градиент уменьшения влияния речного стока, а увеличение численности ограниченного количества голэвригалинных мелководных видов в прибрежных районах свидетельствует об отсутствии конкурентов и обилии питательных веществ, привносимых речными водами. Обилие пищи способствует репродуктивной функции фораминифер, приводя к высоким численностям [44]. Напротив, эвтрофикация придонных вод, проявляющаяся сильнее на внешнем шельфе, ухудшает жизненные условия фораминифер, приводя к сокращению популяций.

Таким образом, перегруппировка видового состава и увеличение количества видов с увеличением глубины и солёности позволяют уверенно оконтуривать границы распространения речного стока и говорить о его неблагоприятном воздействии на морские донные экосистемы. Низкое видовое разнообразие фораминифер позволяет оконтурить районы с наиболее сильным влиянием пресных вод, а его повышенные значения, напротив, — уменьшение их влияния на донные экосистемы. В целом, сообщества фораминифер в их качественных и количественных характеристиках являются показателями уровня стрессовости изучаемой территории в режиме реального масштаба времени.

Отсутствие корреляции между гранулометрическими фракциями и фораминиферовыми параметрами говорит об отсутствии взаимосвязи между ними. Тем не менее, само по себе пространственное распределение гранулометрических фракций и коэффициента сортировки позволяет оконтурить границы распространения пресноводного стока у морского дна, которые, в целом, совпадают с границами, проведенными по фораминиферам, о чем более подробно будет изложено в другой работе.

Проведенные исследования в геологической методологии можно отнести к решению так называемых прямых задач, априорно детерминированных к происхождению. Это дает возможность рассматривать зафиксированную в осадках закономерность распределения видов фораминифер как граничные условия для решения обратной задачи при изучении нижележащих стратифицированных толщ.

*Работа является составной частью и выполнена при финансовой поддержке европейского проекта BS-ERA.NET 076 «Water pollution prevention options for coastal zones and tourist areas: Application to the Danube Delta front area» (WAPCOAST). Авторы благодарят штат судна «Маре Нигрум» за помощь в получении фактического материала; докторов наук Габриеля Йона (руководитель проекта, ГеоЕкоМар, Бухарест, Румыния) и Йоргена Мёблус (Институт биогеохимии и морской химии Гамбургского университета, Германия) за предоставление результатов химического анализа воды и осадков; кандидата геол. н. С.В. Кадурина за помощь в экспедиционных работах и обсуждении гранулометрических данных; доктора наук Равиндер Сидху за предоставленную возможность изучения фораминифер в электронном сканирующем микроскопе в университете Манитобы в Канаде; д.хим.н., профессора П. Хомбах (Osornio Enterprise, Canada) за критические замечания при обсуждении химических параметров среды.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зацепин А.Г., Завьялов П.О., Кременецкий В.В., Поярко С.Г., Соловьев Д.М. Поверхностный опресненный слой в Карском море // *Океанология*. — 2010. — 50 (5). — С. 698—708.
2. Кравчук А.О. Современные изменения условий осадконакопления и бентосные фораминиферы как индикаторы загрязнения северо-западного шельфа Черного моря // *Проблемы геотоксикологии*. — Одесса: ТЭС, 2002. — С. 29—95.
3. Кубряков А.А., Станичный С.В., Зацепин А.Г., Кременецкий В.В. Распространение речных вод в Черном и Карском морях по спутниковым измерениям уровня, солёности и хлорофилла А // *Экологічна безпека прибережної та шельфової зон та комплексне використання ресурсів шельфу*: 36. наук. пр. — Севастополь, 2013. — Вып. 27. — С. 394—398.
4. Логвиненко Н. В., Сергеева Э. И. Методы определения осадочных пород. — Л.: Недра, 1986. — 240 с.
5. Янко В.В. Четвертичные фораминиферы Понто-Каспия: классификация, экология, биостратиграфия, история развития: Диссертация доктора геол.-мин. наук: 04.00.09 / Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова. — М., 1989. — 1000 с.

6. Янко В.В. Четвертичные фораминиферы рода *Ammonia* Понто-Каспия // Палеонтологический журнал. — 1990. — № 1. — С. 18–26.
7. Янко В.В., Троицкая Т. С. Позднечетвертичные фораминиферы Черного моря. — М.: Наука, 1987. — 111 с.
8. Янко-Хомбах В. В., Смынтына Е. В., Кадурин С. В., Ларченков Е. П., Какаранза С. В., Киосак Д.В. Колебания уровня Черного моря и адаптационная стратегия древнего человека за последние 30 тысяч лет // Геология и полезные ископаемые Мирового Океана. — 2011. — № 2. — С. 61–94.
9. Alve E., Bernhard, J.M. Vertical migratory response of benthic foraminifera to controlled oxygen concentrations in an experimental mesocosm // Mar. Ecol. Prog. Ser. — 1995. — № 116. — 137–151.
10. Anderson, O.R. Comparative Protozoology: Ecology, Physiology, Life History. — Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 1988. — 482 p.
11. Boltovskoy, E. Seasonal occurrences of some living foraminifera in Puerto Deseado' (Patagonia, Argentina) // Jour. Cons. Perm. Iner. Explor. Mer. — 1964. — V. 29 (2). — P. 136–145.
12. Bondar, C., State, I., Cernea, D., Harabagiu, E. Water Flow and Sediment Transport of the Danube at its Outlet Into the Black Sea // Meteorology and Hydrology. — 1991. — V. 21 (1). — P. 21–25.
13. Bradshaw, J.S. Laboratory experiments on the ecology of foraminifera // Contributions from the Cushman Foundation for Foraminiferal Research. — 1961. — V. XII (3). — P. 87–106.
14. Bresler, V., Yanko, V. Acute toxicity of heavy metals for benthic epiphytic foraminifera *Pararotalia spinigera* (Le Calvez) and influence of seaweed-derived DOC // Env. Toxicology and Chemistry. — 1995 б. — № 14. — P. 1687–1695.
15. Bresler, V., Yanko, V. Chemical ecology: A new approach to study living benthic epiphytic foraminifera // Journal of Foraminiferal Research. — 1995 а. — V. 25 (3). — P. 267–279.
16. Bresler, V., Yanko-Hombach, V. Chemical Ecology of Foraminifera: Parameters of Health, Environmental Pathology and Assessment of Environmental Quality // Environmental Micropalaeontology / Ed.: R. Martin. — New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow: Kluwer Academic / Plenum Publishers, 2000. — P. 217–256.
17. Cimerman, F., Langer, M. R. Mediterranean Foraminifera. — Ljubljana: Slovenska Academia Znanosti in Umetnosti, 1991. — 119 p.
18. Clock N. Benthic foraminifera as geochemical and micropaleontological proxies for redox conditions in the Peruvian oxygen minimum zone. — Doctoral thesis/PhD. — Kiel: Christian-Albrechts-Universit?t, 2011. — XI. — 121 p.
19. Cooper L. H. N. Oxidation-reduction potential in sea water // Marine Biol. Assn. U. K. Jour. — 1937. — № 22. — P. 167–176,
20. Debenay J.— P., Tsakiridis E., Soulard R., Grossel H. Factors determining the distribution of foraminiferal assemblages in Port Joinville Harbor (Ile d'Yeu, France): the influence of pollution // Marine Micropaleontology. — 2001. —V. 43 (1–2). — 75–118.
21. Fontanier C., Jorissen F.J., Licari L, Alexandre A., Anschutz P. Carbonel P. Live benthic foraminiferal faunas from the Bay of Biscay: faunal density, composition, and microhabitats // Deep-Sea Research. — 2002. — V. 49 (4). — P. 751–785.
22. Goineau, A., Fontanier, C., Jorissen, F., Buscail, R., Kerherv'e, P., Cathalot, C., Pruski, A. M., Lantoin, F., Bourgeois, S., Metzger, E., Legrand, E., Rabouille, C. Temporal variability of live (stained) benthic foraminiferal faunas in a river-dominated shelf — Faunal response to rapid changes of the river influence (Rhone prodelta, NW Mediterranean) // Biogeosciences. — 2012. — № 9. — P. 1367–1388.
23. Gonzalez, R., Dias, J.M.A., Ferreira, O. Recent rapid evolution of the Guadiana Estuary (South Western Iberian Peninsula) // Journal of Coastal Research Special Issue. — 2001. — V. 34. — P. 516–527.
24. Langer, M. R. Foraminifera from the Mediterranean and the Red Sea // Aqaba-Eilat, the Improbable Gulf: Environment, Biodiversity and Preservation / Ed.: F.D. Por. — Jerusalem: Magnes Press, 2008. — P. 399–417.
25. Lesen, A. E. Relationship between benthic foraminifera and food resources in South San Francisco Bay, California, USA // Marine Ecology Progress Series. — 2005. — V. 297. — P. 131–145.
26. Levy, A., Mathieu, R., Poignant, A., Rosset-Moulinier, M., Ubaldo, M.L., Lebreiro, S. Foraminiferos actuais de la Marge Continental Portuguesa-Inventaire et distribution // Memo'rias do Instituto Geolo'gico e Mineiro. — 1995. — № 32. — P. 3–116.

27. *Libes, S. M.* Stable Isotope Geochemistry of Nitrogen. — PhD Thesis. — USA: the Massachusetts Institute of Technology and the Woods Hole Oceanograph Institution, 1983. — 288 p.
28. *Martins, V., Carapito, M.C.* Distribuicão das comunidades bento'nicas de foramin'feros na plataforma continental de Aveiro // Comunicacões dos servic'os Geol'gicos de Portugal. — 1999. — V. 86. — P. 255—278.
29. *Mendes, I., Gonzalez, R., Dias, J.M.A., Lobo, F., Martins, V.* Factors influencing recent benthic foraminifera distribution on the Guadiana shelf (Southwestern Iberia) // Marine Micropaleontology. — 2004. — № 51. — P. 171—192.
30. *Meyers, P. A.* Preservation of Elemental and Isotopic Source Identification of Sedimentary Organic-Matter // Chemical Geology. — 1994. — V. 114 (3—4). — P. 289—302.
31. *Murray, J. W.* Ecology and Palaeoecology of Benthic Foraminifera. — Longman Scientific and Technical Science, 1991. — 397 p.
32. *Nigam, R., Khare, N.* Significance of correspondence between river discharge and proloculus size of benthic Foraminifera in paleomonsoonal studies // Geo-Marine Letters. — 1995. — V. 15 (1). — P. 45—50
33. *Panin, N.* Danube Delta. Genesis, evolution, geological setting and sedimentology // Geo-Eco-Marina — 1996. — № 1. — P. 7—23.
34. *Panin, N., Jipa, D.* Danube River sediment input and its interaction with the north-western Black Sea // Estuarine, Coastal and Shelf Science. — 2002. — V. 54 (3). — P. 551—562.
35. *Pascal, P.-Y., Dupuy, C., Richard, P., Niquil, N.* Bacterivory in the common foraminifer *Ammonia tepida*: Isotope tracer experiment and the controlling factors // Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. — 2008. — V. 359 (1). — P. 55—61.
36. *Rijk, S. de.* Salinity control on the distribution of salt marsh foraminifera (Great Marshes, Massachusetts) // Journal of Foraminiferal Research. — 1995. — V. 25 (2). — P. 156—166.
37. *Saraswat, R., Kouthanker, M., Kurtarkar, S., Nigam, R., Linshy, V. N.* Effect of salinity induced pH changes on benthic foraminifera: a laboratory culture experiment // Biogeosciences Discuss. — 2011. — № 8. — P. 8423—8450.
38. *Sen Gupta, B. K.* Foraminifera in marginal marine environments // Modern Foraminifera / Ed.: Sen Gupta, B.K. — Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1999. — P. 141—160.
39. *Walton, W. R.* Recent foraminiferal ecology and paleoecology // Approaches to Paleoecology / Eds.: J.Imbrie and N.D. Newell. — New York: John Wiley, 1964. — P. 151—237.
40. *Walton, W. R., Sloan, D. J.* The genus *Ammonia* Bruennich, 1772 its geographic distribution and morphologic variability // Journal of Foraminiferal Research. — 1990. — V. 20 (2). — P. 128—156.
41. *Yanko, V.* Stratigraphy and palaeogeography of marine Pleistocene and Holocene deposits of the southern seas of the USSR // Mem.Soc. Geol. Ital. — 1990. — № 44. — P. 167—187.
42. *Yanko, V., Ahmad, M., Kaminski, M.* Morphological deformities of benthic foraminiferal tests in response to pollution by heavy metals: implications for pollution monitoring // Journal of Foraminiferal Research — 1998. — № 28 (3). — P. 177—200.
43. *Yanko, V., Arnold, A., Parker, W.* The effect of marine pollution on benthic foraminifera // Modern Foraminifera / Ed.: Sen Gupta, B.K. — Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1999. — P. 217—238.
44. *Yanko, V., Kronfeld, A., Flexer, A.* The response of benthic foraminifera to various pollution sources: Implications for pollution monitoring // Journal of Foraminiferal Research — 1994. — V. 24 (1). — P. 1—17.
45. *Yanko-Hombach, V.* Controversy over Noah's Flood in the Black Sea: geological and foraminiferal evidence from the shelf // The Black Sea Flood Question: Changes in Coastline, Climate, and Human Settlement / Eds: Yanko-Hombach, V., Gilbert, A.S., Panin, N., Dolukhanov, P.M. — Dordrecht: Springer. — P. 149—203.
46. *Yanko-Hombach, V., Kondaryuk, T., Likhoddedova, O.G.* Foraminifera as indicators of environmental stress: New evidence from the Romanian shelf // Proceedings of UNESCO — IUGS — IGCP 610 «From the Caspian to Mediterranean: Environmental Change and Human Response during the Quaternary» First Plenary Meeting and Field Trip, October 12—19, 2013 / Eds.: A. Gilbert, V. Yanko-Hombach. — Tbilisi, 2013. — P. 159—166.

Статья поступила 06.09.2014

*V.V. Yanko, T.O. Kondaryuk, O.G. Likhodedova, I. Motnenko*

**ОЦІНКА ВПЛИВУ РІЧКОВОГО СТОКУ НА МОРСЬКІ ДОННІ ЕКОСИСТЕМИ ПО БЕНТОСНИМ ФОРАМІНІФЕРАМ І ЛІТОЛОГІЇ ДОННИХ ВІДКЛАДІВ**

В рамках міжнародного проекту BS-ERA.NET 076 «Water pollution prevention options for coastal zones and tourist areas: Application to the Danube Delta front area», WAPCOAST (2010—2012 pp.) вперше в Європі представлено результати досліджень з використання бентосних форамініфер і літології донних відкладень для оцінки впливу прісного стоку Дунаю на донні екосистеми румунського шельфу Чорного моря. Встановлено 15 видів форамініфер. Їх кількісні показники і перебудова структури комплексів, скорельовані з серією гідрологічних і геохімічних параметрів придонної товщі води і донних відкладень, включаючи їх гранулометричний склад, дозволяють встановити три головні чинники, що впливають на стан донних екосистем. До них відносяться: (1) відстань від берега і супутні їй параметри (глибина, солоність, прозорість, температура); (2) евтрофікація придонної товщі води і (3) її забруднення органікою, принесеною з континенту. Бентосні форамініфери в сукупності з літологією донних відкладень дозволяють оцінити ступінь впливу цих факторів на донні екосистеми і простежити поширення прісних вод Дунаю біля дна басейну.

**Ключові слова:** *Чорне море, Дунай, солоність, евтрофікація, забруднення, екологічна мікропалеонтологія*

*V.V. Yanko, T.O. Kondaryuk, O.G. Likhodedova, I. Motnenko*

**EVALUATING THE INFLUENCE OF RIVER DISCHARGE ON MARINE BOTTOM ECOSYSTEMS USING BENTHIC FORAMINIFERA AND LITHOLOGY FROM BOTTOM SEDIMENTS**

The first application in Europe of a study of benthic foraminifera and bottom sediment lithology in order to trace the influence of Danube freshwater discharge on the benthic ecosystems of the Black Sea Romanian shelf is being conducted within the framework of the international project BS-ERA.NET 076 «Water Pollution Prevention Options for Coastal Zones and Tourist Areas: Application to the Danube Delta Front Area», WAPCOAST (2010—2012). Fifteen species were investigated. Their quantitative characteristics and the restructuring of their assemblages was found to correlate with hydrological and geochemical parameters of the bottom water and sediments as well as grain-size data, and it enabled the identification of three main factors influencing the environmental state of bottom ecosystems. They are as follows: (1) distance from the shore and related parameters (salinity, transparency, water temperature); (2) eutrophication of the bottom water, and (3) pollution of the bottom water by organic matter discharged from the continent. Benthic foraminifera along with lithology of the bottom sediments permitted an evaluation of the degree of influence from environmental parameters on the state of bottom ecosystems, and they facilitate the tracing of the spatial distribution of Danube freshwater discharge near the sea bottom.

**Keywords:** *Black Sea, the Danube, salinity, eutrophication, pollution, environmental micropaleontology.*