



УДК 574.5:574(262.5)

С. Б. Гулин, д.б.н., зав. отделом, И. Г. Сидоров, м.н.с., Л. В. Гулина, вед. инж.

Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского Национальной академии наук Украины, Севастополь, Украина

БИОГЕННАЯ СЕДИМЕНТАЦИЯ В ЧЁРНОМ МОРЕ: РАДИОТРАССЕРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Разработан метод дифференцированной оценки скорости биогенного и литогенного осадконакопления в Чёрном море с использованием природного радионуклида калий-40. Это позволяет определить вклад биоседиментации в суммарный процесс накопления донных отложений и проследить её изменение во всем диапазоне глубин черноморского бассейна. С помощью данного метода показано, что в приустьевых зонах рек, впадающих в северо-западную часть Чёрного моря, вплоть до глубин около 20 м в биогенном материале донных отложений преобладает аллохтонное вещество, тогда как глубже кромки шельфа (> 120 м) донные осадки практически полностью образованы автохтонной взвесью. Радиотрассерные исследования, выполненные в Севастопольской бухте, позволили установить, что скорость осадконакопления имеет в ней достаточно чёткую положительную корреляцию с содержанием биогенной взвеси в поверхностном слое донных отложений. Это показывает значимость биотических процессов в переносе взвешенного вещества, а также в формировании и накоплении донных отложений бухты. Полученные данные, в сочетании с исследованием биопродукционных процессов в водной толще Чёрного моря, могут быть использованы для решения задач, связанных с оценкой способности морской среды к седиментационному самоочищению и деэвтрофикации.

Ключевые слова: Чёрное море, Севастопольская бухта, биоседиментация, радиотрассеры.

Седиментация биогенной и литогенной взвеси играет ключевую роль в самоочищении водной толщи и депонировании загрязняющих веществ в донных отложениях морских экосистем [3, 5, 11]. В зависимости от источников поступления взвеси её подразделяют на автохтонную и аллохтонную [4, 5, 11]. Первая преобладает в открытых районах моря, вторая – вблизи эстуарных зон [1]. Более сложный характер седиментационных процессов наблюдается в прибрежных районах, бухтах и других акваториях, не примыкающих к приустьевым зонам рек, но подверженных береговому стоку терригенной взвеси и отличающихся повышенной трофностью и продукцией биогенного осадочного материала [1, 8].

Дифференцированная оценка процессов седиментации и осадконакопления биогенной взвеси представляет особый интерес, поскольку её образование непосредственно связано с биологической продуктивностью морских экосистем. Кроме того, биогенная седиментация, по сравнению с литогенной, более чувствительна к изменениям климатических факторов и антропогенной нагрузки, прежде всего, эвтрофикации.

Для оценки вклада биогенной взвеси в общее количество взвешенного вещества морских водоёмов используют методы, основанные, например, на применении сканирующих электронных микроскопов [10] или различных биомаркёров [9]. Однако такие исследования являются либо полуколичественными, как в первом случае, когда производится прямой счёт биологических остатков, либо, как во втором случае, их интерпретация затруднена, поскольку с помощью биомаркёров определяется вклад только органической фракции биогенной взвеси, а её минеральная составляющая, например, карбонатные или силикатные створки кокколитофорид и диатомовых водорослей, не учитывается.

Целью данной работы было определение роли биогенного вещества в формировании и накоплении донных отложений в различных акваториях Чёрного моря. Для решения этой задачи были использованы радиотрассерные методы, которые в последние годы всё более широко применяются для типизации морских донных отложений [1, 2, 6].

Материал и методы. Для дифференцированной оценки скорости биогенного и литогенного осадконакопления в морских донных отложениях нами разработан радиотрассерный метод, основанный на измерении содержания в них природного радионуклида ^{40}K , поступающего в море главным образом в составе литогенной взвеси [1]. Установлено, что в литогенном осадочном материале Чёрного моря содержание калия близко к значению его кларка, выражающего среднее содержание данного элемента в литосфере и равного 25 гК на 1 кг, тогда как в биогенном веществе эта величина не превышает 3 гК·кг⁻¹ [1, 6]. Определив фактическое содержание калия в донных осадках, можно рассчитать относительный вклад биогенного и литогенного материалов, используя балансовое уравнение (1):

$$\text{Биогенная взвесь (\%)} = \frac{Clk_{л}K - \frac{zK}{\kappa z}}{Clk_{л}K - Clk_{б}K} \cdot 100\%,$$

где $Clk_{л}K$ и $Clk_{б}K$ – значения кларков калия в литогенном и биогенном веществе, соответственно; zK – фактическое содержание калия в исследуемой пробе, определённое по результатам радиометрических измерений активности калия-40 (см. ниже).

Исследования биогенного осадконакопления с использованием калия-40 выполнено в акватории Севастопольской бухты вдоль разреза от устья реки Чёрная до защитного мола на выходе из бухты, а также в открытой части Чёрного моря, включая приустьевые зоны рек Дунай, Днепр и Чорух. Для измерений использовали верхний 1-см слой донных отложений, отобранных с помощью акриловой грунтовой трубки с внутренним диаметром 58 мм и вакуумным затвором. После сушки и измельчения пробы помешали в пластиковые чашки Петри диаметром 53 мм и проводили измерение содержания ^{40}K по его γ -излучению с энергией 1460.8 кэВ, согласно стандартной методике [7], в высокопрецизионном гамма-детекторе ORTEC GMX-10 (США), выполненном на основе кристалла сверхчистого германия. Для определения содержания калия по активности ^{40}K использовали величину его удельной радиоактивности, равную 1 гК = 30.65 Бк ^{40}K [1, 6]. По этим данным рассчитано относительное содержания биогенного вещества в донных отложениях с использованием уравнения (1).

Результаты и обсуждение. Наибольшие значения процентного содержания биогенного вещества в донных отложениях Севастопольской бухты обнаружены в приустьевой

зоне реки Чёрная, впадающей в кутовую часть бухты, и у защитного мола на выходе из бухты (табл. 1, рис. 1). Значительно меньше содержание биогенного материала в донных отложениях центральной части бухты, где, очевидно, преобладает литогенная седиментация, обусловленная, видимо, абразией берегов в районе б. Голландия и Сухарной балки. На рис. 1 эти данные представлены в виде разреза по длине, на котором хорошо видно, что центральная часть бухты разделяет её акваторию на две зоны повышенной биогенной седиментации: в приустьевой зоне р. Чёрная и на выходе из бухты. Можно предположить, что в кутовой части бухты, подверженной речному стоку, накапливается в основном биогенная взвесь аллохтонного происхождения, а в мористой – автохтонного. Интересно, что такая же закономерность пространственного распределения аллохтонных и автохтонных осадков отмечена нами и в открытой части моря (рис. 2). Вблизи устьевых зон их содержание достигает 42 % от общей сухой массы донных отложений за счёт, очевидно, оседания терригенной взвеси биологического происхождения. Затем по мере удаления от берега эта величина снижается более чем вдвое (до ~18%, рис. 2) и потом вновь увеличивается вплоть до ~95% благодаря преимущественному осаждению минеральных и органических остатков одноклеточных водорослей, например, известковых панцирей кокколитофорид, поскольку известно, что в глубоководной зоне Чёрного моря донные отложения представлены кокколитовыми илами [1].

Полученные данные по относительному содержанию биогенного вещества в донных отложениях открытой части Чёрного моря были сопоставлены с опубликованными нами ранее результатами радиоизотопного определения скорости осадконакопления на тех же станциях в приустьевых зонах рек, на северо-западном шельфе, свале глубин и в глубоководном бассейне [2]. В результате получена количественная зависимость скорости биогенного осадконакопления от глубины дна Чёрного моря (рис. 3).

Табл. 1 Расположение станций отбора проб донных отложений, содержание ^{40}K в их верхнем 1-см слое, а также скорость общего и биогенного осадконакопления в различных акваториях Чёрного моря
Table 1 Location of the sediment sampling sites, the contents of ^{40}K in their upper 1-cm layer, and the total and biogenic sedimentation rates in different areas of the Black Sea

| Район | Координаты с.ш. / в.д. | Глубина, м | H, % | ^{40}K , гК·кг ⁻¹ | Биогенное вещество, % | SR, мм·год ⁻¹ | MAR, г·м ⁻² ·год ⁻¹ |
|------------------------------------|---------------------------|---------------|------|--|--------------------------|-----------------------------|--|
| Северо-западная часть | | | | | | | |
| Взморье Дуная | 45°12.4' 29°51.0' | 26 | 67.9 | 19.6 | 24.6 | 11.5 | <u>3994</u> 983 |
| Днепро–Бугский лиман | 46°33.0' 31°25.0' | 13 | 67.1 | 15.7 | 42.3 | 9.2 | <u>3670</u> 1552 |
| Кромка северо- западного шельфа | 44°42.2' 31°36.6' | 172 | 74.0 | 9.5 | 70.5 | – | – |
| Континентальный склон | 44°39.4' 31°46.2' | 607 | 81.6 | 8.5 | 75.0 | 2.2 | <u>138</u> 104 |
| Глубоководная зона | | | | | | | |
| Западная халистаза | 43°26.0' 32°08.8' | 1983 | 80.4 | 4.2 | 94.6 | 0.4 | <u>70</u> 66 |
| Восточная часть | | | | | | | |
| Устье р. Чорох | 41°39.7' 41°33.2' | 70 | 46.9 | 21.0 | 18.2 | 5.3 | <u>3071</u> 559 |
| Севастопольская бухта | | | | | | | |
| Инкерман | 44°36.4' 33°36.0' | 4 | 66.1 | 17.9 | 32.4 | 9.3 | <u>7094</u> 2298 |
| Голландия | 44°37.3' 33°33.7' | 15 | 71.8 | 22.4 | 11.6 | 3.3 | <u>1727</u> 200 |
| Павловский мыс | 44°37.1' 33°32.1' | 15 | 60.1 | 20.1 | 18.2 | 2.4 | <u>607</u> 110 |
| Константиновский равелин | 44°37.5' 33°31.3' | 13 | 57.1 | 14.7 | 46.8 | 4.6 | <u>3253</u> 1521 |
| Внешний рейд Се- вастополя | 44°37.1' 33°28.9' | 22 | 50.2 | 9.0 | 72.6 | 2.3 | <u>664</u> 482 |

Примечания: H – относительная влажность верхнего слоя донных отложений, характеризующая их пористость; SR – скорость седиментации; MAR – скорость осадконакопления; в числителе последней колонки даны величины скорости осадконакопления суммарной взвеси, в знаменателе – биогенного вещества; 1 гК = 30.65 Бк ^{40}K

Notes: H – porosity of the upper sediment layer; SR – sedimentation rate; MAR – sediment accumulation rate; the numerator in the last column shows the value of sedimentation rate for the total suspended matter, the denominator – for the biogenic matter; 1 gK = 30.65 Bq ^{40}K

В приустьевых зонах и на шельфе скорость осадконакопления биогенного материала, в котором, очевидно, преобладает аллохтонная взвесь, в 10 – 20 раз выше, чем в глубоководном участке, где превалируют автохтонные осадки. Данная зависимость с очень высокой степенью достоверности (коэффициент детерминации $R^2 = 0.997$) аппроксимируется двухэкспоненциальным уравнением:

$$MAR_B = 2278.47 \cdot e^{-0.0708m} + 669.07 \cdot e^{-0.0030m}, \quad (2)$$

где: MAR_B – скорость осадконакопления суммарного (аллохтонного и автохтонного) биогенного вещества ($г \cdot м^{-2} \cdot год^{-1}$); m – глубина дна, в метрах.

Наличие не менее двух экспонент в аппроксимирующей зависимости (2) может быть дополнительным свидетельством существования разных источников происхождения биогенной взвеси в донных отложениях открытой части моря: аллохтонного (терригенного) и автохтонного.

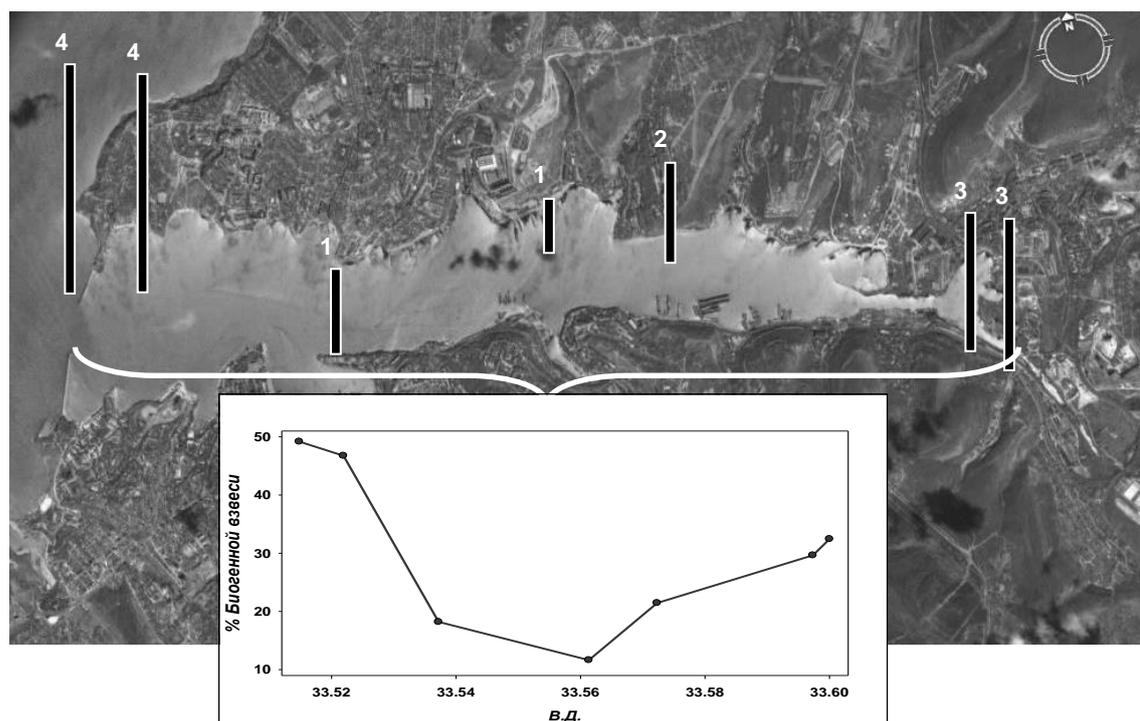


Рис. 1 Относительное содержание биогенного вещества в донных отложениях Севастопольской бухты (в % от их общей сухой массы), определённое по ^{40}K . На нижней вставке эти величины представлены в виде разреза по долготе.

Fig. 1 ^{40}K -derived percentage of biogenic matter in the bottom sediments of Sevastopol Bay (in % of their total dry weight). The lower inset shows these values as a longitudinal transect.

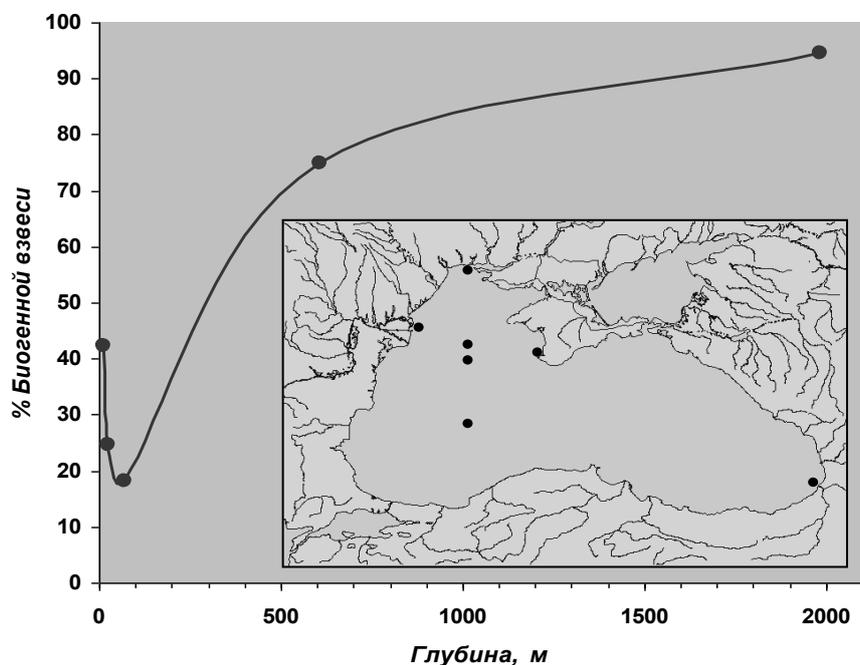


Рис. 2 Относительное содержание биогенной взвеси (%) в донных отложениях Чёрного моря, определённое по ^{40}K . Точками на карте показано расположение станций отбора проб

Fig. 2 ^{40}K -derived percentage of biogenic matter (%) in the Black Sea sediments. The closed circles in the map show the location of the sampling sites

Исходя из уравнения (2), можно ориентировочно определить, что на минимальных глубинах в прибрежной зоне вклад этих источников в образование суммарной массы донных

осадков соотносится примерно как 3:1 (2278.47 : 669.04, при $m \rightarrow 0$), на глубине около 20 м соотношение алло- и автохтонного биогенного вещества становится примерно равным, а уже

на 120 м (т.е. на кромке шельфа) и глубже аллохтонная взвесь практически отсутствует, со-

ставляя менее 0.1 % от общей массы биогенного осадочного материала

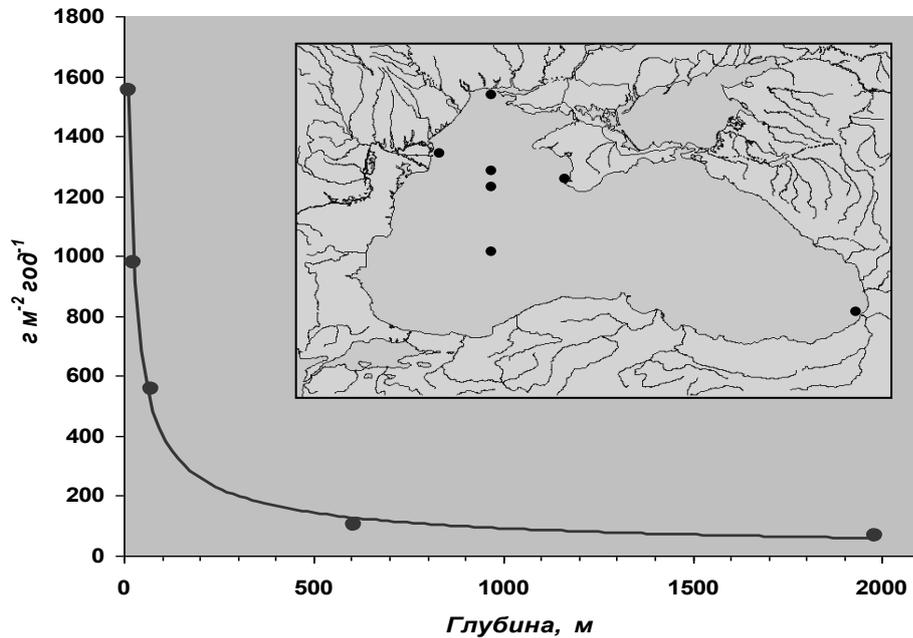


Рис. 3 Скорость биогенного осадконакопления на разных глубинах Чёрного моря. Точками на карте показано расположение станций отбора проб

Fig. 3 Sediment accumulation rate at different depths of the Black Sea. The closed circles in the map show the location of the sampling sites

Сопоставление рассмотренных выше данных по процентному содержанию биогенной взвеси в донных отложениях Севастопольской бухты (табл. 1, рис. 1) и измеренной ранее

скорости осадконакопления [11] показало наличие между ними достаточно чёткой положительной корреляции (рис. 4).

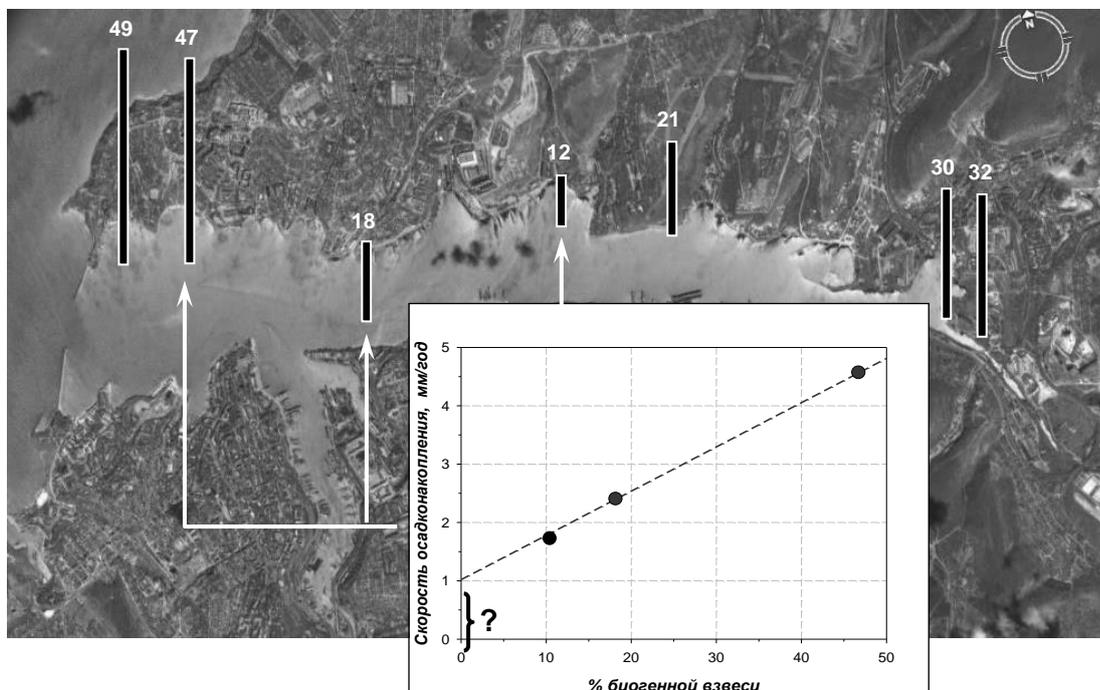


Рис. 4 Содержание биогенной взвеси (%) и скорость осадконакопления ($mm\cdot год^{-1}$) в донных отложениях Севастопольской бухты

Fig. 4 Contents of biogenic matter (%) and sedimentation rate ($mm\cdot yr^{-1}$) in the bottom sediments of Sevastopol Bay

При экстраполяции этой прямолинейной зависимости в область нулевых значений содержания биогенного материала в донных отложениях можно оценить вероятную скорость осадконакопления в бухте, если бы оно осуществлялось только за счёт литогенной взвеси. В нашем случае эта величина составила около $1 \text{ мм} \cdot \text{год}^{-1}$ (рис. 4), т.е. примерно 50 % от фактической скорости накопления донных отложений в центральной части бухты и только 20 % от скорости осадконакопления, измеренной вблизи заградительного мола на выходе из неё (рис. 4). Такое соотношение скорости биогенного и литогенного осадконакопления показывает высокую значимость биотических процессов в переносе взвешенного вещества, в накоплении донных отложений Севастопольской бухты и, соответственно, в депонировании (иммобилизации) связанных с оседающей взвесью биогенных элементов и загрязняющих веществ.

Выводы. 1. Разработан метод дифференцированной оценки скорости биогенного и литогенного осадконакопления в Чёрном море с использованием природного радионуклида калий-40. Это позволяет определить вклад биоседиментации в суммарный процесс накопле-

ния донных осадков, проследить её изменение во всем диапазоне глубин черноморского бассейна, а также выявить зоны преимущественного осаждения аллохтонной и автохтонной взвеси. **2.** С помощью данного метода показано, что в приустьевых зонах рек, впадающих в северо-западную часть Чёрного моря, вплоть до глубин около 20 м в биогенном материале донных отложений преобладает аллохтонное вещество, тогда как глубже кромки шельфа ($> 120 \text{ м}$), донные осадки практически полностью образованы автохтонной взвесью. **3.** Исследования в Севастопольской бухте показали, что скорость осадконакопления имеет достаточно чёткую положительную корреляцию с содержанием биогенной взвеси в поверхностном слое донных отложений. Это свидетельствует о значительной роли биотических процессов в переносе взвешенного вещества, а также в формировании и накоплении донных отложений бухты. **4.** Полученные данные, в сочетании с интенсивностью биопродукционных процессов в водной толще Чёрного моря, могут быть использованы для решения задач, связанных с оценкой способности морской среды к седиментационному самоочищению и деэвтрофикации.

1. Гавшин В. М., Лапухов С. В., Сараев С. В. Геохимия литогенеза в условиях сероводородного загрязнения (Чёрное море). – Новосибирск: Наука, 1988. – 194 с.
2. Гулин С. Б., Егоров В. Н., Стокозов Н. А., Мирзоева Н. Ю. Определение возраста донных отложений и оценка скорости осадконакопления в прибрежных и глубоководных акваториях Чёрного моря с использованием природных и антропогенных радионуклидов // В кн.: Радиэкологический отклик Чёрного моря на чернобыльскую аварию / Под ред. Г.Г. Поликарпова и В.Н. Егорова. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. – С. 499 – 518.
3. Поликарпов Г. Г., Зесенко А. Я., Егоров В. Н., Назаров А. Б. Применение радиоизотопных методов в исследовании продукционных процессов и динамики органического вещества в океане // Морские гидрофизические исследования. – 1976. – **74**, № 3. – С. 116 – 124.
4. Самышев Э. З. Взвешенное органическое вещество как показатель трофности и продукционности деструкционных процессов (концептуальный обзор) // Системы контроля окружающей среды. Средства, информационные технологии и мониторинг: Сб. науч. тр. - № 13. / НАН Украины. Севастополь: МГИ, 2010. – С. 220 – 224.
5. Degens E. T., Honjo S., Izdar E. Particle Flux in the Ocean. Introductory Remarks // Proc. SCOPE/UNEP workshop "Particle Flux in the Ocean". – Izmir (Turkey) / Eds. E.T. Degens, E. Izdar, S. Honjo. – Hamburg: Hamburg University, 1987. – P. XI – XII.
6. Gulin S. B., Polikarpov G. G., Egorov V. N. et al. Radioactive contamination of the north-western Black Sea sediments // Estuarine, Coastal and Shelf Science. – 2001. – **54**, № 3. – P. 541 – 549.
7. Holm E. Assessment of gamma, beta and alpha-particle-emitting nuclides in marine samples // Strategies and Methodologies for Applied Marine Radioactivity Studies (Training Course Series №7). – Vienna: IAEA, 1997. – P. 237 – 261.
8. Kempe S. Estuaries – their natural and anthropogenic changes // Scales and Global Change / Eds. T. Ross-

- wall, R.G. Woodmansee, P.G. Risser. – Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE). – Hamburg: John Wiley & Sons Ltd., 1988. – P. 251 – 285.
9. Michaelis W., Schumann P., Ittekkot V., Konuk T. Sterol markers for organic matter fluxes in the Black Sea // Proc. SCOPE/UNEP workshop “Particle Flux in the Ocean”. – Izmir (Turkey) / Eds. E.T. Degens, E. Izdar, S. Honjo. – Hamburg: Hamburg University. – 1987. – P. 89 – 98.
10. Tambiev S.B. New data on the constituents and chemical composition of the suspended and freely sinking particulate matter at a Southern Black Sea sediment trap station // Proc. SCOPE/UNEP workshop “Particle Flux in the Ocean”. – Izmir (Turkey) / Eds. E.T. Degens, E. Izdar, S. Honjo. – Hamburg: Hamburg University. – 1987. – P. 55 – 76.
11. U.S. GOFs. Sediment trap technology and sampling // U.S. Global Ocean Flux Study. Planning Report №10 of the Working Group on Sediment Trap Technology and Sampling / Eds. G. Knauer, V. Asper. – Woods Hole (USA): WHOI, 1989. – 94 p.

Поступила 25 сентября 2012 г.

Биогенна седиментація в Чорному морі: радіотрасерне дослідження. С. Б. Гулін, І. Г. Сідоров, Л. В. Гуліна. Розроблено метод диференційованої оцінки швидкості біогенного і літогенного опадонакопичення в Чорному морі з використанням природного радіонукліда калій-40. Це дозволяє визначити внесок біоседиментації в сумарний процес накопичення донних опадів і простежити його зміну в усьому діапазоні глибин чорноморського басейну. За допомогою даного методу показано, що в пригирлових зонах річок, що впадають в північно-західну частину Чорного моря, аж до глибин близько 20 м, в біогенному матеріалі донних відкладень переважає аллохтонна речовина, тоді як глибше кромки шельфу (> 120 м), донні опади практично повністю утворені автохтонною зваженою речовиною. Дослідження, виконані в Севастопольській бухті, показали, що швидкість опадонакопичення має досить чітку позитивну кореляцію з вмістом біогенної суспензії в поверхневому шарі донних відкладень. Це показує значущість біотичних процесів в перенесенні зваженої речовини, а також у формуванні і накопиченні донних відкладень Севастопольської бухти. Отримані дані, в поєднанні з дослідженням біопродукційних процесів у водній товщі Чорного моря, можуть бути використані для вирішення завдань, пов'язаних з оцінкою здатності морського середовища до седиментаційного самоочищення і деєвтрофікації.

Ключові слова: Чорне море, Севастопольська бухта, біоседиментація, радіотрасери.

Biogenic sedimentation in the Black Sea: radiotracer-derived study. S. B. Gulina, I. G. Sidorov, L. V. Gulina. Method for differentiated assessment of the rate of biogenic and lithogenic sedimentation in the Black Sea using the naturally occurring radionuclide potassium-40 has been developed. This allows evaluation the contribution of biosedimentation to the total process of the sediment accumulation within the entire range of the Black Sea depths. Based upon this method, it was shown that near the estuarine zones of rivers entering the north-western Black Sea, down to 20 m of a water depth, the allochthonous material prevails in the seabed sediments, whereas deeper than the shelf edge (> 120 m) the sediments consist almost completely of autochthonous suspended matter. The studies performed in Sevastopol Bay have showed that sediment accumulation rate is positively correlated with the percentage of biogenic matter in the upper sediment layer. This suggests the significance of biotic processes in transfer of suspended matter, as well as in the forming and accumulation of sediments in Sevastopol Bay. The obtained data, in combination with study of bioproduction processes in the Black Sea water column, may be applied for purposes related to evaluation of the capability of marine environments for self-purification and de-eutrophication governed by sedimentation.

Keywords: Black Sea, Sevastopol Bay, biosedimentation, radiotracers.