

УДК (574.5:579.68(262.5))

Г. Г. Тропівська<sup>1</sup>, Ю. І. Богатова<sup>1</sup>, І. К. Курдиш<sup>2</sup>

**ВПЛИВ ГІДРОХІМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ НА  
ПОШИРЕННЯ ФОСФАТМОБІЛІЗУВАЛЬНИХ  
БАКТЕРІЙ У ДОННИХ ВІДКЛАДАХ ОДЕСЬКОГО  
РЕГІОНУ ПІВНІЧНО-ЗАХІДНОЇ ЧАСТИНИ  
ЧОРНОГО МОРЯ**

Проаналізовано просторовий та сезонний розподіл гетеротрофних та фосфатмобілізувальних бактерій у донних відкладах Одеського регіону північно-західної частини Чорного моря в 2009—2012 рр. Встановлено, що чисельність гетеротрофних та фосфатмобілізувальних бактерій у донних відкладах перевищує значення у водній товщі у кілька разів, а концентрація сполук фосфору у порових розчинах — на порядок величин. Максимальні показники вмісту гетеротрофних та фосфатмобілізувальних бактерій у поверхневому шарі донних відкладів виявлені у прибережній зоні Одеської затоки та місцях найбільшого антропогенного навантаження. Чисельність гетеротрофних та фосфатмобілізувальних бактерій у донних відкладах знаходиться у тісному зв'язку з гідрохімічними показниками середовища.

***Ключові слова:** фосфатмобілізувальні бактерії, гетеротрофні бактерії, гідрохімічні показники, сполуки фосфору, донні відклади, Одеський регіон.*

У водних екосистемах донні відклади є показником процесів, які відбуваються у водній товщі. Донні відклади формуються внаслідок осідання на дно водойми твердих часток автохтонного та алохтонного генезису [1]. Найбільш важливими процесами, які відбуваються у донних відкладах і впливають на стан екосистеми, є процеси розкладу органічної речовини та надходження біогенних речовин у водну товщу [1, 2]. Донні відклади є важливою ланкою кругообігу фосфору, так як за певних умов можуть слугувати джерелом фосфору, створюючи таким чином внутрішнє фосфорне навантаження на водойму [5].

Невід'ємним компонентом у балансі біогенних речовин водних екосистем є порові розчини донних відкладів (вода, яка заповнює інтерстиційний простір цих відкладів) [5, 12]. Фосфоровмісні неорганічні та органічні сполуки в осадах водних екосистем можуть бути трансформовані під дією фосфатмобілізувальних бактерій у форму ортофосфату (внаслідок вуглеводного метаболізму та вивільнення органічних кислот або ферментативно), який є доступною формою для споживання гідробіонтами [10]. Ці мікроорганізми є

© Г. Г. Тропівська, Ю. І. Богатова, І. К. Курдиш, 2018

опосередкованими показниками процесів трансформації органічної речовини і біогенних сполук, а саме — фосфору.

Одеський регіон північно-західної частини Чорного моря (ПЗЧМ) — прибережна акваторія до ізобати 20 м. На якість вод Одеського регіону впливає річковий стік Дніпра та Південного Бугу, з якими потрапляє велика кількість біогенних речовин, а також стічні води промислової, портової і житлової зони міста Одеси і її міст-супутників — Чорноморська та Південного [11].

Дослідження фосфатмобілізувальних бактерій та впливу факторів навколишнього середовища на їхню чисельність у донних відкладах Одеського регіону ПЗЧМ раніше не проводились. Тому метою роботи було оцінити вплив гідрохімічних показників на закономірності розподілу гетеротрофних і фосфатмобілізувальних бактерій у донних відкладах Одеського регіону ПЗЧМ.

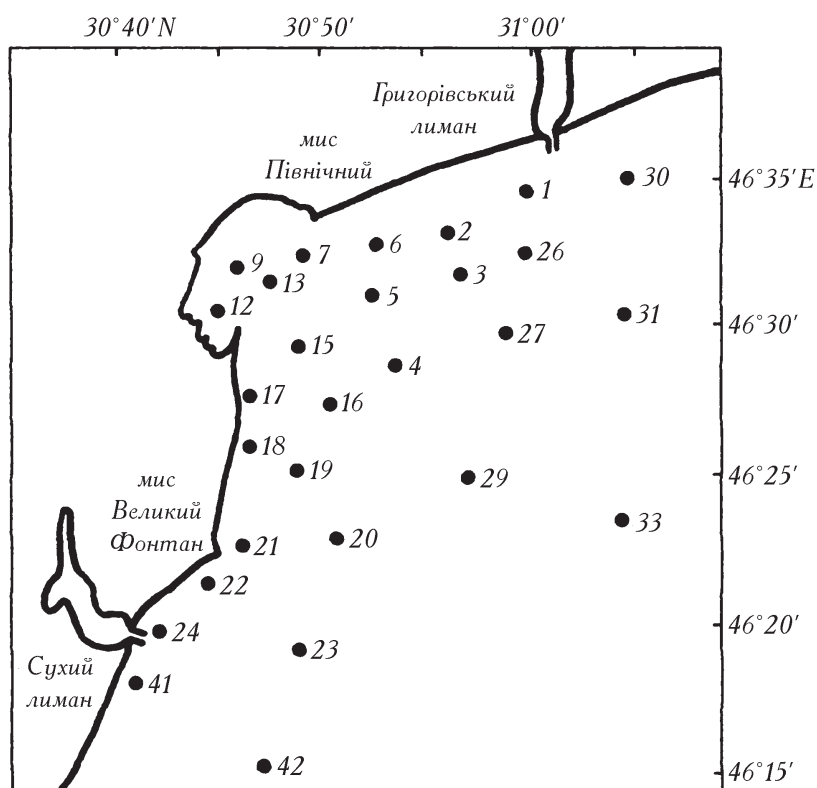
**Матеріал і методика досліджень.** У роботі представлені результати досліджень гідрохімічних показників порових розчинів донних відкладів та розподілу гетеротрофних і фосфатмобілізувальних бактерій у донних відкладах Одеського регіону, які проводили в липні та жовтні 2009, липні 2011 і вересні 2012 рр. Проби відбирали у поверхневому шарі донних відкладів дночерпачем Петерсена з площею захоплення 0,1 м<sup>2</sup>, за стандартною схемою станцій (рис. 1). Для аналізу донних відкладів відбирали верхній (до 10 см) шар осаду. Поровий розчин отримували вакуумною фільтрацією донних відкладів через подвійний фільтр «синя стрічка».

Всього зібрано та оброблено для визначення гідрохімічних і мікробіологічних показників по 74 проби донних відкладів. Донні відклади регіону були представлені сірими і чорними мулами, замуленими пісками і пісками з домішками ракушняку.

Визначення аналізованих гідрохімічних параметрів: вмісту розчиненого ортофосфату ( $P_{\text{МІН}}$ ), органічних форм фосфору ( $P_{\text{ОРГ}}$ ) та їх суму — валовий фосфор ( $P_{\text{ВАЛ}}$ ), вмісту розчиненої органічної речовини ( $POP$ ) проводили стандартними, прийнятими у міжнародній практиці методами [9].

Чисельність бактерій, які мобілізують фосфат з важкорозчинних сполук фосфору (ФР бактерії), визначали за утворенням зон розчинення ортофосфату кальцію після посівів певних об'ємів суспензій донних відкладів на селективне поживне середовище Муромцева [7, 8]. Чисельність бактерій, які здатні мінералізувати органічні сполуки фосфору (ФМ бактерії), визначали на агаризованому середовищі Менкіної [6]. Кількість гетеротрофних бактерій визначали за загальною чисельністю колоній на чашках Петрі на середовищі Горбенко [3]. Посіви інкубували при температурі 28°C протягом 3—5 діб.

Статистичну обробку отриманих даних здійснювали в пакеті MS Office — Microsoft Excel. Достовірність відмінностей оцінювали за допомогою критерія Стюдента для незалежних змінних (*t-test*).



1. Схема станцій відбору проб у Одеському регіоні ПЗЧМ.

### Результати дослідження та їх обговорення

Аналіз гідрохімічних показників порових розчинів донних відкладів Одеського регіону за 2009—2012 рр. показав їхню значну сезонну та просторову змінність: концентрація  $P_{\text{МІН}}$  коливалась від 0,89 до 3,05 мг·дм<sup>-3</sup>,  $P_{\text{ОРГ}}$  — 0,59—2,23 мг·дм<sup>-3</sup>,  $P_{\text{ОР}}$  — від 12,38 до 31,10 мгО·дм<sup>-3</sup>. Влітку, коли відмічали розвиток продукційних процесів, у порових розчинах сполуки фосфору були представлені, загалом,  $P_{\text{ОРГ}}$ , а восени, при посиленні деструкційних процесів —  $P_{\text{МІН}}$  (табл. 1). Виключенням був липень 2009 р., коли концентрації  $P_{\text{МІН}}$  та  $P_{\text{ОРГ}}$  в порових розчинах були близькими за значеннями, що пов'язано з недостатньою мінералізацією великої кількості  $P_{\text{ОР}}$ . Розчинена органічна речовина, яка утворюється внаслідок прижиттєвих виділень планктону, є показником продукційних процесів у водній товщі. На акумуляцію  $P_{\text{ОР}}$  у порових розчинах впливає тип донних відкладів — найбільш висока інтенсивність акумуляції властива замуленим донним відкладам [4].

Аналіз чисельності морських гетеротрофних і фосфатмобілізувальних бактерій у донних відкладах Одеського регіону ПЗЧМ виявив їхню значну сезонну та просторову варіабельність. За період дослідження кількість гетеротрофних бактерій у донних відкладах варіювала від 1,0 до 173,0 тис.

### 1. Середні значення гідрохімічних показників у поровій воді донних відкладів Одеського регіону у 2009—2012 рр.

Періоди досліджень	POP, мг O <sub>2</sub> ·дм <sup>-3</sup>	Вміст фосфору, мг·дм <sup>-3</sup>	
		P <sub>мін</sub>	P <sub>орг</sub>
Липень 2009 р.	31,10 ± 7,32	1,00 ± 0,32	0,83 ± 0,27
Жовтень 2009 р.	17,17 ± 2,30	3,05 ± 0,56	1,16 ± 0,64
Липень 2011 р.	12,38 ± 1,62	0,89 ± 0,21	2,23 ± 0,65
Вересень 2012 р.	15,09 ± 1,5	3,04 ± 1,92	0,59 ± 0,19

КУО·г<sup>-1</sup>, в середньому становила 21,9 ± 5,4 тис. КУО·г<sup>-1</sup>. Чисельність фосфатрозчинюючих бактерій в донних відкладах коливалась у межах 0,1—25,0 тис. КУО·г<sup>-1</sup>, в середньому — 5,1 ± 1,0 тис. КУО·г<sup>-1</sup>. Кількість фосфатмінералізуючих бактерій у донних відкладах змінювалась від 0,1 до 45,0 тис. КУО·г<sup>-1</sup>, в середньому за період спостереження — 7,0 ± 0,8 тис. КУО·г<sup>-1</sup> (табл. 2).

У поверхневому горизонті донних відкладів частка фосфатрозчинюючих бактерій від числа гетеротрофних бактерій складала 27%, фосфатмінералізуючих — 32%. З літературних джерел відомо, що у донних відкладах різного походження частка бактерій, які розчинюють фосфат кальцію, є меншою порівняно з бактеріями, які мінералізують органічні сполуки фосфору [13, 14, 15].

Чисельність бактерій характеризувалась сезонною неоднорідністю (див. табл. 2). Кількість фосфатмобілізуючих бактерій у морському середовищі змінювалась за сезонами протягом року та залежала від погодних умов. Максимальний розвиток бактерій спостерігався влітку, коли в екосистемі накопичувалась найбільша кількість органічної речовини автохтонного чи алохтонного походження. Максимальна чисельність гетеротрофних та ФМ бактерій у донних відкладах спостерігалась у липні 2011 р., відповідно, 38,2 ± 11,7 та 7,8 ± 2,8 тис. КУО·г<sup>-1</sup>. Найбільша ж чисельність ФР бактерій у донних відкладах спостерігалась у 2009 р. — у липні (6,7 ± 2,8 тис. КУО·г<sup>-1</sup>) та жовтні (5,8 ± 1,4 тис. КУО·г<sup>-1</sup>).

Просторова неоднорідність чисельності бактерій пов'язана з наявністю місцевих антропогенних джерел забруднення (комунально-побутових, зливових, дренажних та промислових стоків міст-портів Одеси, Південного, Чорноморська). Тому, такі характеристики як кількість бактерій та вміст сполук фосфору обчислювали окремо для прибережної акваторії (до ізобати 10 м), яка знаходиться під антропогенним навантаженням, та відкритої частини моря (з глибинами 10—25 м). Встановлено, що чисельність бактерій у донних відкладах у прибережному та морському регіоні достовірно відрізнялись (рис. 2, а, б). Донні відклади прибережного району та відкритої акваторії моря достовірно відрізнялись за чисельністю гетеротрофних бактерій у жовтні 2009 р. ( $p = 0,0241$ ), а у вересні 2012 р. відмічено достовірну різницю тільки для ФМ бактерій ( $p = 0,0206$ ). Концентрації сполук фосфору в поро-

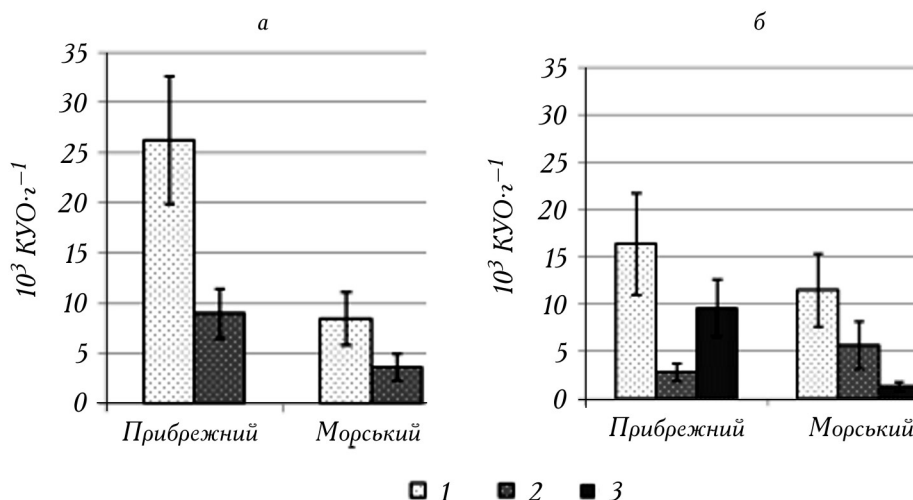
**2. Діапазон і середні значення чисельності бактерій у донних відкладах Одеського регіону у 2009—2012 рр.**

Періоди досліджень	Чисельність бактерій, $10^3$ КУО·г <sup>-1</sup>		
	гетеротрофних	фосфатрозчинюючих	фосфатмінералізуючих
Липень 2009 р.	2,4 – 115,0 $19,1 \pm 10,0$	0,2 – 25,0 $6,7 \pm 2,8$	—
Жовтень 2009 р.	1,0 – 60,0 $15,8 \pm 3,5$	0,3 – 25,0 $5,8 \pm 1,4$	—
Липень 2011 р.	1,0 – 173,0 $38,2 \pm 11,7$	0,1 – 20,0 $4,2 \pm 1,3$	0,1 – 45,0 $7,8 \pm 2,8$
Вересень 2012 р.	2,5 – 63,3 $14,5 \pm 3,6$	0,5 – 19,0 $3,8 \pm 1,1$	0,3 – 36,8 $6,2 \pm 2,1$

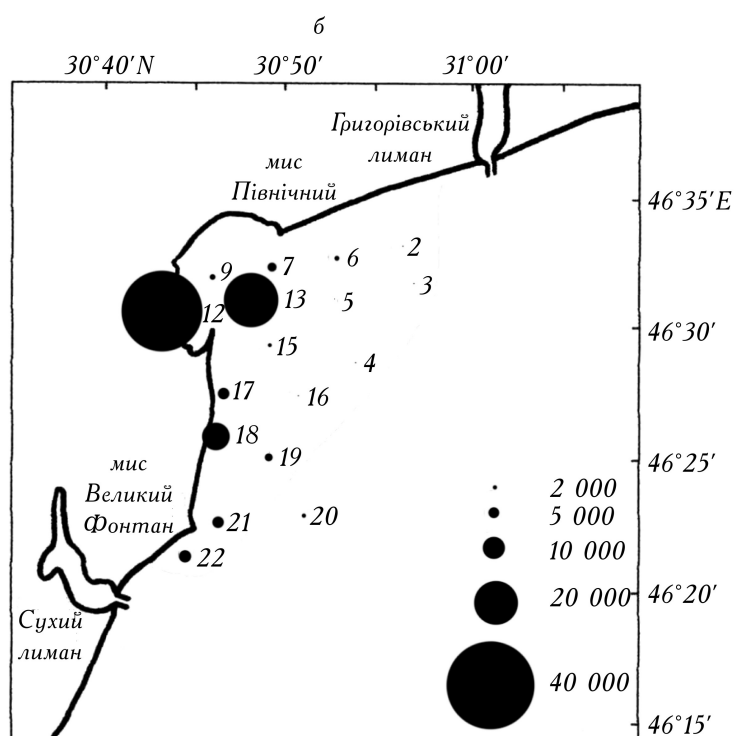
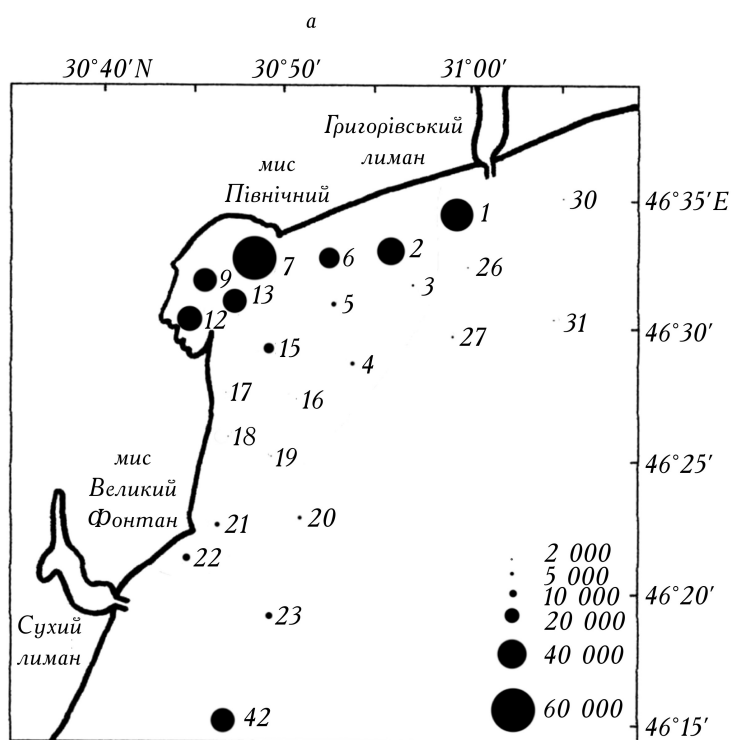
П р и м і т к а. Над рисою — діапазон показників, під рисою — середнє значення; «—» — не досліджували.

вих розчинах донних відкладів прибережного району та відкритої акваторії моря достовірно не відрізнялись.

По мірі віддалення від прибережних ділянок до відкритої акваторії Одеського регіону чисельність бактерій у донних відкладах знижувалась від десятків тисяч до тисяч одиниць в 1 г (рис. 3, а, б). Максимальні величини чисельності гетеротрофних та фосфатмобілізувальних бактерій у поверхневому шарі донних відкладів виявлені переважно у прибережній зоні Одеської затоки та в акваторії порту.



2. Чисельність бактерій ( $10^3$  КУО·г<sup>-1</sup>) у донних відкладах Одеського регіону у жовтні 2009 (а) та вересні 2012 р. (б): 1 — гетеротрофні бактерії; 2 — ФР бактерії; 3 — ФМ бактерії.



3. Чисельність (КУО·г<sup>-1</sup>) гетеротрофних (а — жовтень, 2009 р.) та ФМ бактерій (б — вересень, 2012 р.) у донних відкладах.

### 3. Кореляція гідрохімічних параметрів з чисельністю бактерій у донних відкладах Одеського регіону ПЗЧМ у 2009—2012 рр.

Періоди досліджень	Кількість станцій	Параметри	Коефіцієнти кореляції		
			гетеротрофні бактерії	ФР бактерії	ФМ бактерії
Липень 2009 р.	11	$P_{\text{МІН}}$	—	0,723**	НД
Жовтень 2009 р.	23	$P_{\text{ОР}}$	—	-0,518**	НД
Вересень 2012 р.	19	$P_{\text{ОРГ}}$	0,395*	—	0,471**
		$P_{\text{ОР}}$	-0,460**	—	-0,468**

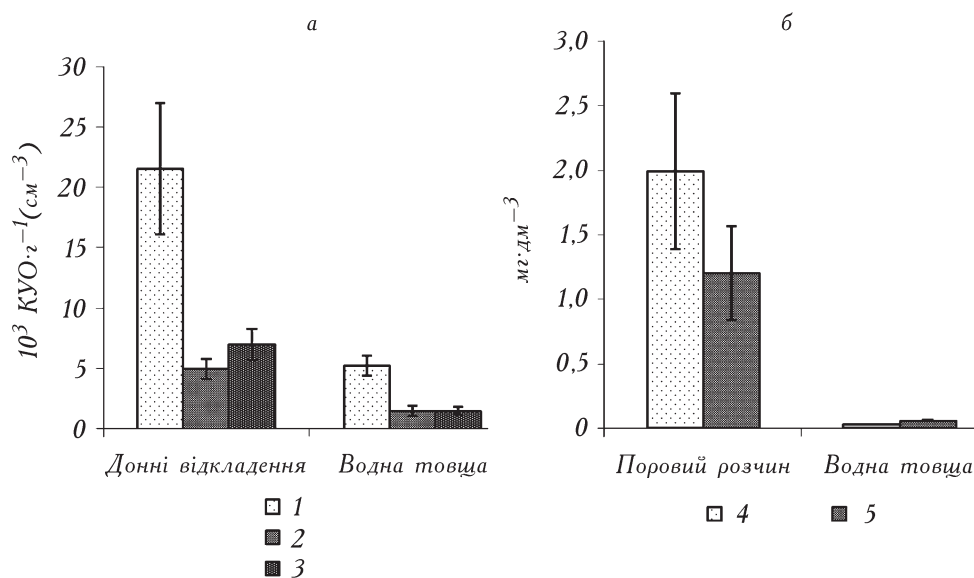
П р и м і т к а. НД — немає даних; «—» — не виявлений достовірний кореляційний зв'язок; \* рівень значущості  $p < 0,1$ ; \*\*  $p < 0,05$ ; \*\*\*  $p < 0,01$ .

З метою виявлення впливу екологічних факторів середовища на кількісні показники бактерій у донних відкладах (порових розчинах донних відкладів) були проаналізовані кореляційні зв'язки між чисельністю бактерій та гідрохімічними показниками середовища (розчиненою органічною речовиною та концентрацією  $P_{\text{МІН}}$ ,  $P_{\text{ОРГ}}$  та  $P_{\text{ВАЛ}}$ ) (табл. 3).

У донних відкладах відмічені достовірні кореляційні зв'язки між чисельністю бактерій та  $P_{\text{МІН}}$ ,  $P_{\text{ОРГ}}$ . Було встановлено, що чисельність ФР бактерій у донних відкладах збільшувалась зі зростанням вмісту  $P_{\text{МІН}}$  ( $r = 0,723$ ,  $p < 0,05$ ) (липень 2009 р.), що підтверджує здатність ФР бактерій в умовах лімітування ортофосфату мобілізувати фосфор з важкорозчинних неорганічних сполук. У вересні 2012 р. зростання чисельності гетеротрофних та ФМ бактерій призводило до збільшення вмісту  $P_{\text{ОРГ}}$  (відповідно  $r = 0,395$ ,  $p < 0,1$  та  $r = 0,471$ ,  $p < 0,05$ ). Позитивна кореляція між чисельністю бактерій та  $P_{\text{ОРГ}}$  вказує на переважання продукційних процесів над деструкційними (температура придонного шару води була досить високою —  $17,12^{\circ}\text{C}$ ).

У жовтні 2009 р. було виявлено негативний кореляційний зв'язок між  $P_{\text{ОР}}$  та чисельністю ФР бактерій ( $r = -0,518$ ,  $p < 0,05$ ), а у вересні 2012 р. — між  $P_{\text{ОР}}$  та гетеротрофними і ФМ бактеріями (відповідно  $r = -0,460$ ;  $r = -0,468$ ,  $p < 0,05$ ). Це свідчить, що бактерії є активними споживачами та деструкторами органічної речовини.

Аналіз даних щодо вмісту сполук фосфору і чисельності бактерій у донних відкладах, їхніх порових розчинах та у водній товщі за аналогічний період показав, що чисельність бактерій у донних відкладах перевищує значення у водній товщі у 2—3 рази, а вміст сполук фосфору у порових розчинах — на порядок величин (рис. 4). Це пов'язано із сезонним розвитком продукційно-деструкційних процесів в екосистемі і накопиченням алохтонної та автохтонної органічної речовини у донних відкладах, а також із гідрологічними умовами регіону — створенням сезонного (весна-літо) пікнокліну і згінно-нагінними явищами та розвитком придонної гіпоксії [11].



4. Порівняння чисельності бактерій у донних відкладах ( $10^3 \text{ КУО} \cdot \text{г}^{-1}$ ) та у водній товщі ( $10^3 \text{ КУО} \cdot \text{см}^{-3}$ ) (а) і вмісту сполук фосфору ( $\text{мг} \cdot \text{дм}^{-3}$ ) у порових розчинах донних відкладів та у водній товщі (б) в Одеському регіоні у 2009—2012 рр.: 1 — гетеротрофні бактерії; 2 — ФР бактерії; 3 — ФМ бактерії; 4 —  $P_{\text{мін}}$ ; 5 —  $P_{\text{орг}}$ .

### Висновки

Донні відклади Одеського регіону, які накопичують значну кількість органічної речовини, характеризуються сезонною неоднорідністю в розподілі чисельності гетеротрофних і фосфатмобілізувальних бактерій.

Максимальні величини чисельності гетеротрофних та фосфатмобілізувальних бактерій у поверхневому шарі донних відкладів виявлені у прибережній зоні Одеської затоки та місцях найбільшого антропогенного навантаження.

Встановлено, що чисельність гетеротрофних та фосфатмобілізувальних бактерій у донних відкладах знаходиться у тісному зв'язку з гідрохімічними показниками у порових розчинах. Восени виявлено негативний кореляційний зв'язок між розчиненою органічною речовиною та чисельністю бактерій. Величина та направленість кореляційного зв'язку між сполуками фосфору та кількістю бактерій відрізнялась для кожної групи бактерій.

Показано, що чисельність гетеротрофних та фосфатмобілізувальних бактерій у донних відкладах перевищує значення у водній товщі у кілька разів, а вміст сполук фосфору у порових розчинах — на порядок величин.

\*\*

*Проанализировано пространственное и сезонное распределение гетеротрофных и фосфатмобилизующих бактерий в донных отложениях Одесского региона северо-западной части Черного моря в 2009—2012 гг. Установлено, что численность ге-*



гетеротрофных и фосфатмобилизирующих бактерий в донных отложениях превышает значения в водной толще в несколько раз, а концентрация соединений фосфора в поровых растворах — на порядок величин. Максимальные показатели содержания гетеротрофных и фосфатмобилизирующих бактерий в поверхностном слое донных отложений отмечены в прибрежной зоне Одесского залива и местах наибольшей антропогенной нагрузки. Численность гетеротрофных и фосфатмобилизирующих бактерий в донных отложениях находится в тесной связи с гидрохимическими показателями среды.

\*\*

*The spatial and seasonal distribution of heterotrophic and phosphate-mobilizing bacteria in the bottom sediments of the Odessa region of north-western part of the Black Sea in 2009—2012 has been analyzed. It was found that the number of heterotrophic and phosphate-mobilizing bacteria in bottom sediments exceed the values in the water column in several times, and the concentration of phosphorus in the pore solutions — by one order. Maximum quantity of heterotrophic and phosphate-mobilizing bacteria in the surface layer of sediments was found in the coastal zone of the Odessa Bay and the areas with the largest anthropogenic load. The number of heterotrophic and phosphate-mobilizing bacteria in the bottom sediments is closely related to hydrochemical indicators of the environment.*

\*\*

1. Белкина Н. А. Роль донных отложений в процессах трансформации органического вещества и биогенных элементов в озерных системах. Водные проблемы Севера и пути их решения // Тр. Карел. науч. центра РАН. — 2011. — № 4. — С. 35—41.
2. Белкина Н. А., Сангман О., Игнатъева Н. В. Распределение форм фосфора в донных отложениях как показатель эвтрофирования экосистемы большого водоема (на примере Ладожского и Онежского озер) // Экол. химия. — 2006. — Т. 15. — С. 174—185.
3. Горбенко Ю. А. Экология морских организмов перифитона. — Киев: Наук. думка, 1977. — 252 с.
4. Дегтярева Л. В. Сезонная динамика содержания органического углерода в донных отложениях западной части Северного Каспия // Изв. Самар. науч. центра РАН. — 2013. — Т. 15, № 3. — С. 484—488.
5. Мартынова М. В. Донные отложения и эвтрофирование водоемов // Антропогенное эвтрофирование природных вод: Материалы Третьего всесоюз. симп., Москва, сентябрь 1983. — Черноголовка, 1985. — С. 118—128.
6. Менкина Р. А. Бактерии, минерализующие органические соединения фосфора // Микробиология. — 1950. — Т. 19, № 4. — С. 308—315.
7. Методические указания по выделению микроорганизмов, растворяющих труднодоступные минеральные и органические соединения фосфора. — Л.: Всесоюз. науч.-исслед. ин-т с/х микробиологии, 1981. — 19 с.
8. Муромцев Г. С. К вопросу об использовании воднонерастворимых фосфатов почвенными микробами. — Доклады ВАСХНИЛ, 1955. — Вып. 5. — С. 35—41.
9. Руководство по химическому анализу морских вод РД 52.10.243-92. — СПб: Гидрометеиздат, 1993. — 263 с.

10. Сорокин Ю. И. Количественная оценка потоков минерального фосфата в планктонных сообществах пелагиали океана // Журн. общей биологии. — Л.: Наука, 1985. — Т. 46, № 5. — С. 606—624.
11. Тучковенко Ю. С., Дятлов С. Е., Рясинцева Н. И. и др. Гидрохимический режим // Северо-западная часть Чёрного моря: (биология и экология) / Под ред. Ю. П. Зайцева. — Киев: Наук. думка, 2006. — С. 146—174.
12. De T. K., Sarkar T. K., De M. et al. Abundance and occurrence of phosphate solubilizing bacteria and phosphatase in Sediment of Hooghly estuary, north east coast of Bay of Bengal // India. Journal of Coastal Development. — 2011. — Vol. 15. — P. 9—16.
13. Mudryk Z. J. Decomposition of organic and solubilisation of inorganic phosphorus compounds by bacteria isolated from a marine sandy beach // Marine Biology. — 2004. — Vol. 145. — P. 1227—1234.
14. Qian Y., Shi J., Chen Y. et al. Characterization of Phosphate Solubilizing Bacteria in Sediments from a Shallow Eutrophic Lake and a Wetland: Isolation, Molecular Identification and Phosphorus Release Ability Determination // Molecules. — 2010. — Vol. 15. — P. 8518—8533.
15. Strzelczyk E., Donderski W., Lewosz W. Occurrence of microorganisms capable of decomposing organic phosphorus compounds in two types of bottom sediments of the eutrophic lake Jeziorak // Acta Microbiol Pol. — 1972. — Vol. 3. — P. 101—110.

<sup>1</sup> Інститут морської біології  
НАН України, Одеса

<sup>2</sup> Інститут мікробіології і  
вірусології НАН України, Київ

Надійшла 11.09.17