



**ТРУДЫ
КАРАДАГСКОЙ
НАУЧНОЙ СТАНЦИИ
им. Т.И. ВЯЗЕМСКОГО –
ПРИРОДНОГО
ЗАПОВЕДНИКА РАН**

Выпуск 2(14)

2020

УДК 06 (477.75)

Главный редактор: Р. В. Горбунов, канд. геогр. наук
Заместитель главного редактора: В. И. Мальцев, канд. биол. наук
Технические редакторы: Т. Ю. Горбунова, Л. В. Знаменская

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

П. Н. Баранов, д-р геол.-минерал. наук,
д-р геол. наук
М. М. Бескаравайный, канд. биол. наук
В. А. Боков, д-р геогр. наук
Ю. И. Будашкин, канд. биол. наук
Б. А. Вахрушев, д-р геогр. наук
Ю. В. Глибин
Н. А. Давидович, д-р биол. наук
А. В. Ена, д-р биол. наук
Е. И. Ергина, д-р геогр. наук
С. П. Иванов, д-р биол. наук
В. В. Майко, д-р ист. наук
В. А. Миноранский, д-р с.-х. наук
Е. Л. Неврова, д-р биол. наук

Э. Б. Петрова, д-р ист. наук
Ю. В. Плугатарь, чл.-корр. РАН, д-р с.-х. наук
Е. А. Позаченюк, д-р геогр. наук
М. А. Поляков, канд. биол. наук
В. В. Рожнов, академик РАН, д-р биол. наук
А. А. Родионов, канд. ист. наук
И. И. Руднева, д-р биол. наук
Ю. А. Силкин, канд. биол. наук
Т. Н. Смекалова, д-р ист. наук
А. А. Солдатов, д-р биол. наук
А. В. Фатерыга, канд. биол. наук
В. В. Фатерыга, канд. биол. наук
И. В. Флоринский, д-р техн. наук
А. Л. Чепалыга, д-р геогр. наук

Все материалы, подаваемые в «Труды Карадагской научной станции им. Т.И. Вяземского – природного заповедника РАН», проходят двойное независимое анонимное рецензирование

Издатели

Ассоциация по сохранению и восстановлению редких и исчезающих животных
«Живая природа степи»
347511, Ростовская область, Орловский район, пос. Орловский, ул. Пролетарская, д. 34.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр
«Институт биологии южных морей имени А.О.Ковалевского РАН»
299011, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2.

Адрес редакции

ул. Науки, 24, пгт Курортное, г. Феодосия, Республика Крым, 298188
Телефон +7 36562 26212
E-mail: karadag.trudy@yandex.ru

Ассоциация по сохранению и восстановлению редких и исчезающих животных
«ЖИВАЯ ПРИРОДА СТЕПИ»

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр
«ИНСТИТУТ БИОЛОГИИ ЮЖНЫХ МОРЕЙ имени А.О. КОВАЛЕВСКОГО РАН»
КАРАДАГСКАЯ НАУЧНАЯ СТАНЦИЯ им. Т.И.ВЯЗЕМСКОГО –
ПРИРОДНЫЙ ЗАПОВЕДНИК РАН

ТРУДЫ КАРАДАГСКОЙ НАУЧНОЙ СТАНЦИИ им. Т.И. ВЯЗЕМСКОГО – ПРИРОДНОГО ЗАПОВЕДНИКА РАН

Научный журнал

Основан в мае 2016 г.

Периодическое издание

Выходит 4 раза в год

Выпуск 2 (14)
2020

СОДЕРЖАНИЕ

Изучение биоразнообразия и экологический мониторинг

- Коротков А.А.* Сравнительная оценка доз, формируемых природным радионуклидом ^{210}Po в гидробионтах-фильтраторах из соленых озер Крыма и прибрежных районов Черного моря. 3
- Минкина Н.И.* Пространственная вариабельность энергетического обмена черноморского гребневика *Mnemiopsis leidyi* Agassiz, 1865. 14
- Прусова И.Ю.* Вертикальное распределение копепод семейства Eucalanidae (Copepoda: Calanoida) в Аравийском море. 29
- Тихонова Е. А., Бурдиян Н. В.* Химико-микробиологическая характеристика донных отложений прибрежной акватории Казантипского природного заповедника (Азовское море). 40

Экспериментальная гидробиология

- Чмыр В.Д., Ли Р.И.* Структурно-функциональные взаимосвязи популяций в планктонном сообществе. 48
- Капранова Л.Л.* Экскреция тестостерона и эстрадиола культивируемой мидией *Mytilus galloprovincialis* Lam. (Чёрное море) 56
- Чубчикова И.Н., Дробецкая И.В.* Оценка антирадикальной активности вторичных каротиноидов у четырёх видов зелёных микроводорослей порядка Sphaeropleales в системе *in vitro*. 66

Географические, геологические и палеонтологические исследования

- Горбунов Р.В., Горбунова Т.Ю., Лебедев Я.О., Кузнецов А.Н., Кузнецова С.П., Нгуен Данг Хой* Особенности формирования радиационного баланса среднегорных тропических лесных экосистем национального парка Бидуп-Нуйба (южный Вьетнам) во влажный сезон года. 79
- Дубас В.В., Алексашкин И.В.* Особенности миграции тяжелых металлов в агроэкосистемах восточной части предгорья Крымских гор. 89

Association for the Conservation and Recovery of Rare and Endangered Animals
«LIVING NATURE OF THE STEPPE»

Federal State Budget Scientific Institution
Federal Research Center

«A.O. KOVALEVSKY INSTITUTE OF BIOLOGY OF THE SOUTHERN SEAS OF RAS»
T.I. VYAZEMSKY KARADAG SCIENTIFIC STATION –
NATURE RESERVE OF THE RAS

PROCEEDINGS OF T.I. VYAZEMSKY KARADAG SCIENTIFIC STATION – NATURE RESERVE OF THE RAS

Scientific Journal

Established in May 2016

Periodical

Issued 4 times a year

Issue 2 (14)
2020

CONTENT

Biodiversity Researches and Environmental Monitoring

- Korotkov A.A.* Comparative Assessment of Doses Formed by Naturally Occuring Radionuclide ^{210}Po in Filter-Feeding Hydrobionts from Salt Lakes of the Crimea and Coastal Areas of the Black Sea. 3
- Minkina N.I.* Spatial Variability of Energetic Metabolism of Black Sea Ctenophor *Mnemiopsis leidyi* Agassiz, 1865. 14
- Prusova I.Yu.* Vertical Distribution of Eucalanidae (Copepoda: Calanoida) in the Arabian Sea. 29
- Tikhonova E.A., Burdian N.V.* The Chemical-Microbiological Characteristics of Sea Bottom Sediments of the Coastal Aquatoria of Kazantip Nature Reserve (Azov Sea). 40
-

Experimental Hydrobiology

- Tchmyr V.D., Lee R.I.* Structural and Functional Relationships of Populations in the Plankton Community. 48
- Kapranova L.L.* Testosterone and Estradiol Excretion by Cultivated Mussels *Mytilus galloprovincialis* Lam. (Black Sea) 56
- Chubchikova I.N., Drobetskaya I.V.* Antiradical Activity Estimation of Secondary Carotenoids of Four Green Microalgae Species from Order Sphaeropleales *in vitro*. 66
-

Geographical, Geological and Paleontological Researches

- Gorbunov R.V., Gorbunova T.Yu., Lebedev Ya.O., Kuznetsov A.N., Kuznetsova S.P., Nguyen Dang Hoi.* Peculiarities of the Radiation Balance Formation of the Mid-Mountain Tropical Forest Ecosystems of Bidup-Nuiba Natural Park (Southern Vietnam) During the Wet Season. 79
- Dubas V.V., Aleksashkin I.V.* Peculiarities of Migration of Heavy Metals in Agroecosystems of the Eastern Part of the French of Crimean Mountains. 89

ИЗУЧЕНИЕ БИОРАЗНООБРАЗИЯ И
ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ

УДК 574.2:574.632

**СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ДОЗ, ФОРМИРУЕМЫХ ПРИРОДНЫМ
РАДИОНУКЛИДОМ ^{210}Po В ГИДРОБИОНТАХ-ФИЛЬТРАТОРАХ ИЗ СОЛЕННЫХ
ОЗЕР КРЫМА И ПРИБРЕЖНЫХ РАЙОНОВ ЧЕРНОГО МОРЯ ***

Коротков А.А.

ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН»,
г. Севастополь, Российская Федерация,
e-mail: a.korotkoff@mail.ru

В работе представлены результаты сравнительной оценки мощностей поглощенных и эквивалентных доз, формируемых у гидробионтов, имеющих сходный тип питания (фильтраторов), от ионизирующего излучения природного радионуклида ^{210}Po . Объектами исследования послужили черноморские двустворчатые моллюски нескольких видов и типичный обитатель соленых озер Крыма жаброногий рачок *Artemia spp.* (Crustacea, Anostraca). Отмечена высокая аккумулирующая способность исследуемых гидробионтов: величины коэффициента накопления ими ^{210}Po варьировал в пределах 10^4 – 10^5 . Определено, что значения поглощенных и эквивалентных доз, полученных этими организмами в результате внутреннего облучения α -частицами ^{210}Po , были близки. Максимальные мощности эквивалентных доз, рассчитанных как для артемий, так и для моллюсков, составили около 10^{-1} Зв·год $^{-1}$. Оценка полученных результатов с использованием шкалы Зон хронического действия ионизирующего излучения, предложенной Г.Г. Поликарповым, показало, что дозы, формируемые ^{210}Po , достигают области «экологической маскировки», что подтверждает значимость ^{210}Po как основного дозообразующего радионуклида.
Ключевые слова: ^{210}Po , дозовые нагрузки, *Artemia spp.*, двустворчатые моллюски, соленые озера, Черное море.

Введение

Известно, что в силу своих физико-химических свойств, ^{210}Po является основным вкладчиком в формирование дозовой нагрузки на гидробионтов: при отсутствии техногенных радиационных аварий его вклад в общую дозу составляет до 60%, а, в отдельных случаях, и более (IAEA, 1995; Aarkrog et al., 1997; IAEA, 2017). ^{210}Po – это наиболее долгоживущий из семи естественных изотопов полония, образующихся в цепи распада трех природных радиоактивных рядов (^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th), который замыкает ряд ^{238}U . Период его полураспада составляет 138,4 суток, причем 100 % энергии при распаде ^{210}Po излучает в виде α -частиц с энергией 5,305 МэВ. Ввиду достаточно большого периода полураспада, высокой ионизирующей способности α -частиц, а также благодаря своей способности накапливаться в органах и тканях, связываясь с белками и аминокислотами (Cherry and Shannon, 1974; Aposhian and Bruce, 1991; Durand and Goudard, 2002; Wildgust et al., 2000), ^{210}Po формирует довольно высокие дозы

* Работа выполнена частично по теме государственного задания рег. № НИОКТР АААА-А18-118020890090-2 «Молисмологические и биогеохимические основы гомеостаза морских экосистем» (внутр. № 0828-2018-0006). Работы по определению ^{210}Po в соленых озерах Крыма и артемии проводились при финансовой поддержке Гранта РФФИ № 18-16-00001 «Разработка биологических и геохимических основ развития аквакультуры в гиперсоленых озерах и лагунах Крыма».

внутреннего облучения гидробионтов по сравнению с другими радионуклидами (Cherry and Shannon, 1974; Aarkrog et al., 1997).

Известно, что основным глобальным источником поступления ^{210}Po служат атмосферные выпадения (IAEA, 2017). В атмосфере ^{210}Po образуется в результате распада части радиоактивного ряда ^{238}U : ^{222}Rn – ^{210}Pb – ^{210}Bi – ^{210}Po . На основании оценок глобальных потоков ^{210}Po из атмосферы Земли было показано, что распределение ^{210}Po зависит от географической широты, с выпадениями максимальных активностей в средних широтах (Cherry and Neugaud, 1988). Таким образом, Крымский полуостров, Чёрное и Азовское моря располагаются в регионе, где поступление полония в составе атмосферных выпадений близко к максимальным величинам.

Попадая в водную среду, ^{210}Po быстро включается в процессы биогеохимического переноса, ассоциируясь, в основном, со взвешенным органическим веществом (Wildgust et al., 1998; IAEA, 2017). В прибрежной зоне морей и в небольших водоемах в составе органической взвеси может находиться до 99% полония (Wildgust et al., 2000). Как уже отмечалось выше, полоний активно накапливается гидробионтами. Было установлено, что поглощение ^{210}Po гидробионтами-гетеротрофами происходит только пищевым путем, что позволило говорить о возможном использовании этого радионуклида в качестве природного трассера трофической цепи (Neugaud and Cherry, 1979; Lazorenko and Polikarpov, 2004). Ввиду указанных особенностей поведения полония в водной среде, гидробионты-фильтраторы способны накапливать наибольшие количества этого радионуклида.

На территории Крыма располагается большое количество озер, причем большинство из них – это соленые и гиперсоленые водоемы континентального и морского типа (Балушкина и др., 2009; Balushkina et al., 2005). Наиболее массовым обитателем соленых озер Крыма является жаброногий рачок артемия (*Artemia spp.*, Crustacea, Anostraca). Цисты артемии служат ценным кормовым ресурсом для аквакультуры, а науплиусы этого рачка – самым распространенным живым стартовым кормом для личинок рыб и ракообразных (Леонова и др., 2006). Артемия является типичным фильтратором, питаясь взвешенными в воде микроводорослями, бактериями, мелкими простейшими и детритом (Студеникина, 1999). Поэтому, оценка доз, которые артемия получает от α -излучения инкорпорированного ^{210}Po является актуальной задачей. Нам также представлялось интересным сравнить дозы, получаемые артемией с дозой нагрузкой на других гидробионтов-фильтраторов из сопредельного региона. Объектами для сравнения послужили двустворчатые моллюски, обитающие в прибрежных акваториях Черного моря. Высокий уровень аккумуляции ^{210}Po некоторыми видами черноморских двустворчатых моллюсков и, как следствие, значительные дозовые нагрузки ранее были отмечены в ряде работ (Lazorenko and Polikarpov, 2004; Лазоренко, 2008; Lazorenko and Korotkov, 2017). В связи с этим в задачи работы входило:

- определить концентрацию ^{210}Po в воде изучаемых водоемов;
- определить концентрации природного радионуклида ^{210}Po в цистах и взрослых особях артемии (*Artemia spp.*) из соленых озер Крыма и черноморских моллюсках (*Bivalvia*);
- рассчитать коэффициенты накопления ^{210}Po артемиями и их цистами;
- рассчитать мощности поглощенных и эквивалентных доз, полученных артемиями;
- сравнить полученные результаты с таковыми для массовых видов двустворчатых моллюсков Черного моря;
- оценить степень риска последствий внутреннего облучения взрослых особей *Artemia spp.* и изученных видов двустворчатых моллюсков α -частицами ^{210}Po .

Для соленых озер Крыма, а также некоторых видов черноморских моллюсков такие исследования выполнены впервые.

Материалы и методы

Материал для работы был отобран во время однодневных сухопутных экспедиций на солёные озёра Крыма. Для радиохимического анализа ^{210}Po в период 2016–2018 гг. были отобраны цисты артемии в озерах Джарылгач и Сасык-Сиваш, взрослые особи – из озёр Кирлеутское, Джарылгач и Бакальское. Для сбора артемий и их цист использовали планктонную сеть (150 мкм). Взрослых артемий доставляли в лабораторию в живом виде. При невозможности немедленного проведения радиохимического анализа, пробы, после промывки пресной водой и обсушивания, замораживали и хранили при $t = -15^\circ\text{C}$ не более 10 дней.

Моллюски были отобраны на ряде станций в прибрежной зоне Черного моря, во время 83 и 84 рейсов НИС «Профессор Водяницкий» в 2016 г. Отбор производился отрядом бентоса при помощи дночерпателя «Океан-50». Из этих проб отбирали моллюсков, относящихся к наиболее массовым видам, для последующего определения содержания в них ^{210}Po . Материал отбирали в количествах, достаточных для определения этого радионуклида. До прибытия судна в порт пробы сохраняли в замороженном виде при $t = -15^\circ\text{C}$.

Станции отбора проб представлены на рис. 1.

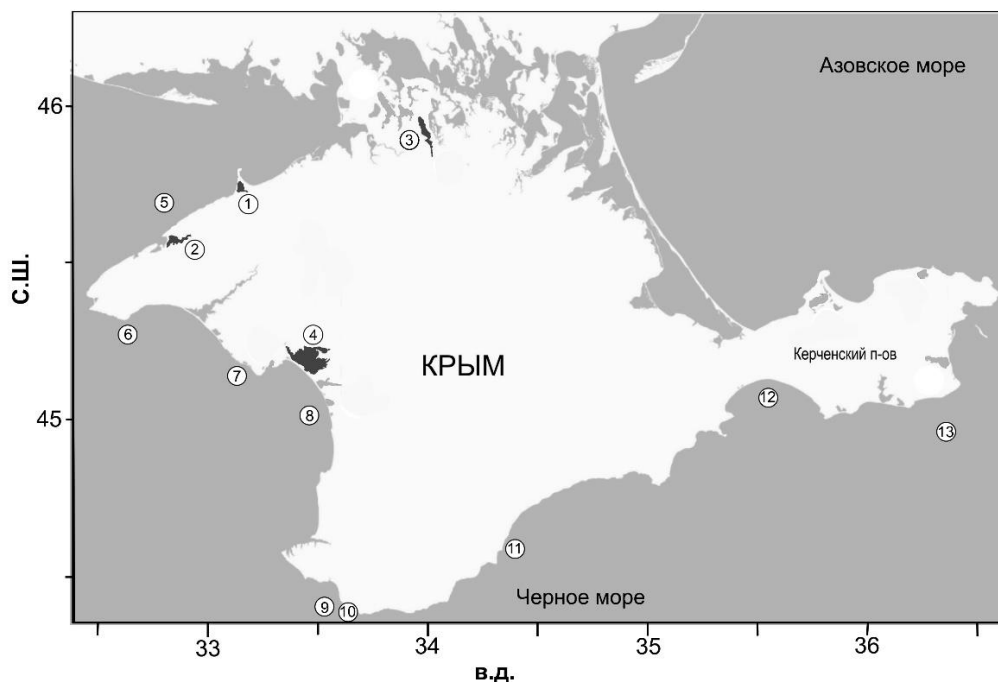


Рис. 1. Схема станций отбора проб: 1 – оз. Бакальское, 2 – оз. Джарылгач, 3 – оз. Кирлеутское, 4 – оз. Сасык-Сиваш, 5 – 13- станции в Черном море (отбор моллюсков)

Отобранный материал доставляли в лабораторию отдела радиационной и химической биологии ФИЦ ИнБЮМ. Для анализа моллюсков брали мягкие ткани, артемий анализировали целиком. Пробы живого материала промывали, удаляли избыток воды с помощью фильтровальной бумаги и взвешивали. Для радиохимического анализа ^{210}Po использовали от 1 до 10 г сырой массы материала. Из проб воды объемом 1–20 л взвешенное вещество удаляли, пропуская пробу через фильтр-картридж (0,5 мкм). Растворенный полоний выделяли из фильтрата, предварительно подкисленного соляной кислотой до $\text{pH} = 2$, соосаждением с Co-APDC (Chen et al., 1998). Осадок отделяли фильтрацией (фильтр Wathman GF-A).

Пробы гидробионтов и фильтры с осадком обрабатывали концентрированными соляной (36% HCl , ос.ч) и азотной (65% HNO_3 , ос.ч) кислотами, перекисью водорода

(30% H₂O₂, ос.ч) при нагревании. Из конечного раствора 0,3 моль·л⁻¹ HCl полоний выделяли путем спонтанного осаждения на серебряный диск. Осаждение проводили в течение 3,5–4 часов при температуре +85°C. По завершении процесса диск промывали дистиллированной водой, высушивали при комнатной температуре и использовали в качестве счетного образца для α -спектрометрии (Chen et al., 1998). Химический выход ²¹⁰Po определяли добавлением в исследуемую пробу трассера – ²⁰⁸Po, с периодом полураспада 2,898 года и энергией α -частиц 5,114 МэВ. Для измеренных образцов он был не ниже 85%.

Спектрометрические измерения образцов были проведены на базе отдела континентальной радиоэкологии Института экологии растений и животных УрО РАН (биофизическая станция, г. Заречный Свердловской обл.). Использовался альфа-спектрометрический комплекс на базе OSTEË Plus с программным обеспечением MAESTRO MCA и Alpha Vision (ORTEC – АМЕТЕК, США). Концентрации ²¹⁰Po в пробах рассчитывали по методике (Radiochemistry Procedures Manual..., 1984), результаты выражали в Бк·кг⁻¹ сырой массы для гидробионтов, мБк·л⁻¹ – для воды. Статистическую ошибку альфа-спектрометрических измерений рассчитывали по величине одного стандартного отклонения (1 σ) от средних значений. Ошибка не превышала 15%. Статистический анализ результатов проводили с использованием общепринятых методов (Mayer, 1999).

Для оценки и сравнительного анализа способности гидробионтов аккумулировать ²¹⁰Po рассчитывали коэффициенты накопления (К.Н.) этого радионуклида гидробионтами (IAEA, 2017):

$$\text{К.Н.} = \frac{\text{Концентрация } ^{210}\text{Po} \text{ аккумулированная гидробионтом, Бк}\cdot\text{кг}^{-1}}{\text{Концентрация } ^{210}\text{Po} \text{ в воде (растворенная форма), Бк}\cdot\text{л}^{-1}} \quad (1)$$

Для расчета мощностей поглощенных доз, формируемых излучением α -частиц ²¹⁰Po в гидробионтах были использованы подходы и критерии, изложенные в работах (Thomas and Liber, 2001; Kryshev et al., 2002), а также формула (2), предложенная в работе (Blaylock et al., 1993):

$$D = 5.04 \times 10^{-6} \times C_{\text{орг}} \times E \quad (2)$$

где: D – поглощенная доза, полученная в течение года организмом от аккумулированного в нем альфа-излучающего радионуклида, Гр·год⁻¹; $C_{\text{орг}}$ – концентрация этого радионуклида в гидробионте, Бк·кг⁻¹ сырой массы; E – энергия исследуемого радионуклида, МэВ.

Действие альфа-излучающих радионуклидов в морской среде оценивается только по их доле, инкорпорированной гидробионтами, т.к. вклад внешнего облучения от воды и донных отложений исключается в силу физических характеристик α -частиц (Thomas and Liber, 2001). Для расчета эквивалентных доз облучения артемии использовали взвешивающий коэффициент равный 20 для α -частиц (ICRP, 2017).

Полученные результаты сравнивали со шкалой Зон хронического действия ионизирующего излучения, предложенной Г.Г. Поликарповым (Polikarpov, 1998; Поликарпов, 2008).

Результаты и обсуждение

Концентрации ²¹⁰Po, определенные в цистах и взрослых артемиях, отобранных в соленых озерах Крыма представлены в табл. 1.

Таблица 1.

Концентрации ^{210}Po , определенные для цист и взрослых артемий (*Artemia spp.*)

Объект	Место отбора	Год	^{210}Po , Бк·кг ⁻¹ сырой массы ± 1σ	
			минимум	максимум
Цисты	оз. Джарылгач	2016–2017	4,1±0,7	8,5±1,5
Взрослые особи	оз. Джарылгач	2016–2018	36,9±1,8	198,3±7,9
	оз. Бакальское	2018	170,2±8,1	200,4±10,5
	оз. Кирлеутское	2017	-	25,3±3,6
Цисты	оз. Сасык-Сиваш	2016	-	3,6±0,8

Результаты определения этого радионуклида в телах двустворчатых моллюсков, относящихся к нескольким массовым черноморским видам, отобранных в прибрежной зоне, представлены в табл. 2.

Таблица 2.

Концентрации ^{210}Po в моллюсках

Объект	Место отбора	^{210}Po , Бк·кг ⁻¹ сырой массы ± 1σ	
		минимум	максимум
<i>Gibbomodiola adriatica</i> (Lamarck, 1819)	Черное море	91,2±7,7	253,7±9,0
<i>Mytilus galloprovincialis</i> (Lamarck, 1819)	Черное море	24,8±1,7	260,4±10,2
<i>Pitar rudis</i> (Poli, 1795)	Черное море	20,0±1,2	47,3±1,5
<i>Modiolula phaseolina</i> (Philippi, 1844)	Черное море	36,5±1,2	43,9±1,7
<i>Gouldia minima</i> (Montagu, 1803)	Черное море	-	53,7±3,1
<i>Cerastoderma edule</i> (Linnaeus, 1758)	оз. Бакальское	-	120,9±9,6

На основании полученных данных для оценки аккумулирующей способности исследуемых гидробионтов в отношении ^{210}Po были рассчитаны величины коэффициентов накопления ^{210}Po этими гидробионтами. Для этих расчетов были также определены концентрации растворенного ^{210}Po в воде из мест обитания исследованных животных. Относительно высокие концентрации отмечены в воде озер Кирлеутское и Сасык-Сиваш: 5,8±0,1 и 5,0±0,2 мБк·л⁻¹, соответственно. В воде озер Джарылгач и Бакальское удельная активность ^{210}Po была приблизительно вдвое ниже: 2,7±0,1 и 2,3±0,1 мБк·л⁻¹, соответственно. В воде прибрежных районов Черного моря, где были отобраны моллюски, концентрация ^{210}Po составляла 0,5–0,7 мБк·л⁻¹.

Максимальные величины коэффициентов накопления, которые были рассчитаны для отобранных гидробионтов, приведены в табл. 3.

Таблица 3.

Коэффициенты накопления (К.Н.) ^{210}Po , рассчитанные для исследованных гидробионтов

Объект	Место отбора	К.Н. (макс.)
<i>Artemia spp.</i> , взрослые особи	оз. Джарылгач	7,3·10 ⁴
<i>Artemia spp.</i> , взрослые особи	оз. Бакальское	8,7·10 ⁴
<i>Artemia spp.</i> , взрослые особи	оз. Кирлеутское	4,4·10 ³
<i>Artemia spp.</i> (цисты)	оз. Джарылгач	3,1·10 ³
<i>Artemia spp.</i> (цисты)	оз. Сасык-Сиваш	6,4·10 ²
<i>Gibbomodiola adriatica</i> (Lamarck, 1819)	Черное море	3,7·10 ⁵
<i>Mytilus galloprovincialis</i> (Lamarck, 1819)	Черное море	4,3·10 ⁵
<i>Pitar rudis</i> (Poli, 1795)	Черное море	6,7·10 ⁴
<i>Modiolula phaseolina</i> (Philippi, 1844)	Черное море	6,3·10 ⁴
<i>Gouldia minima</i> (Montagu, 1803)	Черное море	7,7·10 ⁴
<i>Cerastoderma edule</i> (Linnaeus, 1758)	оз. Бакальское	5,3·10 ⁴

Как известно, содержание ^{210}Po в телах двустворчатых моллюсков в значительной степени зависит от стадии развития их гонад (Лазоренко, 2008; Lazorenko et al., 2010).

Наиболее высокие концентрации ^{210}Po в них обнаруживаются в преднерестовый период, а минимальные – в период нереста и сразу после него, поскольку значительная часть полония выбрасывается в воду вместе с половыми продуктами. Исследованные нами виды черноморских моллюсков были отобраны в апреле, т.е. до наступления периода нереста (Киселева, 1981). Поэтому можно предположить, что содержание ^{210}Po в их гонадах (и, соответственно, телах) было близко к максимальным величинам.

Наиболее высокой аккумулярующей способностью в отношении ^{210}Po отличались два вида черноморских моллюсков *Gibbomodiola adriatica* и *Mytilus galloprovincialis*. Максимальные значения К.Н. для этих видов были близки и составляли $3,7 \cdot 10^5$ и $4,3 \cdot 10^5$, соответственно, что почти в 5 раз превышало этот показатель для артемии, отобранной в Джарылгаче ($8,7 \cdot 10^4$). Для других гидробионтов-фильтраторов К.Н. были еще ниже. При этом величина К.Н. ^{210}Po , полученная для *Artemia spp.* из оз. Бакальского была несколько выше, чем для отобранного в нем же двустворчатого моллюска *C. edule* ($8,7 \cdot 10^4$ против $5,3 \cdot 10^4$, соответственно). Как и ожидалось, наименьшие значения К.Н. ^{210}Po показали цисты артемии, что, очевидно, объясняется пищевым путем поступления этого радионуклида в организм гидробионтов. Небольшие количества этого радионуклида, которые были определены, по-видимому, остались после промывки на внешней поверхности цист.

При сравнении коэффициентов накопления ^{210}Po было отмечено, что относительно низкие значения К.Н. получены для обитателей водоемов с большей соленостью воды и наоборот. Так, К.Н. ^{210}Po артемией из оз. Кирлеутского (соленость воды 318‰) составил $4,4 \cdot 10^3$, Джарылгача (188‰) – $7,3 \cdot 10^4$, Бакальского (ок. 47‰) – $8,7 \cdot 10^4$. Максимальные К.Н. ^{210}Po моллюсками Черного моря (соленость воды 16–18‰), как уже было показано выше, превышали 10^5 . В литературе имеются сведения о том, что при повышении солености воды наблюдается увеличение концентрации полония в растворенной фазе (Neugaud and Cherry, 1979). Однако, для однозначного утверждения, что эта тенденция имеет место в этом случае данных недостаточно. В целом можно констатировать, что исследованные организмы-фильтраторы отличаются высокой способностью аккумуляровать природный радионуклид ^{210}Po .

Для сравнительной оценки дозовых нагрузок на гидробионтов-фильтраторов, были рассчитаны мощности доз, которые они получают от внутреннего облучения α -частицами ^{210}Po . Результаты представлены в табл. 4.

Таблица 4.

Мощности доз, рассчитанные для исследованных гидробионтов

Объект	Место отбора	Мощность дозы (мин. - макс.)	
		Поглощенной, Гр·год ⁻¹	Эквивалентной, Зв·год ⁻¹
<i>Gibbomodiola adriatica</i> (Lamarck, 1819)	Черное море	$2,5 \cdot 10^{-3} - 7,0 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-2} - 1,4 \cdot 10^{-1}$
<i>Mytilus galloprovincialis</i> (Lamarck, 1819)	Черное море	$6,7 \cdot 10^{-4} - 7,0 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-2} - 1,4 \cdot 10^{-1}$
<i>Pitar rudis</i> (Poli, 1795)	Черное море	$5,5 \cdot 10^{-4} - 1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-2} - 2,5 \cdot 10^{-2}$
<i>Modiolula phaseolina</i> (Philippi, 1844)	Черное море	$1,0 \cdot 10^{-3} - 1,2 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-2} - 2,4 \cdot 10^{-2}$
<i>Gouldia minima</i> (Montagu, 1803)	Черное море	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$2,9 \cdot 10^{-2}$
<i>Cerastoderma edule</i> (Linnaeus, 1758)	оз. Бакальское	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$6,5 \cdot 10^{-2}$
<i>Artemia spp.</i> (взрослые)	оз. Джарылгач	$1,0 \cdot 10^{-3} - 5,5 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-2} - 1,1 \cdot 10^{-1}$
<i>Artemia spp.</i> (взрослые)	оз. Бакальское	$4,7 \cdot 10^{-3} - 5,5 \cdot 10^{-3}$	$9,4 \cdot 10^{-2} - 1,1 \cdot 10^{-1}$
<i>Artemia spp.</i> (взрослые)	оз. Кирлеутское	$7,0 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$
<i>Artemia spp.</i> (цисты)	оз. Джарылгач	$1,1 \cdot 10^{-4} - 2,3 \cdot 10^{-4}$	-
<i>Artemia spp.</i> (цисты)	оз. Сасык-Сиваш	$9,6 \cdot 10^{-5}$	-

Эквивалентные дозы для цист артемии не рассчитывали ввиду невозможности инкорпорирования ими полония и, следовательно, отсутствия внутреннего облучения α -частицами, которые образуются при его распаде.

Было установлено, что мощности доз, полученные исследованными организмами, варьировали в пределах одного порядка величин: 10^{-2} – 10^{-1} Зв·год $^{-1}$. При этом максимальные эквивалентные дозы, рассчитанные как для взрослых особей *Artemia spp.*, отобранных в оз. Бакальское и Джарылгач, так и для представителей двух видов двустворчатых моллюсков Черного моря (*G. adriatica* и *M. galloprovincialis*) были практически одинаковыми: $1,1 \cdot 10^{-1}$ и $1,4 \cdot 10^{-1}$ Зв·год $^{-1}$, соответственно. При сравнении полученных результатов с литературными данными было отмечено, что дозы, рассчитанные Г.Е. Лазоренко для черноморских моллюсков, находились в пределах величин, полученных в данной работе, хотя максимальные значения были несколько ниже и составляли для мидии (*M. galloprovincialis*) $3,3 \cdot 10^{-2}$ Зв·год $^{-1}$ (Лазоренко, 2008).

Значительно меньшие мощности доз этот моллюск получает от радиоактивного излучения таких опасных техногенных радионуклидов, как ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239,240}\text{Pu}$. Из представленных данных видно, что суммарная поглощенная доза, формируемая у *M. galloprovincialis* ^{137}Cs и ^{90}Sr составляла $1,8 \cdot 10^{-5}$ Гр·год $^{-1}$ (Egorov et al., 2006), а эквивалентная доза внутреннего облучения α -частицами $^{239,240}\text{Pu}$ – $1,24 \cdot 10^{-6}$ Зв·год $^{-1}$ (Терещенко и Поликарпов, 2008).

Что касается артемии, то суммарные поглощенные дозы, полученные взрослыми особями артемии от ионизирующего излучения искусственного ^{137}Cs и природных ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{234}Th , ^{238}U , ^{40}K , составляли $1,3 \cdot 10^{-5}$ Гр·год $^{-1}$ (Мирзоева и др., 2019), т.е. были почти на два порядка ниже, чем минимальная величина поглощенной дозы от ^{210}Po , рассчитанная нами для этого организма: $7,0 \cdot 10^{-4}$ Гр·год $^{-1}$ (табл. 4). Таким образом, вклад ^{210}Po даже в этом случае составляет более 98% от общей дозы, поглощенной *Artemia spp.*

Для того, чтобы оценить последствия внутреннего облучения взрослых особей *Artemia spp.* и двустворчатых моллюсков α -частицами ^{210}Po , рассчитанные мощности эквивалентных доз сравнивали со шкалой «Зон мощностей доз и их действия в Биосфере» Г.Г. Поликарпова (Polikarpov, 1998; Поликарпов, 2008). Результат представлен на рис. 2.

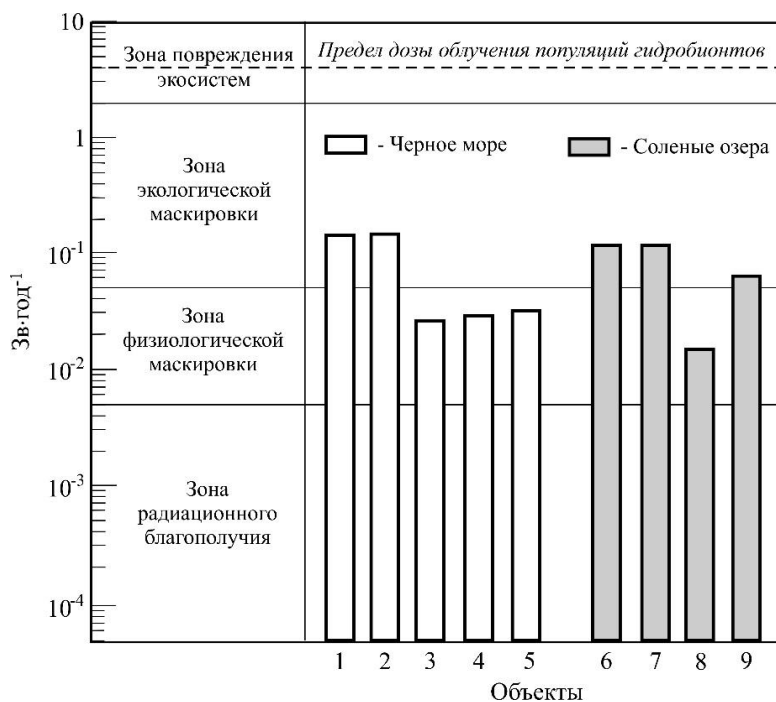


Рис. 2. Сравнение максимальных дозовых нагрузок на моллюсков-фильтраторов (1 – *G. adriatica*, 2 – *M. galloprovincialis*, 3 – *M. phaseolina*, 4 – *P. rudis*, 5 – *G. minima*, 9 – *C. edule*, оз. Бакальское) и взрослых артемий (*Artemia spp.*) из соленых озер Крыма (6 – оз. Джарылгач, 7 – оз. Бакальское, 8 – оз. Кирлеутское), формируемых природным радионуклидом ^{210}Po .

Такое сравнение рассчитанных доз со шкалой «Зон мощностей доз...» является одним из методов, который дает возможность оценить уровень последствий воздействия излучения искусственных и природных радионуклидов для гидробионтов.

В результате было определено, что дозы, полученные изученными организмами от внутреннего облучения, формируемого ^{210}Po , располагаются в двух Зонах: «физиологической маскировки» и «экологической маскировки» (рис. 2). В пределах первой радиационные эффекты во многих случаях могут маскироваться природной вариабельностью различных физиологических функций и содержанием биохимических компонентов. Уровень облучения в пределах этой Зоны достаточен для продуцирования регистрируемых эффектов (Polikarpov, 1998; Поликарпов и др., 2008).

Определенные нами дозы, полученные артемиями и моллюсками от ионизирующего излучения ^{210}Po , находились в пределах «Зоны экологической маскировки». Серьезный маскирующий эффект в этой Зоне может обеспечиваться различным состоянием популяций, сезонными изменениями и вариабельностью экологических условий, а также результатом действий естественного отбора (Polikarpov, 1998; Поликарпов и др., 2008). При этом, рассчитанные величины эквивалентных доз были значительно ниже предела дозы облучения, предложенного МАГАТЭ для популяций гидробионтов (IAEA, 2017). В целом, можно отметить, что гидробионты, имеющие сходный тип питания (фильтраторы), несмотря на различную таксономическую принадлежность, различие мест и условий обитания, могут получать практически одинаковые дозы от α -излучения инкорпорированного ^{210}Po , поступающего пищевым путем.

Выводы

В ходе исследования была выполнена сравнительная оценка дозовых нагрузок, формируемых природным радионуклидом ^{210}Po на гидробионтов-фильтраторов, имеющих сходство только по способу питания, а именно: типичного обитателя соленых озер Крыма жаброногого рачка *Artemia spp.* и двустворчатых моллюсков из прибрежной зоны Черного моря, относящихся к нескольким, массовым видам. В отношении обитателей соленых озер и ряда видов моллюсков такие исследования проведены впервые.

Установлено, что все исследованные гидробионты, за исключением цист артемии, отличались высокой аккумулярующей способностью в отношении ^{210}Po . Низкие значения коэффициента накопления ^{210}Po для цист *Artemia spp.* указывает на то, что поступление этого радионуклида в организм исследованных гидробионтов происходит пищевым путем.

Проведенный расчет показал, что мощности эквивалентных доз, формируемых внутренним облучением гидробионтов-фильтраторов α -частицами ^{210}Po достигают высоких значений: более 10^{-1} Зв·год $^{-1}$. Определено, что максимальные величины дозовых нагрузок для двух видов черноморских моллюсков и артемий были практически одинаковыми.

Показана высокая радиологическая значимость ^{210}Po для изученных гидробионтов как основного дозообразующего радионуклида.

При сопоставлении рассчитанных доз со шкалой «Зон мощностей доз и их действия в Биосфере» Г.Г. Поликарпова, установлено, что максимальные величины эквивалентных доз достигают «Зоны экологической маскировки» как для артемии, так и для моллюсков двух видов. Мощности эквивалентных доз были значительно ниже предела дозы облучения, рекомендованного МАГАТЭ для популяций гидробионтов.

Метод сопоставления рассчитанных доз со шкалой «Зон мощностей доз и их действия в Биосфере», предложенный академиком Г.Г. Поликарповым может быть использован для контроля радиэкологического состояния водных экосистем.

Благодарности

Автор выражает благодарность с.н.с., к.б.н Н.К. Ревкову за отбор и определение моллюсков, а также вед. инж. И.Н. Мосейченко и вед. инж. Д.Б. Евтушенко за помощь при отборе материала во время экспедиций на соленые озера.

Список литературы

1. Балущкина Е.В., Голубков С.М., Голубков М.С. и др. Влияние абиотических и биотических факторов на структурно-функциональную организацию экосистем солёных озёр Крыма // Журн. общ. биологии. 2009. Т. 70, № 6. С. 504–514.
2. Киселева М.И. Бентос рыхлых грунтов Черного моря. – Киев: Наукова думка, 1981. 165 с.
3. Лазоренко Г.Е. Распределение природного радионуклида ^{210}Po в компонентах экосистемы Черного моря // Радиоэкологический отклик Черного моря на Чернобыльскую аварию / Под ред.: Г.Г. Поликарпова и В.Н. Егорова. Севастополь: ЭКОСИ–Гидрофизика, 2008. С. 311–337.
4. Лазоренко Г.Е. Поликарпов Г.Г. Полоний-210 в рыбах Черного моря // Радиационная биология. Радиоэкология. 2010. Т. 50, № 4. С. 398–404.
5. Леонова Г.А., Богущ А.А., Бобров В.А. Биоиндикация оценка состояния соляных озёр Кулунды (Алтайский, край) по биогеохимическим критериям // Съезд Гидробиологического общества РАН (г. Тольятти, Россия, 18-22 сентября 2006 г.). 2006. Т. 1. С. 44–46.
6. Методические рекомендации по санитарному контролю за содержанием радиоактивных веществ в объектах внешней среды / ред.: А.Н. Марей, А.С. Зыкова. – М.: МЗ СССР, 1980. 356 с.
7. Мирзоева Н.Ю., Коротков А.А., Лазоренко Г.Е. Современные дозовые нагрузки от излучений техногенного ^{137}Cs и природных радионуклидов на жаброного рачка *Artemia spp.* из соленых озёр Крыма // Радиационная биология. Радиоэкология. 2019. Т. 59, № 4. С. 419–429.
8. Поликарпов Г.Г., Егоров В.Н., Гулин С.Б., Стокозов Н.А., Лазоренко Г.Е., Мирзоева Н.Ю., Терещенко Н.Н., Цыцугина В.Г., Кулебакина Л.Г., Поповичев В.Н., Коротков А.А., Евтушенко Д.Б., Жерко Н.В., Малахова Л.В. // Радиоэкологический отклик Чёрного моря на чернобыльскую аварию / Под ред. Г.Г. Поликарпова и В.Н. Егорова. Севастополь: ЭКОСИ–Гидрофизика, 2008. С. 351–358.
9. Студеникина Т.Л. Особенности биологии рачка *Artemia salina* в условиях соленых озёр // Водоёмы Алтайского края. – Новосибирск, 1999. С. 112–122.
10. Терещенко Н.Н., Поликарпов Г.Г. Современные дозовые нагрузки для черноморских гидробионтов от $^{239,240}\text{Pu}$ после аварии на Чернобыльской АЭС // Радиоэкологический отклик Черного моря на Чернобыльскую аварию / Под ред.: Г.Г. Поликарпова и В.Н. Егорова. – Севастополь: ЭКОСИ–Гидрофизика, 2008. С. 371 – 376.
11. Aarkrog A., Baxter M.S., Battercourt A.O., Bojanowski R., Bologna A., Charmasson S., Cunha I., Delfanti R., Duran E., Holm E., Jeffree R., Livingston H.D., Mahapanayawong S., Nies H., Osvath I., Pingyi Li., Povinec P.P., Sanchez A., Smith J.N., Swift D. A comparison of doses from ^{137}Cs and ^{210}Po in marine food: A major international study // Journal of Environmental Radioactivity. 1997. Vol. 34. N 1. P. 69–90.
12. Aposhian H.V., Bruce D.C. Binding of polonium-210 to liver metallothionein // Rad. Res. 1991. Vol. 126. P. 379–382.
13. Balushkina E.V., Golubkov S.M., Golubkov M.S. et al. Characteristic features of ecosystems of hyperhaline lakes of the Crimea // Proc. Zoological Institute of Russian Academy of Sciences. 2005. Vol. 308. P. 5–13.

14. Baxter M.S. Technologically enhanced radioactivity: an overview // Journal of Environmental Radioactivity. 1996. Vol. 32.N 1–2. P. 3–17.
15. Blaylock B.G., Frank M.I., O'Neal B.R. Methodology for estimating radiation dose rates to freshwater biota exposed to radionuclides in the environment // Report ES/ER/TM–78: Prepared for the U.S. DOE, Contract DE-AC05-84OR21400. Oak Ridge, TN, USA: Oak Ridge National Laboratory. 1993. 40 p.
16. Chen Q., Dahlggaard H., Nielsen S.P., Aarkrog A. Determination of ^{210}Po and ^{210}Pb in mussel, fish, sediment, petroleum // RISØ National Laboratory (Roskilde, Denmark). Nov. 1998. 10p.
17. Cherry R.D., Heyraud M. Lead-210 and polonium-210 in the World's oceans. // IAEA-TECDOC-481: Inventories of selected radionuclides in the oceans. Vienna: IAEA. 1988.P. 139–158.
18. Cherry R.D., Shannon L.V. The alpha radioactivity of marine organisms // Atomic Energy Review. 1974. Vol. 12. P. 3–45.
19. Durand J.P., Goudard F. Ferritin and hemocyanin: ^{210}Po molecular traps in marine fish, oyster and lobster // Marine Ecology Progress Series. 2002. Vol. 233. Is. 4. P. 199–205.
20. Egorov V.N., Lazorenko G.E., Mirzoeva N.Yu., Stokozov N.A., Kostova S.K., Malakhova L.V., Pirkova A.V., Arkhipova S.N., Korkishko N.F., Popovichev V.N., Plotitsyna O.V., Migal L.V. Content ^{137}Cs , ^{40}K , ^{90}Sr , ^{210}Po radionuclides and some chemical pollutants in the Black Sea mussels *Mytilus galloprovincialis* // Морской экологический журнал. 2006. Т. 5. № 3. С. 70–78.
21. EPA (Environmental Protection Agency, USA) Radiochemistry Procedures Manual // Eastern Environmental Radiation Facility. EPA 520/5–96–006. P.00.03.01–03. 1984. 342 p.
22. Friedrich J., Rutgers van der Loeff M.M. A two tracer (^{210}Po - ^{234}Th) approach to distinguish organic carbon and biogenic silica export flux in the Antarctic Circumpolar Current // Deep Sea Research. 2002. Part I. Vol. 49.P. 339–354.
23. Heyraud M., Cherry R.D. Polonium-210 and lead-210 in marine food chains // Marine Biology. 1979. Vol. 52.N3. P. 227–236.
24. ICRP. Dose coefficients for nonhuman biota environmentally exposed to radiation // ICRP Publication 136. Ann. ICRP 46(2). 2017. 92 p.
25. Kryshev I., Sazykina T., Kryshev A. et al. Ecological dosimetry models // Radionuclides uptake and transfer in pelagic food chains of the Barents Sea and resulting doses to man and biota. Project of NRPA, IMR, AUN, IET (Norway) and SPA TYPHOON (Russia). Norway: NRPA, 2002. 97 p.
26. Lazorenko G.E., Polikarpov G.G. ^{210}Po in marine biota // Regional Technical Co-operation Project RER/2/003 "Marine Environmental Assessment of the Black Sea": Working Material. Reproduced by the IAEA. Vienna: IAEA, 2004.P. 168–173.
27. Lazorenko G.E., Polikarpov G.G., Osvath I. ^{210}Po accumulation by components of the Black Sea ecosystem // Radioprotection. 2009. Vol. 44. N5. P. 981–986.
28. Lazorenko G.E., Polikarpov G.G., Pirkova A.V., Osvath I. Naturally occurring radionuclide Po-210 in the Black Sea molluscs // Морской экологический журнал. 2010. Т. 9, №3. С. 43–48.
29. Mayer K. Basics and essentials of statistics. // IAEA Regional advanced training course on quality management in environmental applications of nuclear analytical techniques (Karlsruhe (Germany), (23 Aug.–3 Sept. 1999) European Commission, Joint Research Centre, Institute for Transuranium Elements. Karlsruhe: Center for Advanced Technological and Environmental Training (FTU), 1999. 320 p.
30. Polikarpov G.G. Conceptual model of responses of organisms, populations and ecosystems to all possible dose rates of ionizing radiation in the environment // Radiat. Prot. Dosim. 1998. Vol. 75. N 1–4. P. 181–185.

31. Radiation protection and the management radiation protection of radioactive waste in the oil and gas industry // IAEA Safety Reports Series, no. 34, Vienna: IAEA, 2003. 139 p.
32. Rutgers van der Loeff M.M., Geiber W. U- and Th-series nuclides as tracers of particle dynamics, scavenging and biogeochemical cycles in the oceans. U-Th series nuclides in aquatic systems/ S. Krishnaswami, J.K. Cochran (Eds.).Chapter 7, Amsterdam: Elsevier, 2008. P. 227–268.
33. Sources of radioactivity in the marine environment and their relative contributions to overall dose assessment from marine radioactivity (MARDOS) // Technical Document 838. Vienna: IAEA, 1995.
34. The environmental behaviour of polonium // Technical Report Series, no. 484. Vienna: IAEA, 2017. 255 p.
35. Thomas P., Liber K. An estimation of radiation doses to benthic invertebrates from sediments collected near a Canadian uranium mine // J. Environ. International. 2001. Vol. 27. P. 341–353.
36. Wildgust M.A., McDonald P., White K.N. Temporal changes of ^{210}Po in temporal coastal waters // The Science of Total Environment. 1998. Vol. 214. Iss. 1/4. P. 1–10.
37. Wildgust M.A., McDonald P., White K.N. Assimilation of ^{210}Po by mussel *Mytilus edulis* from the alga *Isochrysis galbana* // Marine Biology. 2000. Vol. 136. P. 49–53.

COMPARATIVE ASSESSMENT OF DOSES FORMED BY NATURALLY OCCURRING RADIONUCLIDE ^{210}Po IN FILTER-FEEDING HYDROBIONTS FROM SALT LAKES OF THE CRIMEA AND COASTAL AREAS OF THE BLACK SEA

Korotkov A.A.

*A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS,
Sevastopol, Russian Federation,
e-mail: a.korotkoff@mail.ru*

This paper presents the results of the comparative assessment of absorbed and equivalent dose rates generated by naturally occurring radionuclide ^{210}Po in hydrobionts with a similar feeding type (filter-feeding organisms). The objects were some species of the bivalve mollusks from Black Sea and the typical inhabitant of the salt lakes of the Crimea, the gill-legged crustacean *Artemia spp.* High ability of the studied hydrobionts to accumulate polonium was noted. The values of the ^{210}Po concentration ratio ranged from 10^4 to 10^5 . Comparison of equivalent doses received by these organisms (as result of internal irradiation with α -particles produced by ^{210}Po) showed that values of the dose rates were quite close. The maximum equivalent dose rates calculated for both artemias and molluscs were about $10^{-1} \text{ Sv}\cdot\text{year}^{-1}$. Evaluation of obtained results using proposed by G. G. Polikarpov “Scale of chronic irradiation zones” showed that the doses formed by ^{210}Po reach the “ecological masking” zone, which confirms the radiological importance of ^{210}Po as the main contributor to the total dose.

Keywords: ^{210}Po ; dose; *Artemia spp.*; bivalve mollusks; salt lakes; the Black Sea.

Коротков Андрей Анатольевич Младший научный сотрудник радиационной и химической биологии, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН», e-mail: a.korotkoff@mail.ru

Поступила в редакцию 06.03.2020 г.

УДК 593.8:591 12(262.5)

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ВАРИАБЕЛЬНОСТЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБМЕНА ЧЕРНОМОРСКОГО ГРЕБНЕВИКА *MNEMIOPSIS LEIDYI* AGASSIZ, 1865*

Минкина Н.И.

ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН»,
г. Севастополь, Российская Федерация,
e-mail: niminkina@yandex.ru

Разработан метод мониторинга «благополучия» пелагиали на основании оценки пространственной вариабельности уровня энергетического обмена массовых видов зоопланктона. Метод предполагает исключение составляющих разброса измеряемых величин интенсивности дыхания, связанных с его суточным ритмом и условиями эксперимента. Влияние гетерогенности среды описывается оставшейся компонентой изменчивости интенсивности дыхания данного вида.

На основе выполненных экспериментов с использованием этого метода получены векторные поля отклонений уровня энергетического обмена у гребневика-вселенца *M. leidyi*. от статистической «нормы», рассчитанной для северной половины Черного моря. Выявлены основные факторы, определяющие характер и уровень физиологического «отклика» молоди и половозрелых особей этого гребневика на комплекс изменений, происходящих в среде и в ходе сезонной сукцессии планктона. Таковыми являются кормовые условия, орографический фактор и активность процесса размножения популяции.

Выявляемая пространственная изменчивость вектора и уровня энергетического обмена у отдельных групп зоопланктона (например, копепод, личинок моллюсков и рыб и т.п.) может служить показателем уровня ингибирующего влияния на них негативных факторов среды, в том числе загрязнения. Метод может быть также полезен для оконтуривания границ воздействия поллютантов на гидробионтов.

Ключевые слова: Черное море, мнемипсис, энергетический обмен, суточный ритм, пространственная вариабельность, неоднородность среды

Введение

Характеристики жизнедеятельности массовых видов водных организмов дают наиболее быстрый отклик на изменения качества среды обитания. В частности, это относится к величине энергетического обмена пойкилотермных организмов как к интегральному показателю их физиологического состояния. Огромный объем данных, накопленных к настоящему времени, свидетельствует о большой вариабельности дыхания у планктонных животных (Hemmingsen, 1960; Суценья, 1972; Ивлева, 1981; Павлова, 1987). Обычно эти данные представляют собой средние за время экспозиции величины стандартного обмена у взрослых особей. Но процедура измерений стандартного обмена планктонных животных строго не определена, результаты очень вариабельны и причины этого мало изучены с экологических позиций (Павлова, 1987). Противоречивы и недостаточны данные о суточной и сезонной изменчивости уровня дыхания зоопланктеров как на организменном, так и на популяционном уровнях. Малочисленны данные о величинах обмена у молоди зоопланктона, наиболее чувствительной к загрязнению. Не существует методик определения пространственной вариабельности энергетического обмена гидробионтов. Показатель электрон-транспортной активности, который предполагалось использовать для оценки уровня

* Работа выполнена в рамках проекта «ЭКОМОНОК» государственной программы ГКНТ СССР «Глобальные изменения природной среды и климата». Комплексные экспедиции финансировались Министерством охраны окружающей природной среды Украины. Исследования были также поддержаны бюджетной темой РАН АААА-А18-118021490093-4.

дыхания популяций зоопланктона, характеризует пул митохондрий организма, то есть его предельные энергетические возможности (Våmstedt, 1980). Остается неизвестным, как эти возможности реализуются в конкретных условиях обитания гидробионтов. В результате в настоящее время применимость метаболической теории в экологии гидробионтов вызывает сомнения у некоторых исследователей (Tilman et al., 2004; Alcaraz, 2016). Но необходимость оценить взаимосвязи функциональных характеристик планктона и особенностей функционирования экосистем по-прежнему является очень актуальной (Calow, 1987; Brown et al., 2004; Kearney, Porter, 2009; de Bello et al., 2010; Allen, Polimene, 2011; Barneche et al., 2014; Hébert et al., 2016).

Важно оценить, каково суммарное воздействие пищевых условий и/или загрязнения пелагиали на физиологическое состояние массовых видов планктонных организмов – криля, желтелых организмов, копепод, личинок рыб. Не менее важным является и решение обратной задачи: на основании оценки физиологического состояния популяций массовых видов планктона выявить области обследуемой акватории, неблагоприятные для их жизнедеятельности и/или наиболее подверженные загрязнению.

С целью получения данных, заполняющих эти пробелы, впервые был разработан оригинальный метод биологического мониторинга популяций зоопланктона на основании оценки пространственной изменчивости уровня их энергетического обмена в условиях гетерогенной среды (Минкина, 2007).

Представляются важными следующие вопросы: 1) каковы основные причины и механизмы большого разброса результатов измерения величин дыхания у планктонных гидробионтов; возможности их устранения и формализации процедуры измерения; 2) как соотносятся поля абиотических (например, содержания поллютантов), структурных, функциональных характеристик автотрофного звена с полями функциональных показателей гетеротрофных звеньев в морских сообществах, в данной статье – с уровнем энергетического обмена.

Исследования в данном направлении представляют интерес для объективной оценки состояния окружающей среды, влияния ее на популяции массовых видов планктона и принятия обоснованных решений по оптимальному использованию акваторий.

Материалы и методы

Предлагается оригинальная методика оценки временной и пространственной изменчивости интенсивности дыхания планктонных животных, включающая схему экспериментов и метод анализа результатов. Исследования последних лет показали, что нельзя игнорировать влияние на уровень дыхания гидробионтов плотности посадки организмов в респирометры, или, точнее, производной от нее величины – концентрации живой массы (Хайлов, Попов, 1983; Попов, 1987; Павлова, 1987; Boaden, 1989; Минкина, Павлова, 1995; Minkina et al., 1996; Хайлов и др., 1999; Минкина и др., 2006; Barneche et al., 2014). Было показано, что плотностная регуляция физиологических функций гидробионтов в эксперименте связана с изменением поведенческих реакций и ингибированием процессов жизнедеятельности метаболитами самих животных. Переменные величины концентрации массы, характеризующей суммарный эффект взаимовлияния особей в опыте, – одна из основных причин значительной вариабельности результатов измерения дыхания планктонных организмов, традиционно не учитываемая. Установлено, что с увеличением концентрации массы в эксперименте снижается интенсивность энергетического обмена у разных групп водных организмов (Хайлов, Попов, 1983; Попов, 1987; Павлова, 1987; Boaden, 1989; Минкина, Павлова, 1995; Minkina et al., 1996; Хайлов и др., 1999; Минкина и др., 2006; Glazier, 2006).

Значимость этой зависимости значительно выше, чем традиционно изучаемой зависимости интенсивности дыхания от индивидуальной массы тела животных. Известно, что показатели степени регрессионных уравнений, описывающих эти два типа зависимостей, имеют значения: от массы тела около $(-0,2) - (-0,25)$, от концентрации массы в пределах $(-0,6) - (-0,8)$.

Другим фактором, способным существенно влиять на величины энергетического обмена, является суточные ритмы физиологических процессов и поведения гидробионтов. Например, у черноморских копепод суточный ритм меняется на разных стадиях развития вида в онтогенезе, но сохраняется и характерен внутри жизненных форм, которые могут объединять несколько последовательных стадий развития (Петипа, 1967; Kjørboe, Hirst, 2014). Последнее обстоятельство позволяет без большой погрешности пересчитывать величины дыхания, измеренные у особей одного вида, но с разными размерами, принадлежащих к одной жизненной форме, к средней массе тела. Это делает возможным формировать общую выборку значений интенсивности энергетического обмена. Суточный ритм дыхания может оцениваться статистическим трендом, который может быть выделен в такой выборке величин энергетического обмена для особи со средними размерами в данной жизненной форме, полученных в разное время суток (Самышев, 1991; Минкина, Павлова, 1995; Minkina et al., 1996;). Наименее трудоемким методом измерения величин энергетического обмена, обеспечивающим необходимый для статистических расчетов объем данных, является полярографический метод. Кроме того, регистрация динамики процесса потребления кислорода позволяет судить о физиологическом состоянии организмов во время эксперимента, наличии стресса и избегать связанных с этим погрешностей (Самышев и др., 1980; Ikeda, 1980; Ивлева, 1981; Самышев, 1991; Минкина, Павлова, 1995; Minkina et al., 1996; Минкина, 2017).

Таким образом, при анализе результатов экспериментов предлагается применить схему расчетов, описанную нами ранее (Минкина, Павлова, 1995; Minkina et al., 1996; Минкина и др., 2006; Минкина, Самышев, 2009). Используется показатель концентрации живой массы, который рассчитывается по формуле:

$$C_w = N \times W / V, \quad (1)$$

где N – число организмов в респирометре, W – масса тела особи, V – объём респирометра.

Величина дыхания при постоянной температуре в опыте рассматривается как функция концентрации живой массы, индивидуальной массы тела особей и времени суток. Величины интенсивности обмена пересчитывается по формуле:

$$\frac{R_o}{W} = \frac{R}{W} \times \left(\frac{C_w}{C_o}\right)^{b_1}, \quad (2)$$

где C_o – выбранная для анализа постоянная величина концентрации массы, R_o/W – приведенное значение интенсивности дыхания, R/W – измеренное значение, b_1 – показатель степени в регрессионном уравнении вида $R/W = a_1 C_w^{-b_1}$. Принимая во внимание связь интенсивности дыхания с массой тела ($R/W = a_2 W^{-b_2}$), величины R_o/W пересчитываются для средней индивидуальной массы W_{av} в выбранных размерных классах организмов:

$$\frac{R'}{W} = \frac{R_o}{W} \times \left(\frac{W}{W_{av}}\right)^{-b_2}, \quad (3)$$

где R'/W – нормированные по параметрам массы значения интенсивности дыхания.

Величины, принадлежащие разным кривым динамики дыхания, полученным в различных точках исследуемой акватории, после нормирования могут быть использованы для выделения суточного тренда. Пространственный масштаб исследований определяет и шаг оценки суточного ритма дыхания животных. Для мезомасштабной шкалы достаточно выбрать интервал порядка одного часа. Для каждого часа суток формируются выборки из текущих нормированных значений кривых динамики энергетического обмена, полученных в различных узлах полигона на обследуемой акватории (процедура осреднения по пространству). Рассчитываются средние значения по всему полигону для каждого часа суток. Их совокупность образует тренд дыхания данного вида или жизненной формы (процедура осреднения по времени). Эта методика была использована нами ранее для оценки суточного ритма дыхания черноморского гребневика-вселенца *Mnemiopsis leidy* Agassiz, 1865 (Минкина, Павлова, 1995).

В качестве примера применения предлагаемого метода мы использовали данные об энергетическом метаболизме гребневика *Mnemiopsis leidy*, вселившегося в Черное море с конца 1980-х годов и давшего катастрофическую вспышку численности к 90-м годам (Шушкина, Виноградов, 1991). Период исследований интересен тем, что в экосистему Черного моря еще не внедрился другой хищный гребневик-иммигрант – *Beroe ovata*, питающийся мнемииопсисом.

Данными послужили результаты экспериментов с половозрелыми особями и молодью *M. leidy* в ходе двух выполненных по единой сетке станций комплексных сезонных съемок на судах Украинского научного центра экологии моря (УкрНЦЭМ, г. Одесса) в северной половине Черного моря, охвативших экономзоны Украины, России и Грузии (в 58 рейсе НИС «Г. Ушаков» в мае 1992 г. и 61 рейсе НИС «Э. Кренкель» в сентябре 1992 г). В этих экспедициях был накоплен уникальный массив информации о состоянии экосистемы Черного моря, включающий в себя комплекс гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических наблюдений (Мединец и др., 1994; Грузов и др., 1994), который позволяет интерпретировать результаты, полученные нами предложенным методом. Абиотические характеристики среды приводятся по данным УкрНЦЭМ и переданы нам в порядке обмена по Договору о научном сотрудничестве ИнБЮМ и УкрНЦЭМ.

Гребневиков вылавливали из верхнего перемешанного слоя сетью ДЖОМ (Джеди, океаническая модель), оборудованной мельничным газом № 23. Эксперименты выполняли при температуре обитания гребневиков – в мае при 14°C, в сентябре при 23°C. Сразу после вылова животных пересаживали в сосуды с фильтрованной водой, где держали около 2 ч для освобождения кишечников. Респирометры заполняли водой, профильтрованной через мембранные фильтры с диаметром пор до 3 мкм. В воду добавляли смесь антибиотиков в концентрации 25 мг/л. Содержание кислорода в опытах определяли полярографическим методом с использованием платиново-хлор-серебряных закрытых электродных систем типа Кларка. Датчики кислорода и температуры подключались к оксиметрам КЛ-115 и АК-04 с цифровой индикацией, показания которых непрерывно регистрировались на ленте самописца КСП-4. Перемешивание воды в респирометрах обеспечивала электрическая качалка (shuttle), на которой помещалась термостатирующая кювета с опытными сосудами. Датчики калибровали методом Винклера, пробы титровали на бюретке с ценой деления 0,02 мл. Постоянная времени используемых датчиков (максимальное время установления показаний) с тефлоновой мембраной толщиной 5 мкм не превышала 15 мин.

Поскольку не было обнаружено сезонных различий в уровне дыхания черноморского мнемииопсиса, кроме связанных с разницей температур обитания (Павлова, Минкина, 1995), все величины интенсивности энергетического метаболизма приведены к температуре 23°C. При расчетах были использованы значения

коэффициентов Q10 для Coelenterata: для интервала температур 10–15°C – 2.20, 15–20°C – 2.13, 20–25°C – 2.05 (Ивлева, 1981).

Впервые нами была определена зависимость интенсивности дыхания мнемииопсиса от плотности посадки особей в респирометры (рис. 1). Зависимость интенсивности дыхания мнемииопсиса от их индивидуальной сухой массы тела по нашим определениям представлена на рис. 2.

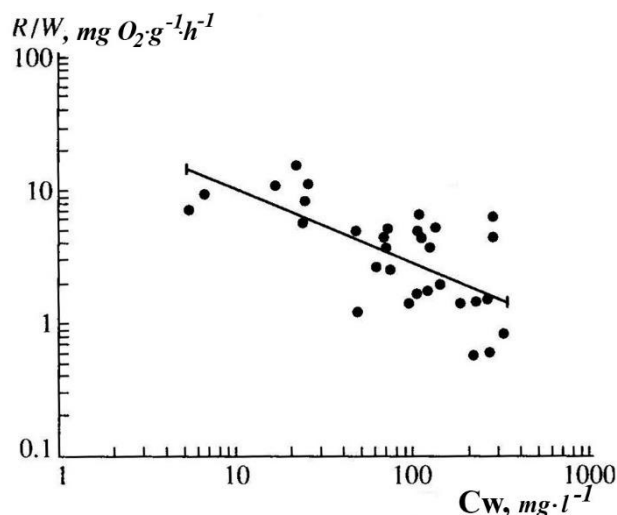


Рис. 1. Зависимость интенсивности дыхания черноморского *Mnemiopsis leidyi* (R/W , мг O_2 г сухого веса $^{-1}$ ·ч $^{-1}$) от концентрации живой массы C_w (мг сухого веса л $^{-1}$) в опытах по (Минкина, Павлова, 1995). $R/W=36,22 C_w^{-0,56+0,11}$, число измерений $n=31$, коэффициент корреляции $r^2=0.454$.

Показатель степени уравнения зависимости интенсивности дыхания мнемииопсиса от концентрации сухой массы в опытах равен 0,56, тогда как показатель степени в уравнении зависимости скорости дыхания (values of respiration rate) равен 0,89, а для интенсивности дыхания (specific respiration rates) – 0,11 (рис. 2 А). Т.е., зависимость интенсивности дыхания у мнемииопсиса от экспериментальной концентрации живой массы оказалась более сильной, чем от индивидуальной массы тела. Показатель степени в уравнении последней зависимости (рис. 2 А, В) не подчиняется закону $3/4$ (Minkina et al., 1996; Минкина и др., 2006; Dodds et al., 2001; Glazier, 2006; Минкина, Самышев, 2009; Alcaraz, 2016).

С учетом этой зависимости, после приведения данных к одной температуре – 23°C (в мае опыты выполнялись при 14°C), для выбранной базовой величины плотности посадки (100 мг сухого веса л $^{-1}$) были рассчитаны суточные тренды интенсивности дыхания для трех модальных классов этого гребневика: личинок от 0,55 до 5 мм, молоди и взрослых особей длиной 7,7–20 мм и 20–47 мм на всем полигоне (Минкина, Павлова, 1995), используя данные, полученные весной и осенью (табл 1, рис. 3).

Метод предполагает последовательное исключение составляющих разброса измеряемых величин дыхания, связанных с условиями эксперимента. Средняя за сутки величина энергетического обмена вида, рассчитываемая по тренду, принимается за «норму» ($R/W_{100\%}$). Влияние конкретной океанографической ситуации на состояние популяций планктона описывается оставшейся компонентой вариабельности интенсивности метаболизма организмов данной видовой принадлежности. Рассчитываются величины отклонений (в %) средних результатов за интервал времени T экспериментов (R/W_{av}), выполненных в различных узлах сетки станций, от средней величины в выделенном для всего полигона тренду за этот же интервал времени (R/W_T), отнесенных к полученной «норме» для всей обследуемой акватории:

$$\Delta = \left(\frac{R'}{W_{av}} - \frac{R'}{W_T} \right) / \frac{R'}{W_{100\%}}, \quad (4)$$

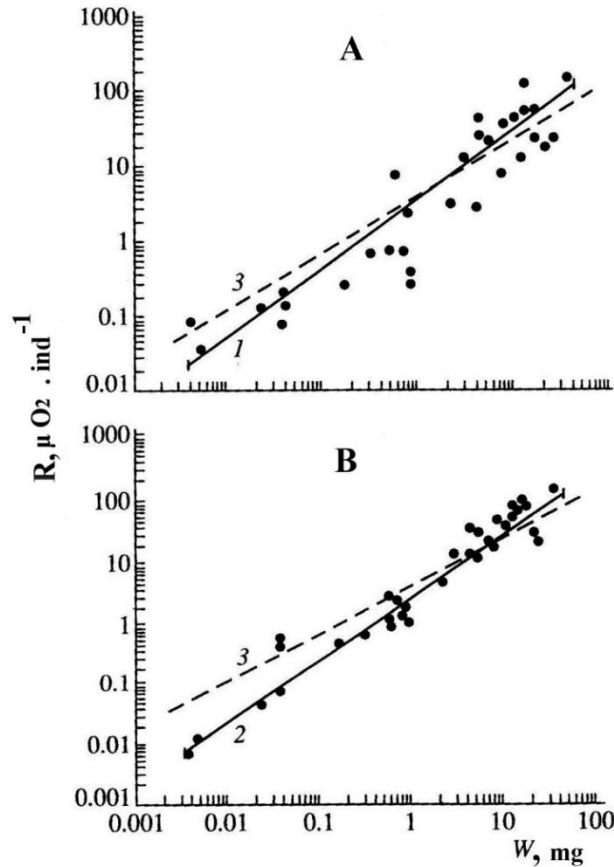


Рис. 2. Связь скорости дыхания черноморского *M. leidy* (R , $\mu\text{O}_2 \cdot \text{экз}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$) и сухой массой тела W при 23°C по (Минкина, Павлова, 1995). А – параметр Cw – переменная величина; В – $Cw = C_0 = 100 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$. 1 – $R = 3,20W^{(0,89+0,07)}$, $n=31$, $r^2=0,963$; 2 – $R_0 = 2,64W^{(0,98+0,05)}$, $n=31$, $r^2=0,936$; 3 – общее уравнение стандартного обмена (у *Coelenterata* и *Stenophora* при 16°C (Ивлева, 1981, табл. 9), приведенное к 23°C : $R = 3,82 W^{0,752}$.

Таблица 1.

Суточная изменчивость уровня энергетического обмена гребневика-вселенца *Mnemiopsis leidy* в северной части Черного моря при температуре 23°C

Время суток	Личинки, сухая масса тела менее 0,5 мг. Ср. = 0,081 мг				Взрослые гребневики, размерная группа от 0,5 до 5 мг. Ср. = 2,099 мг				Взрослые гребневики с массой тела более 5 мг. Ср. = 15,862 мг			
	R/Ср.	n	σ	$\pm t_{\alpha}$	R/Ср.	n	σ	$\pm t_{\alpha}$	R/Ср.	n	σ	$\pm t_{\alpha}$
0	4,26	8	3,15	1,83	3,98	7	2,43	1,51	1,63	4	1,52	1,25
1	2,62	8	0,91	0,53	2,69	11	1,53	0,76	10,85	4	17,29	14,22
2	2,94	8	1,87	1,09	1,40	8	1,18	0,68	-	-	-	-
3	4,93	8	3,05	1,77	0,58	8	0,54	0,32	-	-	-	-
4	3,95	8	3,73	2,17	1,04	8	0,86	0,50	-	-	-	-
5	4,27	2	4,36	5,07	1,32	2	0,40	0,46	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	5,77	4	6,82	5,61	5,48	6	1,72	1,15	-	-	-	-
11	5,23	8	4,68	2,72	2,85	16	3,38	1,39	2,66	2	0,38	0,44
12	7,35	8	8,64	5,02	1,64	16	1,39	0,57	1,20	4	0,80	0,66
13	6,66	11	5,71	2,83	2,71	20	2,77	1,02	4,70	6	6,84	4,59

Время суток	Личинки, сухая масса тела менее 0,5 мг. Wср. = 0,081 мг				Взрослые гребневики, размерная группа от 0,5 до 5 мг. Wср. = 2,099 мг				Взрослые гребневики с массой тела более 5 мг. Wср. = 15,862 мг			
	R/Wср.	n	σ	$\pm t_{\alpha}$	R/Wср.	n	σ	$\pm t_{\alpha}$	R/Wср.	n	σ	$\pm t_{\alpha}$
14	9,38	10	11,55	6,01	5,92	22	6,55	2,30	3,98	12	4,52	2,14
15	6,70	7	11,14	6,93	2,98	20	4,40	1,62	5,54	21	5,64	2,02
16	5,05	16	6,56	2,70	2,35	20	2,61	0,96	5,35	25	5,44	1,79
17	6,29	16	10,14	4,17	2,64	21	2,06	0,74	3,38	19	4,93	1,86
18	5,56	13	8,68	3,96	3,98	12	4,90	2,33	3,20	17	3,04	1,21
19	0,70	4	0,51	0,42	2,48	12	1,72	0,82	2,90	8	2,01	1,17
20	3,64	2	-	-	3,10	13	1,54	0,70	5,19	8	2,03	1,18
21	-	-	-	-	4,12	14	4,00	1,76	3,83	8	4,31	2,51
22	-	-	-	-	7,62	6	5,32	3,57	11,94	5	2,40	1,76
23	12,48	8	4,76	2,77	2,45	4	2,48	2,04	3,54	4	2,57	2,11
Средне суточные величины	5,77	149	7,10	0,96	3,01	246	3,49	0,37	4,56	147	5,18	0,70

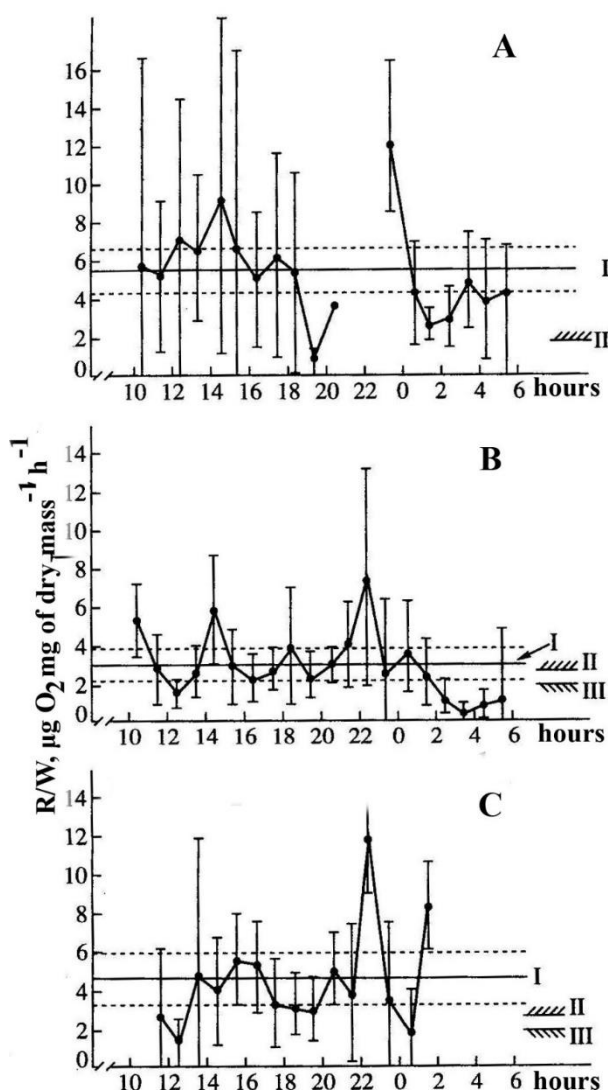


Рис. 3. Суточный ритм энергетического обмена черноморского *M. leidy* при выбранной базовой величине концентрации живой массы в опытах $C_0 = 100 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ по (Минкина, Павлова, 1995). I – среднесуточная величина интенсивности дыхания; пунктир – статистическая «норма», принятая за 100%. На рисунке нанесены ее доверительные интервалы при 95%-ном уровне значимости. Уровень II – величина, рассчитанная по уравнению (2); уровень III – величина, рассчитанная по уравнению (4). А – личинки; В – взрослые особи средних размеров; С – крупные особи.

Результаты исследований

На основании собственного массива данных (табл. 2) построены карты вариабельности уровня энергетического обмена личинок и половозрелых *M. leidy* в мае и сентябре 1992 г. (рис. 4, 5). Известно, что структура скоплений мнемииопсиса испытывает существенные сезонные колебания (Виноградов и др., 1992; Хорошилов, 1993; Грузов и др., 1994; Mutlu, 1999). E. Mutlu проанализировал распределение этого гребневика в разные сезоны с 1991 по 1995 годы в южной и юго-западных районах Черного моря. Он обнаружил, что максимумы биомассы мнемииопсиса приурочены к антициклоническим вихрям, а минимумы концентрации наблюдались в районах с циклоническим подъемом вод.

Нам удалось захватить диаметрально противоположные состояния популяции мнемииопсиса: от внезапной депрессии в марте-июле 1992 г. с доминированием младших возрастных групп и минимальной численностью над шельфом северо-западной части моря (по оценкам (Мединец и др., 1994) запас в северной половине моря составлял 4–16 млн. т) до мощной вспышки численности этого гребневика, связанной с активным размножением в мелководных районах моря. Численность его в северо-западной части Черного моря в сентябре 1992 г. достигала 1–2 тыс. экз. м⁻², а запас на исследованной акватории моря – 39 млн. т. В январе-феврале 1993 г. последовало снижение запаса гребневика до 10 млн. т.

На рисунках 4 и 5 приведены полученные нами поля отклонений от «нормы» (в % по отношению к ней) величин интенсивности энергетического метаболизма, измеренных в различных узлах сетки полигона и преобразованных согласно нашему методу. В мае (при очень низкой численности мнемииопсиса) наблюдалось ингибирование уровня энергетического метаболизма (ЭМ) у его половозрелых особей на всем полигоне с минимумами в приустьевом районе Дуная (на 100%), на свале глубин в антициклоническом образовании в Каламитском заливе (на 100%) и в прибрежной части Кавказского побережья между Туапсе и Сочи (на 120%). (рис. 4 А). Только в конвергентной зоне открытой части моря южнее Крыма (Георгиев и др., 1994), которая хорошо видна на карте распределения температура воды в верхнем перемешанном слое (рис. 4 D), выявлена практически «норма» уровня ЭМ у половозрелых крупных гребневиков (-1,7 %). Но именно в открытых районах моря, в основном в продуктивных конвергентных зонах над свалом глубин, сохраняется после массового размножения популяция в виде редких, но крупных половозрелых особей (Грузов и др., 1994).

В условиях мощной вспышки численности в сентябре (пик размножения) наблюдались обширные зоны повышенного уровня ЭМ личинок мнемииопсиса в мелководной северо-западной части и пониженного - в глубоководной части моря (рис. 5 В). Массовое размножение мнемииопсиса в Черном море начинается при прогреве поверхностных слоев до 20–22°C в прибрежной части моря, у Керченского пролива и устьев рек (Грузов и др., 1994). Выявленная область повышенного обмена гребневиков в восточной части моря до +90% от статистической «нормы» у этого пролива действительно ограничивается изотермами 20–23° (рис. 5 D). В других районах моря, где температура была уже ниже, нерест закончился, популяция была ослабленной (негативная направленность отклонений ЭМ от «нормы») вплоть до гибели отнерестившихся особей (Грузов и др., 1994). В северо-западной части моря минимумы уровня ЭМ половозрелых особей зарегистрированы в приустьевых районах Днепра (-70%) и Дуная (-60%).

Таблица 2

Пространственная изменчивость уровня энергетического обмена гребневника-вселенца *Mnemiopsis leidyi* в северной части Черного моря в мае и сентябре 1992 г. при температуре 23°C

№ станции	Координаты		Время проведения эксперимента	Средняя длина особей в опыте, мм	Средняя сухая масса особей в опыте, мг	Концентрация массы в опыте С _м , мкг/мл	Скорость ливания Р _л , мкг О ₂ /экз*ч	Интенсивность ливания R/W, мкг О ₂ . мг*ч				Отклонение от «горды», %
	Широта, °N	Долгота, °O						при перемене	С _в	С _п	Приведенная к С _в на к С _п = 100 мкг/мл	
Личинки, сухая масса тела менее 0,5 мг. Wср. = 0,081 мг, R/W _{100%} = 5,77 мкг О ₂ . мг*ч												
96 к	42,5	39	16 ⁰⁰ -23 ³⁰	2	0,04	60,7	0,1	2,56	1,94	1,97	4,25	-39,5
96 к	- "	- "	16 ⁰⁰ -19 ³⁰	3	0,18	139,0	0,33	1,88	2,25	2,22	4,4	-37,8
93 к	43,85	38,92	23 ⁰⁰ -5 ³⁰	0,55	0,003	5,4	0,1	24,47	5,4	5,74	5,06	11,8
93 к	- "	- "	23 ⁰⁰ -5 ¹⁵	0,5	0,003	24,4	0,04	8,38	3,81	4,04	5,06	-17,7
81 к	44,25	38	13 ¹⁵ -18 ⁰⁰	5	0,33	72,2	0,8	2,46	2,05	1,99	6,82	-83,7
21 к	43,5	35,02	10 ⁰⁰ -14 ¹⁵	2,5	0,02	23,8	0,14	5,72	2,58	2,64	6,88	-73,5
40,2 к	46	32,65	10 ⁰⁰ -14 ¹⁵	2	0,04	279,0	0,17	4,33	7,67	7,78	6,88	15,6
Взрослые гребневники, размерная группа от 0,5 до 5 мг. Wср. = 2,099 мг, R/W _{100%} = 3,01 мкг О ₂ . мг*ч												
97 к	42,13	40	1 ¹⁵ -6 ⁰⁰	9	0,9	267,0	0,51	0,57	0,98	1,00	1,41	-13,6
97 к	- "	- "	1 ¹⁵ -5 ³⁰	9	0,9	217,0	0,46	0,51	0,79	0,8	1,41	-20,3
81 к	44,25	38	13 ¹⁵ -18 ⁰⁰	7,7	0,73	67,2	2,93	4,01	3,22	3,29	3,32	-1,0
81 к	- "	- "	13 ³⁰ -18 ⁰⁰	20	4,63	16,7	49,2	10,61	3,92	3,86	3,32	17,9
66,1 к	44,95	36,9	14 ³⁰ -22 ¹⁵	7	0,59	21,6	9,03	15,30	6,53	6,69	3,91	92,4
24 к	44,98	30,98	11 ⁰⁰ -21 ⁴⁵	8,1	0,64	93,2	0,87	1,36	1,31	1,34	3,16	-60,5
21 к	43,5	35,02	10 ⁰⁰ -14 ¹⁵	7,7	0,55	106,0	0,94	1,73	1,78	1,83	3,72	-62,8
39 к	45,37	31,98	10 ⁰⁰ -18 ¹⁵	16	4,1	328,0	3,28	0,8	1,55	1,53	3,39	-61,8
55	43,5	34	10 ⁰⁰ -13 ⁴⁰	15	3,12	46,5	15	4,81	3,14	3,12	3,17	-1,7
25	44,5	31,2	17 ⁵⁵ -22 ³⁰	13	2,28	100,0	3,74	1,64	1,64	1,64	3,96	-77,1
35	43,5	32	20 ¹⁵ -1 ³⁰	18	4,64	108,0	29	6,24	6,46	6,36	4,17	72,8
Взрослые гребневники с массой тела более 5 мг. Wср. = 15,862 мг, R/W _{100%} = 4,56 мкг О ₂ . мг*ч												
77 к	43,5	37	16 ⁰⁰ -18 ³⁰	2,3	7,4	178	10	1,36	1,87	1,9	3,96	-45,2
77 к	- "	- "	15 ⁰⁰ -18 ⁴⁵	27,5	8,22	132	41,6	5,06	5,89	5,97	4,37	35,1
77 к	- "	- "	17 ³⁰ -18 ⁴⁵	38	26,4	47,6	2,4	0,09	0,06	0,06	3,31	-71,3
65 к	44,8	35	14 ¹⁵ -18 ⁴⁵	47	37,6	69,2	2,52	0,07	0,05	0,05	4,29	-93,0
53,1 к	44,58	34,5	11 ¹⁵ -14 ⁴⁵	17	5,31	105	0,71	0,13	0,14	0,14	3,14	-65,8
55 к	43,5	34	18 ⁰⁰ -21 ⁴⁰	38	13,6	25,4	1,83	0,13	0,06	0,06	3,78	-81,6
55 к	- "	- "	14 ³⁰ -16 ¹⁵	27	11,2	225	1,02	0,09	0,14	0,14	4,96	-105,7
39 к	45,37	31,98	11 ³⁰ -18 ⁰⁰	26,5	17,7	278	0,97	0,05	0,1	0,1	3,83	-81,8
81	44,25	38	15 ⁰⁰ -16 ⁴⁵	37,5	23	6,5	1,74	0,08	0,02	0,02	5,45	-119,1
20,1	45,5	30	13 ⁰⁰ -16 ⁰⁰	25	9,49	71,6	0,9	0,09	0,08	0,08	4,89	-105,5
25	44,5	31,2	17 ⁵⁵ -22 ¹⁵	32	16,26	122,9	1,34	0,08	0,09	0,09	5,41	-116,7
35	43,5	32	21 ⁴⁵ -1 ³⁰	30	14,13	109,8	1,21	0,09	0,09	0,09	5,86	-126,5

* индекс «к» - данные получены в сентябре на НИС «Э. Кренкель»

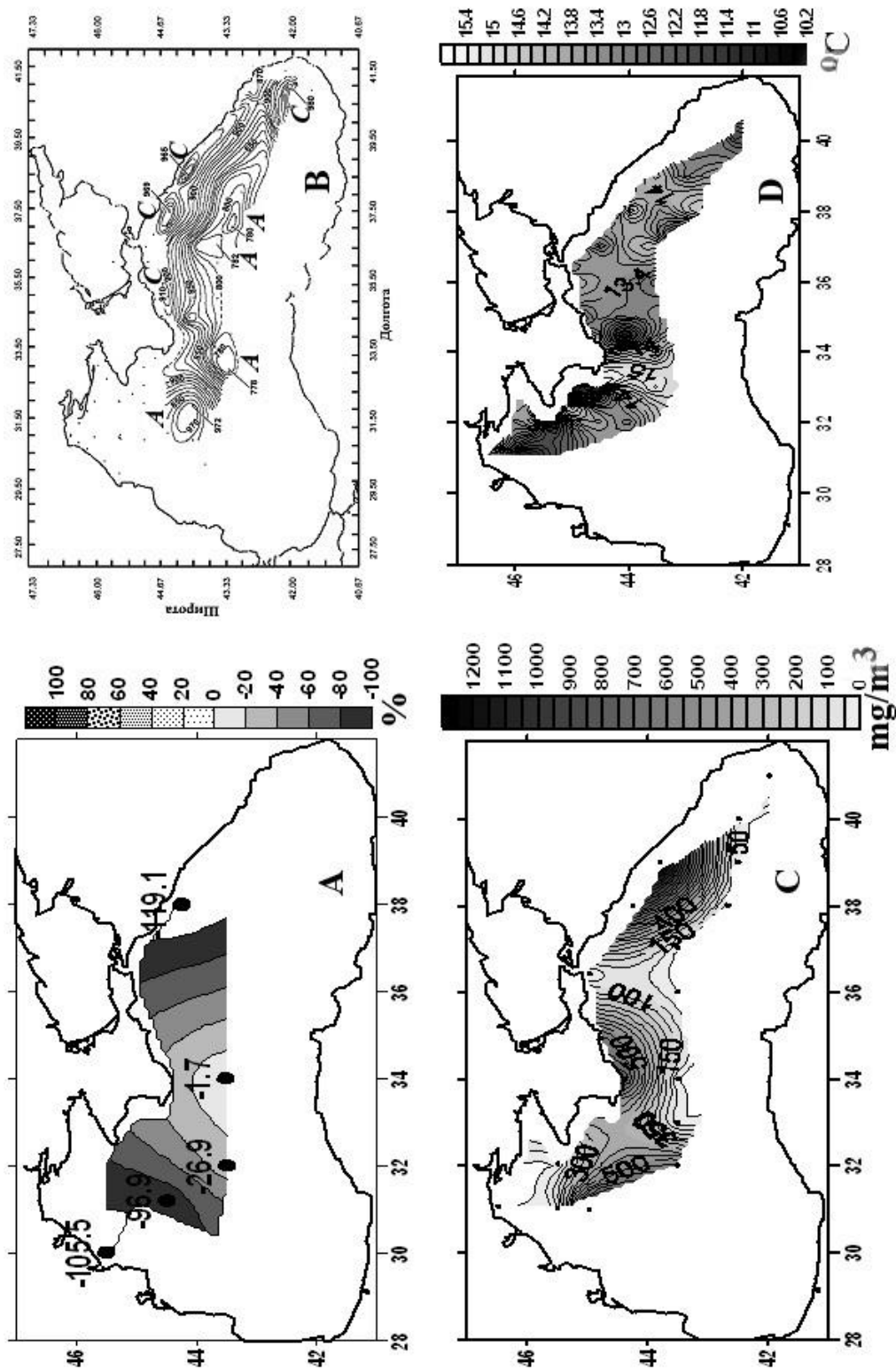


Рис. 4. Поле неоднородности энергетического метаболизма (в % отклонений от статистической «нормы») половозрелых *M.leidy* (A) и его связь с гидродинамическими условиями (B, D) в мае 1992 г. B – распределение динамических высот (дин. мм) относительно горизонта 10 м по (Георгиев и др., 1994). C – распределение биомассы гребневиков в верхнем перемешанном слое (Грузов и др., 1994); D – распределение средневзвешенной температуры в верхнем перемешанном слое. Буквами A обозначены антициклоны, C – циклоны.

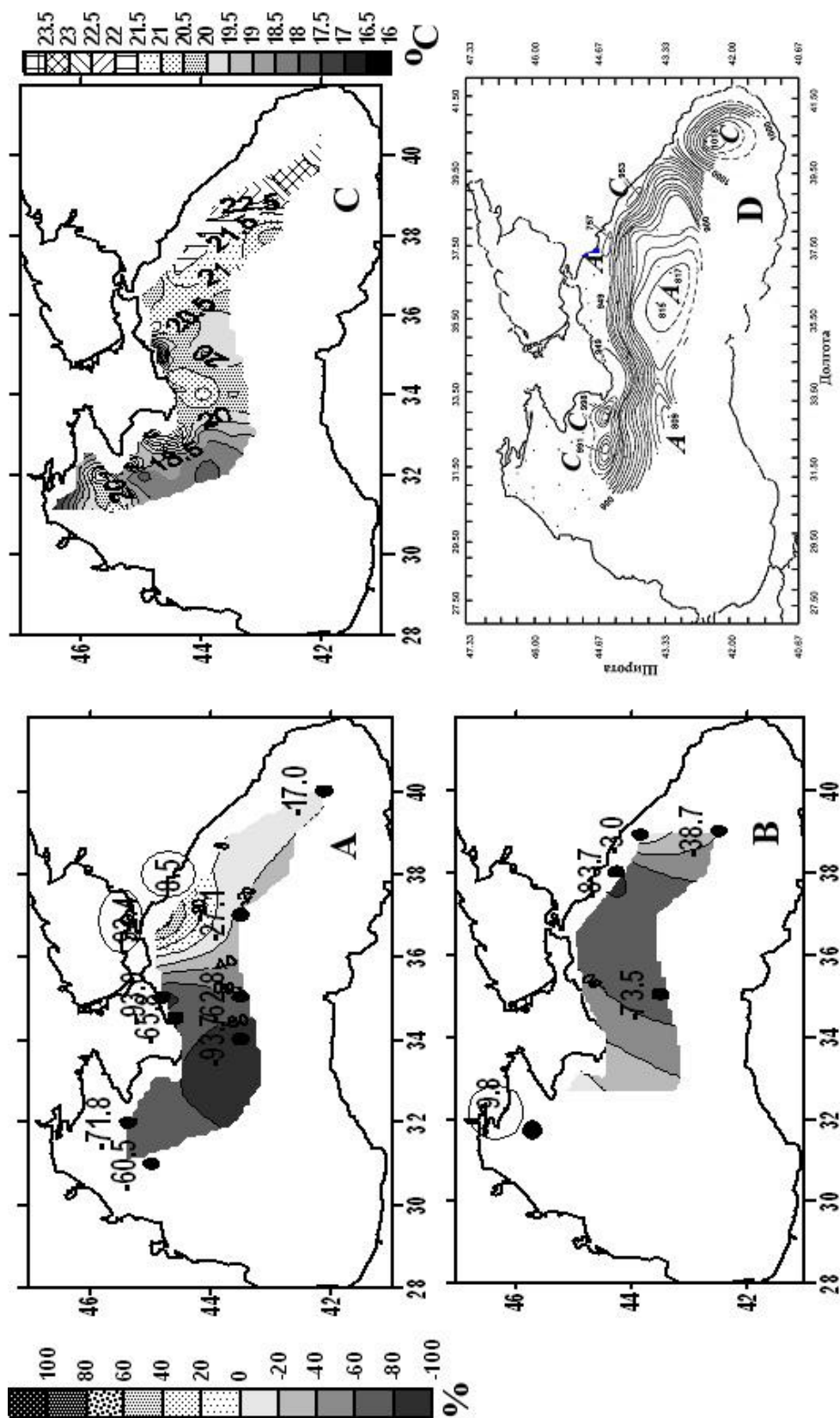


Рис. 5. Поля неоднородности энергетического метаболизма (в % отклонений от статистической «нормы») половозрелых (А) и личинок (В) *M. leidy* в сентябре 1992 г. и их связь с гидродинамическими условиями. С – распределение средневзвешенной температуры в верхнем перемешанном слое; D – распределение динамических высот (дин. мм) относительно горизонта 10 м по (Георгиев и др., 1994). На рис. 5 А позитивные значения отклонений энергетического метаболизма выделены кружками.

Выводы

Разработан метод мониторинга «благополучия» пелагиали на основании оценки пространственной variability уровня энергетического обмена массовых видов зоопланктона. Метод предполагает исключение составляющих разброса измеряемых величин интенсивности дыхания, связанных с условиями эксперимента и суточным ритмом. Влияние гетерогенности среды описывается оставшейся компонентой изменчивости интенсивности дыхания данного вида.

На основе выполненных экспериментов получены векторные поля отклонений уровня энергетического обмена от статистической «нормы» у гребневика-вселенца в Черное море *M. leidy*.

Совместный анализ полей распределения абиотических характеристик среды северной половины Черного моря весной и осенью 1992 г. («до береговой период»), структурных параметров планктонного сообщества и отклонений уровня энергетического метаболизма черноморской популяции мнемипсиса позволил выявить основные факторы, определяющие характер и уровень физиологического «отклика» молоди и половозрелых особей этого гребневика на комплекс изменений, происходящих в среде и в ходе сезонной сукцессии планктона. Таковыми являются кормовые условия, орографический фактор и активность процесса размножения популяции.

Основным фактором, ингибирующим жизнедеятельность гребневиков, является дефицит пищи, имеющий место во время зимней и ранневесенней фазы сезонной сукцессии планктонного сообщества. Негативная направленность отклонений энергетического метаболизма от «нормы» наблюдалась также у ослабленной после нереста части популяции мнемипсиса.

Таким образом, разработанный нами метод мониторинга на основании оценки пространственной variability уровня энергетического обмена массовых видов зоопланктона позволяет получить интегральную оценку влияния на жизнедеятельность их популяций гетерогенных условий среды при разных сценариях развития планктонного сообщества.

Выявляемая пространственная изменчивость вектора и уровня энергетического обмена у отдельных групп зоопланктона (например, копепод, личинок моллюсков и рыб и т.п.) может служить показателем уровня ингибирующего влияния на них негативных факторов среды, в том числе загрязнения. Метод может быть также полезен для оконтуривания границ воздействия поллютантов на гидробионтов.

Список литературы

1. Ивлева И.В. Температура среды и скорость энергетического обмена у водных животных. – Киев: Наук. думка, 1981.– 232 с.
2. Виноградов М.Е., Сапожников В.В., Шушкина Э.А. Экосистема Черного моря. – М.: Наук, 1992. 112 с.
3. Георгиев В.Т., Герасимов С.А., Попов Ю.И. Гидродинамическое состояние открытых вод северной половины Черного моря в 1992-1993 гг. // Исследование экосистемы Черного моря: Сб. науч.тр. (Министерство охраны окружающей природной среды Украины, Укр. науч. Центр экологии моря). – Вып.1. Одесса, 1994. С. 17–23.
4. Грузов Л.Н., Люмкис П.В, Нападовский Г.В. Исследования пространственно-временной структуры планктонных полей северной половины Черного моря в 1992-93 гг. / Исследование экосистемы Черного моря: Сб. науч.тр. (Министерство охраны окружающей природной среды Украины, Укр. науч. Центр экологии моря). – Вып.1. Одесса, 1994. С. 94–127.

5. Мединец В.И., Грузов Л.Н., Орлова И.Г., Василева В.Н., Попов Ю.И. Исследование годового цикла основных элементов экосистемы северной части Черного моря // Исследование экосистемы Черного моря: Сб. науч.тр. (Министерство охраны окружающей природной среды Украины, Укр. науч. Центр экологии моря).– Вып.1. Одесса, 1994. С. 12–16.
6. Минкина Н.И. Пространственная вариабельность уровня энергетического обмена зоопланктона (методика оценки) // Системы контроля окружающей среды. Средства, модели и мониторинг: Сб. науч. тр. – Севастополь, 2007. С.318–324.
7. Минкина Н.И. Основной энергетический обмен у массовых видов копепод / Механизмы образования скоплений и функционирования планктона в экосистемах Индийского океана / Т.С. Петипа (науч. ред.) и др.; [отв. ред. Э.З. Самышев]; Рос. акад. наук, Ин-т мор. биол. исслед. им. А.О. Ковалевского. – Белгород: КОНСТАНТА; Севастополь, 2017. Гл. 11, С. 268–291.
8. Минкина Н.И., Павлова Е.В. Суточные изменения интенсивности дыхания гребневика *Mnemiopsis leidyi* в Чёрном море // Океанология. 1995. Т.35, № 2. С. 241–245.
9. Минкина Н.И., Павлова Е.В., Самышев Э.З., Гордина А.Д. Энергетический обмен икры, личинок и мальков черноморской камбалы калкан и его изменения в условиях загрязнения // Системы контроля окружающей среды. Методические, технические и программные средства: Сб. науч. тр. – Севастополь, 2006. С. 347–356.
10. Минкина Н.И., Самышев Э.З. Опыт оценки пространственной изменчивости энергетического обмена планктонных животных на примере желетелых Черного моря и Антарктики // Системы контроля окружающей среды. Средства, информационные технологии и мониторинг: Сб. науч. тр. / НАН Украины. МГИ: – Севастополь, 2009. С. 360–369.
11. Павлова Е.В. Движение и энергетический обмен морских планктонных организмов. – Киев: Наукова думка, 1987. 212 с.
12. Петипа Т.С. О жизненных формах пелагических копепод и вопрос о структуре трофических уровней // Структура и динамика водных сообществ и популяций. – Киев: Наук. думка, 1967. С. 108–109.
13. Попов А.Е. О связи интенсивности энергетического обмена водных организмов с концентрацией их массы в условиях эксперимента // Экология морских организмов. – Киев: Наук. думка, 1987. С.98–104.
14. Самышев Э.З. Антарктический криль и структура планктонного сообщества в его ареале. – М.: Наука, 1991. 168 с.
15. Самышев Э.З., Лушов А.И., Ефимов В.С. Об изменении интенсивности обмена гидробионтов в процессе адаптации к условиям опыта (на примере *Idotea baltica basteri* из Черного моря) // Гидробиол. журн. 1980. Т. 16, вып. 6. С. 94–96.
16. Сущеня Л.М. Интенсивность дыхания ракообразных. – Киев: Наук. думка, 1972.– 195 с.
17. Хайлов К.М., Попов А.Е. Концентрация живой массы как регулятор функционирования водных организмов // Экология моря. 1983. Вып. 15. С. 3–15.
18. Хайлов К.М., Празукин А.В., Минкина Н.И., Павлова Е.В. Концентрация и функциональная активность живого вещества в сгущениях разного уровня организации // Успехи соврем. биол. 1999. Т. 119, № 1. – С.3–14.
19. Хорошилов В.С. Сезонная динамика черноморской популяции гребневика *Mnemiopsis leidyi* // Океанология. – 1993. –Т. 33, № 4. С. 558–562.
20. Шушкина Э.А., Виноградов М.Е. Изменения планктонного сообщества открытых районов Черного моря и воздействия на него гребневика мнемипсиса (1978–1989 гг.) // Изменчивость экосистемы Черного моря: естественные и антропогенные факторы. М.: Наука, 1991. С. 249–291.
21. Alcaraz M. Marine zooplankton and the metabolic theory of ecology: is it a predictive tool? // J. Plankton Res. 2016. Vol. 38, N 3. P. 762–770.

22. Allen J. I., Polimene L. Linking physiology to ecology: towards a new generation of plankton models // *J. Plankton Res.* 2011. Vol.33. P. 989–997.
23. Båmstedt U. ETS-activity as an estimator of respiratory rate of zooplankton populations. The significance of variations in environmental factors // *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 1980. Vol. 42, N 2. P. 267–283.
24. Barneche D., Kulbicki M., Floeter S., Friedlander A., Maina J., Allen A.P. Scaling metabolism from individuals to fish communities at broad spatial scales // *Ecol. Lett.* 2014. Vol. 17. P. 1067–1076.
25. de Bello F., Lavorel S., Díaz S., Harrington R., Cornelissen J.H.C., Bardgett R.D., Berg M.P. et al. Towards an assessment of multiple ecosystem processes and services via functional traits // *Biodivers. Conserv.* 2010. Vol. 19. P. 2873–2893.
26. Boaden P.J.S. Adaptation of intertidal sand meiofaunal oxygen uptake to temperature and population density // *Sci. Mar.* 1989. Vol. 53, N 2-3. P. 329–334.
27. Brown J.H., Gillooly J.F., Allen A.P., Savage V.M., West G.B. Toward a metabolic theory of ecology // *Ecology.* 2004. Vol. 85. P. 1771–1789.
28. Calow P. Toward a definition of functional ecology // *Funct. Ecol.* 1987. Vol. 1. P. 57–61.
29. Dodds P.S., Rothman D.H., Weitz J.S. Re-examination of the ‘3/4-law’ of metabolism // *J. Theor. Biol.* 2001. Vol. 209. P. 9–27.
30. Glazier D.S. The 3/4-power law is not universal: evolution of isometric, ontogenetic metabolic scaling in pelagic animals // *BioScience.* 2006. Vol. 56. P. 325–332.
31. Hébert M-P., Beisner B. E., Maranger R. Linking zooplankton communities to ecosystems functioning: toward an effect-trait framework (HORIZONS) // *J. Plankton Res.* 2016. Vol. 00. P. 1–10.
32. Hemmingsen A.M. Energy metabolism as related to body size and respiratory surfaces and its evolution // *Rep. Steno. memorial hospital Nordisk insulin lab. Copenhagen, 1960.* Vol.9. P. 7–110.
33. Ikeda T. The effect of laboratory conditions on the extrapolation of experimental measurements to the ecology of marine zooplankton // *Mar. Biol.* 1980. Vol.58, № 4. P.285–293.
34. Kearney M., Porter W. Mechanistic niche modelling: combining physiological and spatial data to predict species’ ranges // *Ecol. Lett.* 2009. Vol. 12. P. 1–17.
35. Kjørboe T., Hirst A.G. Shifts in mass scaling of respiration, feeding, and growth rates across life-form transitions in marine pelagic organisms // *Am. Nat.* 2014. Vol.183. E118–E130.
36. Minkina N.I., Pavlova E.V., Sazhina L.I. Diurnal rhythm on energy metabolism at different stages of development of *Calanus euxinus* and *Acartia clausi* from the Black Sea // *Sixth Intern. Conf. on Copepoda.* (Oldenburg-Bremerhaven, Germany, 29 July-3 Aug. 1996). Oldenburg-Bremerhaven, 1996. P. 81.
37. Mutlu E. Distribution and abundance of ctenophores and their zooplankton food in the Black Sea. II. *Mnemiopsis leidyi* // *Marine Biology.* 1999. Vol. 135. P. 609-613.
38. Tilman D., Hillerislambers J., Harpole S., Dybzinski R., Fargione J., Clark C., Lehman C. Does metabolic theory apply to community ecology? It’s a matter of scale // *Ecology.* 2004. Vol. 85. P. 1797–1799.

**SPATIAL VARIABILITY OF ENERGETIC METABOLISM OF BLACK SEA
CTENOPHOR *MNEMIOPSIS LEIDYI* AGASSIZ, 1865**

Minkina N.I.

*A.O.Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation,
e-mail: niminkina@yandex.ru*

A method of monitoring of «well-being» of pelagial on the basis of an estimation of spatial variability of energetic exchange level is developed of mass species of zooplankton is developed. The method supposes the exception of components of dispersion of the measured values of specific respiration rate,

related to its daily rhythm and experimental conditions. Effect of heterogeneity of environment is described to a remaining component of variability of specific respiration rate values of this specie.

On the basis of the fulfilled experiments with the use of this method the vector fields of deviations of level of energetic exchange at combjelly-invader *M. leidy* from the statistical «norm» are received in the north half of the Black sea. Main factors, determining nature and level of physiological response of young and adult individuals of the combjelly on the complex of changes what is going in an environment and during seasonal succession of plankton, are revealed. Such are food conditions, an orographic factor and an activity of reproduction of a population.

The revealed spatial changeability of vector and level of exchange level at the single populations of zooplankton (for example, copepods, larvae of molluscs and fishes, etc.) can be as the index of level of the inhibited impact on them of negative factors of environment, including contamination. The method can be also useful to a contouring of scopes of influence of pollutants on hydrobionts.

Key words: Black Sea; *Mnemiopsis leidy*; energetic metabolism; daily rhythm; spatial variability; heterogeneity of environment.

Минкина
Наталья
Иосифовна

кандидат биологических наук, старший научный сотрудник,
ведущий научный сотрудник отдела функционирования морских
экосистем, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей
им. А.О. Ковалевского РАН», e-mail: niminkina@yandex.ru

Поступила в редакцию 13.03.2020 г.

УДК 595.34:591.9(267.37)

ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОПЕПОД СЕМЕЙСТВА EUCALANIDAE (COPEPODA: CALANOIDA) В АРАВИЙСКОМ МОРЕ *

Прусова И.Ю.

ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН»,
г. Севастополь, Российская Федерация,
e-mail: iprusova@gmail.com

В данной работе охарактеризованы количественные показатели и вертикальное распределение 10 видов веслоногих раков семейства Eucalanidae (Copepoda: Calanoidea) в Аравийском море в слое 0–1000 м на основе зоопланктонных материалов, собранных в рамках программы US JGOFS на акватории между Оманом и Индией севернее 10° с.ш. в весенний межмуссонный период (март–апрель) 1995 г. Выявлено два типа распределения по вертикали в исследованном слое: 1) с преимущественным обитанием видов в эпипелагиали над слоем оксиклина и в верхней переходной зоне (*Pareucalanus attenuatus* s. l., *Subeucalanus mucronatus*, *S. pileatus*, *S. subcrassus* и *S. subtenuis*) и 2) с нахождением основной массы популяции в пределах слоя минимума кислорода, на глубинах 300–800 м (*Eucalanus elongatus*, *Rhincalanus nasutus*, *R. rostrifrons*, *S. crassus*, *P. smithae*). Отмечен факт пространственного разобщения ядер популяций двух близкородственных видов *S. subtenuis* и *S. mucronatus*: первый из перечисленных сосредоточен, в основном, в водах с нормальным или пониженным уровнем содержания кислорода, а второй концентрируется в слое оксиклина. На основе анализа возрастной структуры популяций в исследуемом материале сделано предположение о существовании онтогенетических миграций у *S. crassus*. Выявлено отсутствие выраженных суточных миграций у исследованных видов.

Ключевые слова: Eucalanidae; копеподы; вертикальное распределение; Аравийское море.

Введение

Веслоногие ракообразные семейства Eucalanidae, включающего 24 номинальных вида (Goetze, Ohman, 2010) – неперенный компонент зоопланктона в тропической, бореальной и нотальной зонах Мирового океана. Виды этого семейства являются первичными консументами и могут достигать высокой численности (Гейнрих, 1990; Acros, Fleminger, 1986; Lavaniegos, Lopez-Cortes, 1997; Suarez-Morales, 1998). Будучи одними из самых крупноразмерных копепод, эукаланиды нередко доминируют в зоопланктоне по биомассе (Виноградов, Арашкевич, 1969; Мусаева, Колосова, 1995; Прусова, Смит, 2005). Широкая распространенность и существенный вклад эукаланид в общую численность и биомассу зоопланктона обуславливают их высокую значимость в продукционных процессах океанических планктонных сообществ и предопределяют необходимость изучения их экологии и биогеографии. Однако экологические характеристики эукаланид все еще исследованы слабо, особенно в тропических областях океанов, в том числе и в Аравийском море, где отмечены 11 видов эукаланид, представляющих все 4 рода этого семейства: *Eucalanus elongatus* (Dana, 1849), *Pareucalanus attenuatus* (Dana, 1849), *P. sewelli* (Fleminger, 1973), *P. smithae* Prusova, 2007, *Rhincalanus nasutus* Giesbrecht, 1888, *R. rostrifrons* (Dana, 1849), *Subeucalanus crassus* (Giesbrecht, 1888), *S. mucronatus* (Giesbrecht, 1888), *S. pileatus* (Giesbrecht, 1888), *S. subcrassus* (Giesbrecht, 1888) и *S. subtenuis* (Giesbrecht, 1888) (Prusova et al., 2012).

Характерной особенностью Аравийского моря является наличие очень мощного подповерхностного слоя минимального содержания кислорода (далее по тексту МСК),

* Работа выполнена в рамках госзадания ФИЦ ИнБЮМ РАН по теме: № АААА-А18-118020890074-2 «Закономерности формирования и антропогенная трансформация биоразнообразия и биоресурсов Азово-Черноморского бассейна и других районов Мирового океана».

что определяет особенности вертикального распределения пелагических организмов в данной акватории. Во всем диапазоне глубин от 50–100 до 1000–1250 м количество кислорода очень низкое и довольно постоянно держится на уровне 0,09–0,14 мл/л (Виноградов, 1968; Morrison et al., 1999). Слой резкого градиента кислорода представляет собой для многих организмов непреодолимую преграду (Виноградов, Воронина, 1961; Brinton, 1979; Marra et al., 1998), тем не менее, известно, что в пределах слоя дефицита кислорода в Аравийском море регистрируется довольно много видов копепод (Bottger-Schnack, 1996; Wishner et al., 2000), в том числе и эукаланид (Madhupratap, Haridas, 1990; Wishner et al., 2008). Имеются сведения о границах встречаемости по вертикали 6 видов эукаланид по материалам ловов протяженностью 200 м (Madhupratap, Haridas, 1990). Информации о характере вертикального распределения эукаланид в пределах верхнего 200-метрового слоя в данном регионе, в том числе и о суточных вертикальных перемещениях, в литературе нет.

Целью настоящей работы является исследование вертикального распределения всего комплекса видов семейства Eucalanidae в слое 0–1000 м и изучение мелкомасштабного распределения эукаланид в эпипелагиали в северо-западной и центральной части Аравийского моря.

Материалы и методы

Материалом для настоящей работы послужили сборы зоопланктона, выполненные в Аравийском море в рамках программы US JGOFS (U.S. Joint Global Ocean Flux Study) в ходе комплексной океанографической экспедиции TTN043 на НИС "Thomas G. Thompson", в весенний межмуссонный период (март–апрель) 1995 г. Пробы собирали сетью МОКНЕСС (MOCNESS: Multiple Opening/Closing Net and Environmental Sensing System) с площадью входного отверстия 1,0 м² и размером ячеей фильтрующего сита 153 мкм на 7 стандартных станциях (рис. 1) в ходе дневных и ночных послонных ловов в слоях 300–250, 250–200, 200–150, 150–100, 100–75, 75–50, 50–25 и 25–0 м станциях S3, S7, S11, S15 и N7, и ловов в слоях 1000–900, 900–800, 800–700, 700–600, 600–500, 500–400, 400–300, 300–250, 250–200, 200–150, 150–100, 100–75, 75–50, 50–25 и 25–0 м на станциях S2 и S4 (табл. 1).

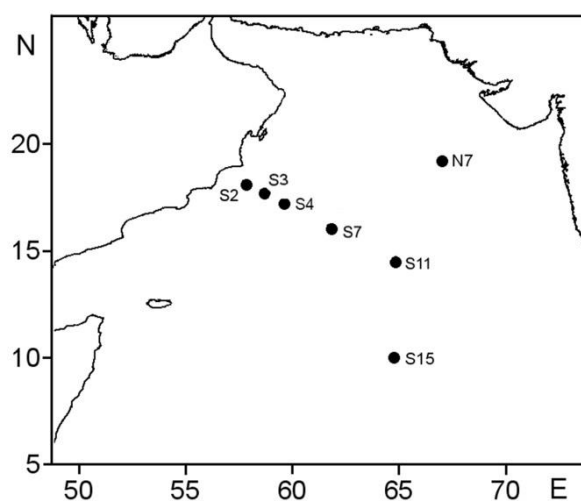


Рис. 1. Схема станций

Для анализа качественного и количественного состава копепод использовалась часть (6,25–25 %) первоначальной пробы, доведенная до объема 50–100 мл. При камеральной обработке рачков размером менее 1 мм просчитывали в подпробах объемом

1 мл, более крупных особей – в подпробах объемом 5 мл, взятых с помощью штемпель-пипетки Гензена. Редко встречающихся рачков подсчитывали во всей анализируемой пробе. Половозрелых и большую часть ювенильных особей копепод определяли, как правило, до видового уровня. Копеподитные стадии всех эукаланид определяли до уровня вида. В проанализированном материале выявлены все 11 видов семейства Eucalanidae, указанные в литературе для данного региона (Prusova et al., 2012). Из-за отсутствия четких морфологических различий между как взрослыми, так и неполовозрелыми особями *Pareucalanus attenuatus* и *P. sewelli*, на основании которых их можно идентифицировать при массовой обработке проб (Prusova et al., 2012), количественные данные по этим видам были объединены в категорию *P. attenuatus* s.l. (sensu lato). Данные по гидрологии (температура, соленость, кислород, биогены) получены на веб-сайте Бюро управления данными биологической и химической океанографии (BCO-DMO): <https://www.bco-dmo.org/project/2043>. По договоренности с координатором программы US JGOFS проф. Шэрон Смит (Sharon Smith, the Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science, University of Miami), предоставившей пробы для обработки, у автора есть право анализировать полученные данные и публиковать результаты.

Таблица 1.

Сводная информация о местоположении станций, глубине ловов и количестве проб

Станция	Широта (N)	Долгота (E)	Дата	Номер лова	Время начала лова	Максимальная глубина лова, м	Количество проб
N7	19.26	67.05	18.03.1995	2	11:37	299	8
	19.25	67.16	18.03.1995	3	20:56	299	8
S15	10.08	64.77	24.03.1995	5	18:11	295	8
S11	14.49	64.93	26.03.1995	6	11:29	295	5
	14.60	64.99	26.03.1995	7	22:14	199	6
S7	16.06	61.83	30.03.1995	10	12:21	296	8
	15.99	62.00	31.03.1995	11	22:57	200	6
S4	17.30	59.82	02.04.1995	12	12:00	299	8
	17.25	59.77	03.04.1995	13	17:50	1008	16
S3	17.64	58.91	05.04.1995	14	23:54	296	8
S2	18.07	57.89	06.04.1995	15	10:42	295	8
	18.07	57.89	06.04.1995	16	20:05	997	14

Результаты и обсуждение

Гидрологические показатели в районе исследования

Вертикальные профили температуры, солености и количества растворенного кислорода в слое 0–1000 м на станциях S2 и S4 показаны на рис. 2. Снижение всех этих показателей начиналось на глубинах 30–50 м. Слой оксиклина был очень узкий, и от глубины 80–100 м начинался слой МСК, где содержание кислорода не превышало значений 0,1–0,3 мл/л. В пределах слоя 100–400 м наблюдались колебания значений солености, что указывает на слоистость водных масс на этих глубинах. В нижележащих слоях соленость и температура понижались довольно плавно. На станциях S3, S7, S11, S15 и N7 нижняя граница слоя оксиклина находилась не ниже 150 м.

Вертикальное распределение видов семейства Eucalanidae в слое 0–1000 м.

Вертикальное распределение эукаланид на станциях S2 и S4 имело особенности у каждого из 10 проанализированных видов (рис. 3). *E. elongatus* отмечен во всей толще 0–1000 м, как насыщенных кислородом водах, так и в зоне МСК, с максимальной численностью в слое 400–500 м. Виды *P. smithae*, *R. nasutus*, *R. rostrifrons* и *S. crassus* не

встречались у поверхности, и так же как и *E. elongatus*, были наиболее многочисленны на глубинах более 300 м, в слое МСК. При этом *P. smithae* был самым глубоководным – основная часть популяции этого вида находилась ниже 400 м с наибольшей плотностью на глубине 800–1000 м. Следует отметить, что характер вертикального распределения этих видов на обеих станциях был сходным – с максимумами численности на близких горизонтах. Исключение составляет *R. rostrifrons* – у этого вида на станции S4 был иной тип распределения, что, возможно, обусловлено его низкими численностью и встречаемостью на этой станции.

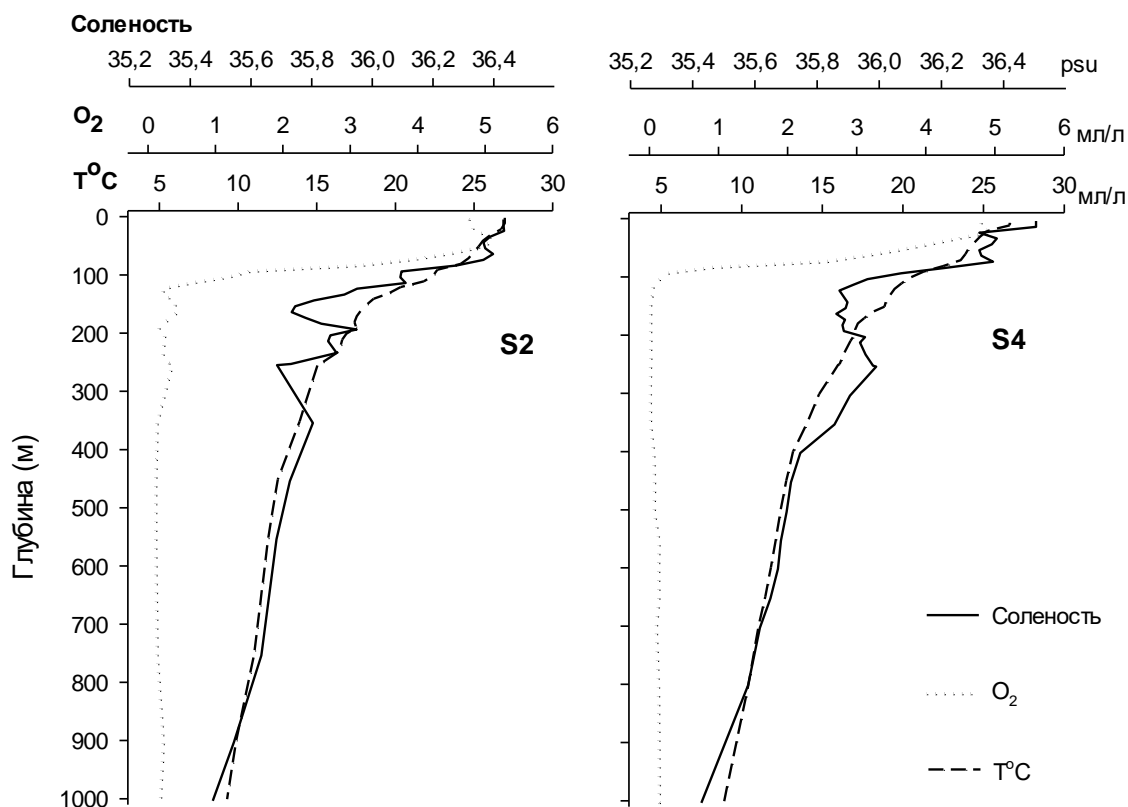


Рис. 2. Вертикальные профили показателей температуры, солености и растворенного кислорода в слое 0–1000 м на станциях S2 и S4 в весенний межмуссонный период 1995 г.

Виды *P. attenuatus* s.l., *S. mucronatus*, *S. pileatus*, *S. subcrassus* и *S. subtenuis*, в отличие от вышеперечисленных, сосредоточены в верхних 300 м, в водах с нормальным и пониженным содержанием кислорода. Среди этой группы видов самым поверхностным является *S. pileatus* – основная часть его популяции находилась в слое 0–25 м. *P. attenuatus* s.l., *S. mucronatus*, *S. subcrassus* и *S. subtenuis* имели максимальную численность в более глубоких слоях – в пределах 50–150 м.

Исходя из выявленного характера вертикального распределения эукаландид в слое 0–1000 м в весенний межмуссонный период в северо-западной части Аравийского моря и принимая во внимание гидрологические показатели водных масс, виды семейства Eucalanidae можно разделить на две группы, имеющие разные типы распределения: с преимущественным нахождением в 1) кислородной или 2) бескислородной зоне. В первую группу входят четыре вида рода *Subeucalanus* (из пяти видов этого рода, отмеченных в данном материале): *S. mucronatus*, *S. pileatus*, *S. subcrassus* и *S. subtenuis*, а также *P. attenuatus* s.l. Представителями второй группы являются виды рода *Rhincalanus*: *R. nasutus* и *R. rostrifrons*, а также *E. elongatus*, *S. crassus* и *P. smithae*. Следует отметить,

что виды рода *Subeucalanus* из первой группы – наиболее мелкоразмерные из эукаланид (1,8–3,4 мм), и самый мелкий из них – *S. pileatus*, обитающий в самом верхнем, фотическом слое эпипелагиали. Виды второй группы – более крупные (3,0–6,5 мм), и один из самых крупных (*P. smithae* – 5,3–6,1 мм) отмечен в настоящем материале на самых больших глубинах.

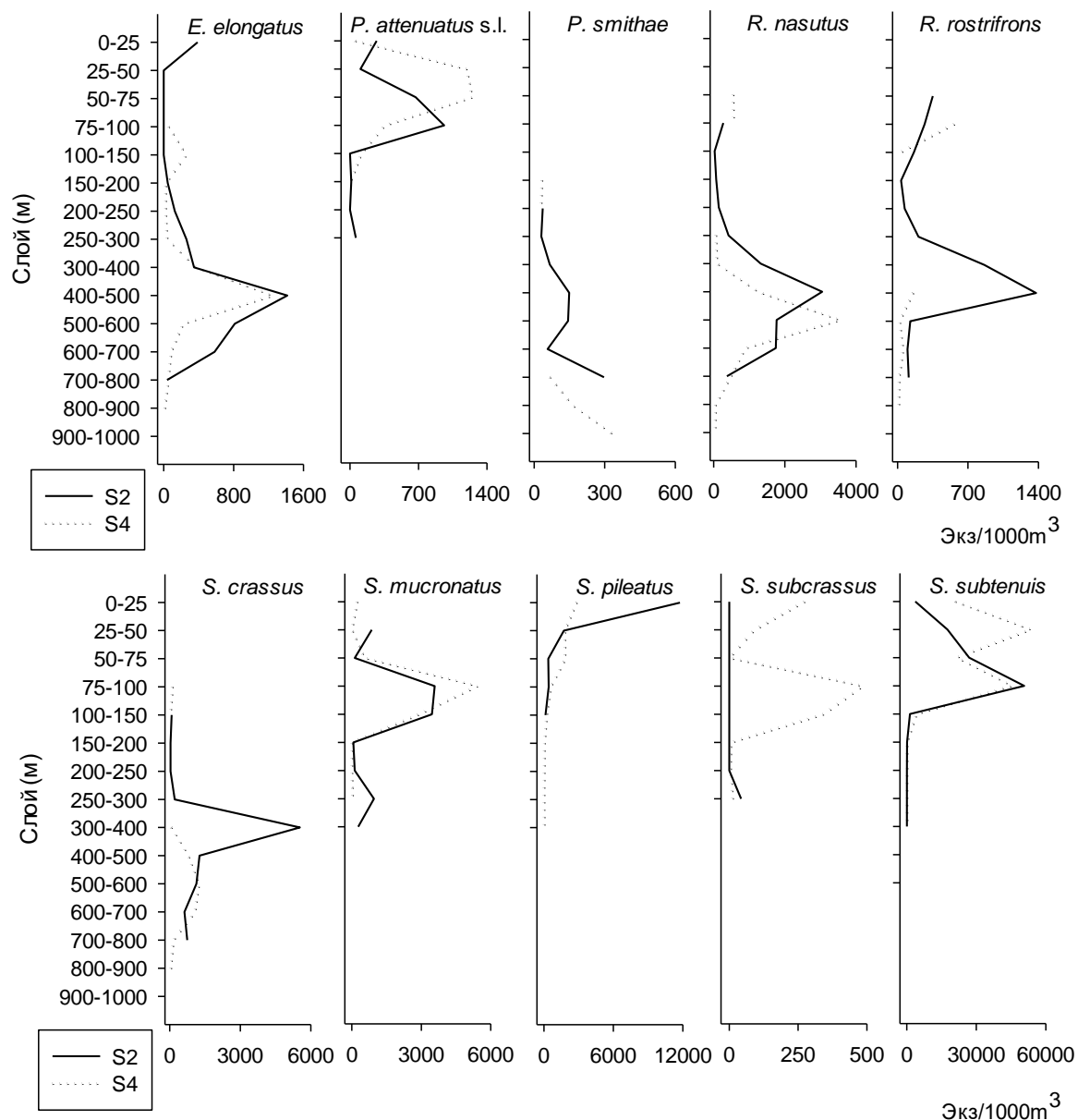


Рис. 3. Вертикальные профили среднесуточной численности видов семейства Eucalanidae в слое 0–1000 м на станциях S2 и S4.

Выявленный характер вертикального распределения эукаланид косвенно свидетельствует о степени толерантности этих видов к содержанию растворенного кислорода. Очевидно, что уровень этой толерантности у видов второй группы выше. Присутствие видов первой группы на глубинах более 200 м в малых количествах можно объяснить их случайным попаданием в эти слои, например, при перемещениях водных масс, а также естественным процессом пассивного погружения части ослабленных или отмирающих особей.

Наличие слоя минимума кислорода является общей чертой экваториальных и тропических вод, но единственный другой регион Мирового океана, который может

сравниться с Аравийским морем по протяженности слоя МСК, это восточная часть тропической зоны Тихого океана (ВТТО), где минимальные концентрации кислорода также отмечены в пределах глубин от 50–200 до 800–1000 м (Fiedler, Talley, 2006). Для ВТТО показано, что лимитирующей концентрацией кислорода для большинства организмов зоопланктона является концентрация менее 0,2 мл/л (Longhurst, 1967).

По литературным данным, в ВТТО, где так же, как и в Аравийском море, верхняя граница слоя МСК находится довольно высоко, *S. pileatus*, *S. subcrassus*, *S. subtenuis* также обитают над ней. Диапазон глубин, в котором эти виды отмечены в тропической зоне Тихого океана, для *S. pileatus* составляет, в основном, 0–100 м, для *S. subtenuis* – 0–250 м (Chen, 1986; Longhurst, 1985; Timonin, Voronina, 1977). При расположении в ВТТО термоклина в слое 35–85 м и верхней границы слоя МСК на глубине около 100 м, большая часть популяции *S. pileatus* обитает в верхнем 50-метровом слое, *S. subcrassus* – в слое 40–60 м, а *S. subtenuis* сосредоточен, в основном, в слое 50–80 м (Longhurst, 1985). В Атлантическом океане верхняя граница слоя МСК (там, где он имеется) располагается глубже, чем в ВТТО и Аравийском море (Fiedler, Talley, 2006). Возможно, поэтому *S. pileatus* и *S. subcrassus* у Канарских островов образуют скопления в более глубоких слоях – на глубинах 400–600 м (Roe, 1972). Приведенные литературные данные позволяют полагать, что выявленный в настоящей работе характер вертикального распределения эукаландид в Аравийском море не является случайным, временным, свойственным исключительно весеннему сезону, и перечисленные виды рода *Subeucalanus* можно отнести к оксифильным организмам.

Сравнительный анализ численности видов эукаландид показал существенное преобладание *S. subtenuis* (рис. 4 А). Доля этого вида в общей численности семейства составляла в среднем 53,9 %. Наименее обильными были *S. subcrassus* и *P. attenuatus* s.l. с вкладом в общую численность семейства 0,3 и 1,1 %, соответственно.

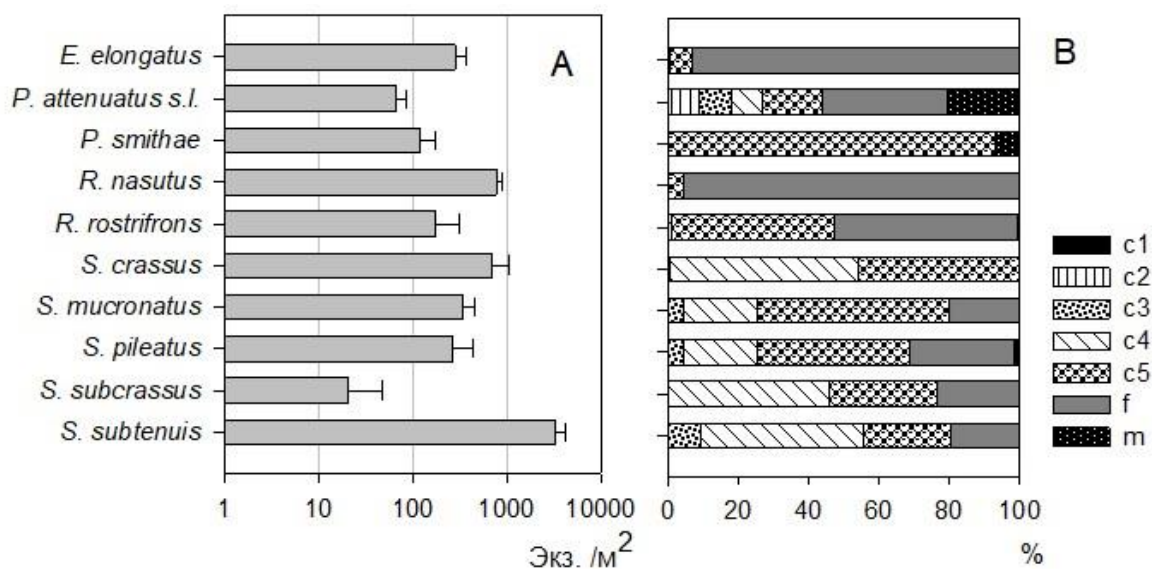


Рис. 4. Средняя численность (А) (экз. под 1 м² + станд. откл.) и возрастная структура популяций (В) эукаландид в столбе воды 0–1000 м на станциях S2 и S4. с1–с5 – копеподитные стадии 1–5, f – самки, m – самцы.

Данные о возрастном составе эукаландид в столбе воды 0–1000 м представлены на рис. 4 В. Материалы ловов на двух станциях не дают достаточных сведений для того, чтобы достоверно оценить вертикальную изменчивость возрастной структуры, особенно в популяциях самых малочисленных из представленных видов. Тем не менее, можно отметить факт отсутствия половозрелых самок в популяции *S. crassus*. Это вид был

представлен только копеподами четвертой и пятой стадий при относительно высокой общей численности. Факт отсутствия самок наряду с сосредоточением основной массы популяции в середине слоя МСК в весенний период может означать, что рачки старших копеподитных стадий находятся в состоянии диапаузы, и, следовательно, виду *S. crassus* могут быть свойственны онтогенетические миграции.

Онтогенетические миграции отмечены у ряда крупноразмерных видов копепод, в частности, многих видов семейства Calanidae (Kobari, Ikeda, 2001; Shimode et al., 2009; и др.) и некоторых видов Eucalanidae, в частности, *Eucalanus bungii* (Shoden et al., 2005), *E. inermis* (Hidalgo et al., 2005), обитающих, в основном, в высоких широтах, где происходит естественная смена сезонов, и весеннее цветение фитопланктона обеспечивает вторичных консументов пищей. Об указанных видах известно, что в зимний период стадию покоя на больших глубинах претерпевают их старшие копеподиты и самки, поднимаясь к поверхности в теплое время года.

Аравийское море, являясь тропическим водоемом, имеет сезонность, обусловленную муссонной системой атмосферной циркуляции. В летний период в северо-западной части моря происходит мощный подъем глубинных вод, приносящий к поверхности биогены и вызывающий цветение фитопланктона. Для Аравийского моря указан диапазирующий вид семейства Calanidae – *Calanoides natalis* (ранее определяемый как *C. carinatus*), покоящиеся популяции которого находятся в течение осенне-весеннего времени на глубине 400–800 м и состоят почти исключительно из копеподитов пятой стадии (Peterson, 1998; Idrisi et al., 2004). Самки появляются только летом после подъема перезимовавших копеподитов на поверхность. Возможно, *S. crassus* имеет жизненный цикл, сходный с циклом *C. natalis*. На основании выявленного характера вертикального распределения можно предположить наличие сезонных миграций также у *R. nasutus*, но вряд ли – у *P. smithae*, поскольку в популяции *P. smithae* имеются самцы, а самцы, в соответствии с известными нам литературными данными, не отмечены находящимися в стадии покоя.

Вертикальное распределение эпипелагических видов семейства Eucalanidae в слое 0–300 м.

С целью изучения мелкомасштабного вертикального распределения эукаланид в эпипелагиали были проанализированы данные по численности видов, основная масса которых сосредоточена выше 300 м – *P. attenuatus* s.l., *S. mucronatus*, *S. pileatus*, *S. subcrassus* и *S. subtenuis*. В анализе использовали данные по численности этих видов на станциях S2, S3, S4, S7, S11, S15, N7. Данные по *E. elongatus*, *R. nasutus*, *R. rostrifrons*, *S. crassus* и *P. smithae* не рассматривались, поскольку в эпипелагиали эти виды весьма малочисленны. Полученные результаты представлены на рис. 5.

P. attenuatus s.l. и *S. subtenuis*. были довольно равномерно распределены в толще 0–150 м. Основная часть популяции *S. pileatus* находилась над слоем оксиклина, ядра популяций *S. mucronatus* и *S. subcrassus* находились в нижней части слоя оксиклина, т.е. там, где концентрация кислорода приближалась к минимальной.

Заслуживает внимания факт различия в характере вертикального распределения между видами в парах *S. mucronatus* vs *S. subtenuis* и *S. subcrassus* vs *S. pileatus*. Виды в каждой из этих пар очень близки генетически (Goetze, 2003). Кроме того, морфологические различия (в том числе, и в общей длине тела) между видами в парах минимальны, из чего следует, что виды питаются объектами одного размерного спектра, и между ними должны быть сильны пищевые конкурентные взаимоотношения. Условия среды в слоях максимальных концентраций видов из каждой пары (100–150 м для *S. mucronatus* и *S. subcrassus* и 0–50, 0–100 м для *S. pileatus* и *S. subtenuis*) отличаются не только уровнем растворенного кислорода, но и показателями таких параметров, как температура и содержание биогенов. Выявленная пространственная разобщенность

основных скоплений *S. mucronatus* vs *S. subtenuis* и *S. subcrassus* vs *S. pileatus* и приуроченность их к определенным слоям могут свидетельствовать о том, что сумма требований к условиям среды у видов в парах различна. Вероятно, разъединенность по вертикали способствует репродуктивной изоляции симпатричных популяций этих близкородственных видов. Однако выявленный факт требует подтверждения на большем количестве материала, особенно в отношении *S. subcrassus*, так как в настоящем исследовании численность данного вида была очень мала.

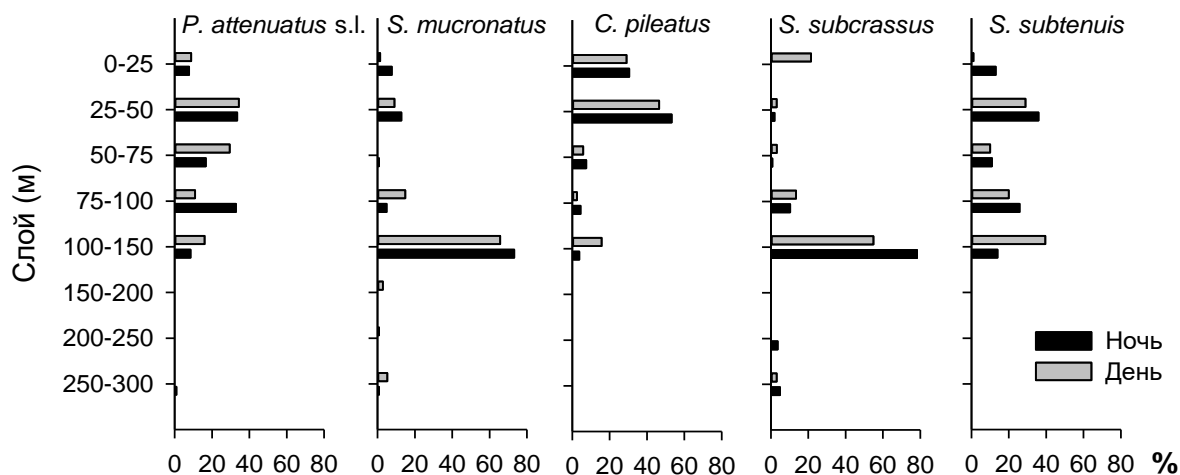


Рис. 5. Вертикальное распределение численности эпипелагических эукаланид (выраженной в процентах от общего количества особей вида под 1 м² поверхности) в дневное и ночное время в слое 0–300 м в Аравийском море в период весеннего межмуссонного периода. Результаты усреднены для станций S2, S3, S4, S7, S11, S15, N7.

Характер вертикального распределения относительной численности в дневное и ночное время был весьма сходным у всех эпипелагических видов (рис. 5). Ярко выраженного перераспределения численности в пределах слоя 0–300 м, т.е. вертикального перемещения в течение суток ядра популяции, не выявлено ни у одного из исследованных видов. Полученные результаты подтверждают имеющиеся в литературе немногочисленные данные по другим районам Мирового океана, свидетельствующие о том, что эукаланиды не относятся к организмам зоопланктона, совершающим интенсивные суточные миграции.

Выводы

В ходе проведенного исследования выявлено два типа распределения видов семейства Eucalanidae по вертикали в слое 0–1000 м: 1) с преимущественным обитанием видов в эпипелагиали над слоем оксиклина и в верхней переходной зоне (*Pareucalanus attenuatus* s. l., *S. mucronatus*, *S. pileatus*, *S. subcrassus* и *S. subtenuis*) и 2) с нахождением основной массы популяции в пределах слоя минимума кислорода, на глубинах 300–800 м (*Eucalanus elongatus*, *Rhincalanus nasutus*, *R. rostrifrons*, *S. crassus*, *P. smithae*). Отмечен факт пространственного разобщения ядер популяций двух близкородственных видов *S. subtenuis* и *S. mucronatus*: первый из перечисленных сосредоточен, в основном, в водах с нормальным или пониженным уровнем содержания кислорода, а второй концентрируется в слое оксиклина. На основе анализа возрастной структуры популяций в исследуемом материале сделано предположение о существовании онтогенетических миграций у *S. crassus*. Выявлено отсутствие выраженных суточных миграций у исследованных видов.

Благодарности

Автор выражает благодарность проф. Шэрон Смит (Sharon Smith, the Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science, University of Miami) за предоставление проб зоопланктона и всестороннее содействие при выполнении данной работы, а также рецензентам за ценные замечания.

Список литературы

1. Виноградов М.Е. Вертикальное распределение океанического зоопланктона – М.: Наука, 1968. 320 с.
2. Виноградов М.Е., Арашкевич Е.Г. Вертикальное распределение интерзональных копепод-фильтраторов и их роль в сообществах различных глубин в северо-западной части Тихого океана // Океанология. 1969. Т. 9. С. 399–409.
3. Виноградов М.Е., Воронина Н.М. Влияние дефицита кислорода на распределение глубоководного планктона северной части Индийского океана // Океанология. 1961 Т. 2, № 4. С. 670–678.
4. Гейнрих А.К. Численность массовых океанических видов копепод в Беринговом море // Биол. моря. 1990. Т. 2. С. 14–18.
5. Мусаева Е.И., Колосова Е.Г. Закономерности распределения зоопланктона Охотского моря и прикурильских вод Тихого океана летом 1992 и 1993 гг. // Океанология. 1995. Т. 35, № 5. С. 713–718.
6. Прусова И.Ю., Смит Ш. Таксономический состав, численность и биомасса копепод в эпипелагиали Аравийского моря в периоды летнего и зимнего муссонов 1995 г. // Морск. экол. журн. 2005. Т. 4, № 4. С. 72–86.
7. Acros F., Fleminger A. Distribution of filter-feeding calanoid copepods in the eastern equatorial Pacific // Cal. Coop. Ocean. Fish. 1986. Vol. 27. P. 170–187.
8. Böttger-Schnack R. Vertical structure of small metazoan plankton, especially on-calanoid copepods I. Deep Arabian Sea // J. Plankton Res. 1996. Vol. 18 (7). P. 1073–1101.
9. Brinton E. Parameter relating to the distribution of planktonic organisms, especially euphausiids in the eastern tropical Pacific // Prog. Oceanogr. 1979. Vol. 8. P. 125–189.
10. Chen Y.Q. The vertical distribution of some pelagic copepods in the eastern tropical Pacific // Cal. Coop. Ocean. Fish. 1986. Vol. 27. P. 205–227.
11. Fiedler P.C., Talley L.D. Hydrography of the eastern tropical Pacific: a review // Progr. Oceanogr. 2006. Vol. 69. P. 143–180.
12. Goetze E. Cryptic speciation on the high seas; global phylogenetics of the copepod family Eucalanidae // Proc. R. Soc. Lond., Biol. sci. 2003. Vol. 270, № 1531. P. 2321–2331.
13. Goetze E., Ohman M.D. Integrated molecular and morphological biogeography of the calanoid copepod family Eucalanidae // Deep-Sea Res. 2010. II, 57 (24–26) P. 2110–2129.
14. Hidalgo P., Escribano R., Morales C.E. Annual life cycle of the copepod *Eucalanus inermis* at a coastal upwelling site off Mejillones (23°S), northern Chile // Mar. Biol. 2005. № 146. P. 995–1003.
15. Idrisi N., Olascoaga M., Garraffo Z., Olson D., Smith S. Mechanisms for emergence from diapause of *Calanoides carinatus* in the Somali Current // Limnol. Oceanogr. 2004. Vol. 49. P. 1262–1268.
16. Kobari T., Ikeda T. Ontogenetic vertical migration and life cycle of *Neocalanus plumchrus* (Crustacea: Copepoda) in the Oyashio Region, with Notes on regional variations in body sizes // J. Plankton. Res. 2001. Vol. 23, No. 3. P. 287–302.
17. Lavaniegos B.E., Lopez-Cortes D. Fatty acid composition and community structure of plankton from the San Lorenzo Channel, Gulf of California // Estuar. Coast. Shelf Sci. 1997. Vol. 45, №. 6. P. 845–854.

18. Longhurst A.R. Relationship between diversity and the vertical structure of the upper ocean // Deep-Sea Res. 1985. Vol. 32. P. 1535–1570.
19. Longhurst A.R. Vertical distribution of zooplankton in relation to the eastern Pacific oxygen minimum // Deep-Sea Res. 1967. Vol. 14. P. 51–63.
20. Madhupratap M., Haridas P. Zooplankton, especially calanoid copepods, in the upper 1000 m of the south east Arabian Sea // J. Plankton. Res. 1990. Vol. 12, № 2. P. 305–321.
21. Marra J., Dickey T.D., Ho C., Kinkade C.S., Sigurdson D.E., Weller R.A., Barber R.T. Variability in primary production as observed from moored sensors in the central Arabian Sea in 1995. // Deep-Sea Res. 1998. Vol. 45. P. 2253–2268.
22. Morrison J.M., Codispoti L.A., Smith S.L., Wishner K., Flagg C., Gardner W.D., Gaurin S., Naqvi S.W.A., Manghnani V., Prosperie L., Gundersen J.S. The oxygen minimum zone in the Arabian Sea during 1995 // Deep Sea Res. 1999. Vol. 46, № 8–9. P. 1903–1931.
23. Peterson W. Life cycle strategies of copepods in coastal upwelling zones // J. Mar. Systems. 1998. Vol. 15. P. 313–326.
24. Prusova I, S.L. Smith, E. Popova. Calanoid Copepods of the Arabian Sea Region. Sultan Qaboos University Academic Publication Board. – Muscat, Sultanate of Oman. – Sultan Qaboos University Printing Press, 2012. 240 p.
25. Roe H.S.J. The vertical distributions and diurnal migrations of calanoid copepods collected on the SONDA Cruise, 1965. I. The total population and general discussion // J. Mar. Biol. Assoc. UK. 1972. Vol. 52, № 2. P. 277–314.
26. Shimode S., Hiroe Y., Hidaka K., Kazutaka Takahashi K., Tsuda A. Life history and ontogenetic vertical migration of *Neocalanus gracilis* in the western North Pacific Ocean // Aquat. Biol. 2009. Vol. 7. P. 295–306.
27. Shoden S., Ikeda T., Yamaguchi A. Vertical distribution, population structure and lifecycle of *Eucalanus bungii* (Copepoda: Calanoida) in the Oyashio region, with notes on its regional variations // Mar. Biol. 2005. Vol. 146. P. 497–511.
28. Suarez-Morales E. Pelagic copepod assemblages during spring upwelling off the Yucatan Peninsula (1985) // IOC Workshop Report № 142. – Proceed. 2nd Int. Conf., Final report of SCOR/IOC working group 93 "Pelagic biogeography", Noordwijkerhout, the Netherlands, July 9-4, 1995 / Eds. Pierrot-Bults A.C., van der Spoel S. Paris, 1998. P. 345–352.
29. Timonin A.G., Voronina N.M. Net plankton distribution along the equator in the Eastern Pacific Ocean // Polsk. Arch. Hydrobiol. 1977. Vol. 24 Suppl. P. 323–335.
30. Wishner K.F., Gelfman C., Goxing M.M., Outram D.M., Rapien M., Williams R.L. Vertical zonation and distributions of calanoid copepods through the lower oxycline of the Arabian Sea oxygen minimum zone // Prog. Oceanogr. 2008. Vol. 78. P. 163–191.
31. Wishner K.F., Gowing M.M., Gelfman C. Living in suboxia: Ecology of an Arabian Sea oxygen minimum zone copepod // Limnol. Oceanogr. 2000. Vol. 45 (7). P. 1576–1593.

VERTICAL DISTRIBUTION OF EUCALANIDAE (COPEPODA: CALANOIDA) IN THE ARABIAN SEA

Prusova I.Yu.

*A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation,
e-mail: iprusova@gmail.com*

This paper describes the quantitative indicators and vertical distribution of 10 species of Eucalanidae (Copepoda: Calanoida) in the Arabian Sea in the upper 1000 m based on zooplankton materials collected within the frames of the US JGOFS program in the area between Oman and India north of 10° N during the Spring Intermonsoon (March - April) of 1995. Two types of the vertical distribution of eucalanids in the studied layer were revealed, represented by two groups of species: 1) species inhabiting epipelagic zone above the oxycline

and in the upper transition zone (*Pareucalanus attenuatus* s. l., *Subeucalanus mucronatus*, *S. pileatus*, *S. subcrassus* and *S. subtenuis*), and 2) the presence of the bulk of populations within the oxygen minimum zone, at 300-800 m depths (*Eucalanus elongatus*, *Rhincalanus nasutus*, *R. rostrifrons*, *S. crassus*, *P. smithae*). The fact of spatial separation of population cores of two closely related species *S. subtenuis* and *S. mucronatus* was noted: the first of these is concentrated mainly in waters with normal or low oxygen levels, and the second is concentrated in the oxycline layer. Based on the analysis of the age structure of populations in the studied material, an assumption was made about the existence of ontogenetic migrations in *S. crassus*. The absence of pronounced daily migrations in the studied species was revealed.

Key words: Eucalanidae; copepods; vertical distribution; Arabian Sea.

Прусова Кандидат биологических наук, старший научный сотрудник отдела
Ирина планктона, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени
Юрьевна А.О. Ковалевского РАН», e-mail: iprusova@gmail.com

Поступила в печать 15.03.2020 г.

УДК 628.193:665.61:551.35(262.5)

ХИМИКО-МИКРОБИОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ПРИБРЕЖНОЙ АКВАТОРИИ КАЗАНТИПСКОГО ПРИРОДНОГО ЗАПОВЕДНИКА (АЗОВСКОЕ МОРЕ) *

Тихонова Е. А., Бурдиян Н. В.

ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН»,
г. Севастополь, Российская Федерация,
e-mail: tihonova@mail.ru

Проведена химико-микробиологическая оценка донных отложений прибрежной акватории Казантипского природного заповедника (Азовское море) в период с 2013 по 2016 гг. Согласно полученным результатам, донные отложения прибрежной акватории м. Казантип относились к условно-чистым, за исключением илов озера «Нефтяников», расположенного в центре заповедника. Концентрации хлороформ-экстрагируемых веществ в данном озере соответствовали III уровню загрязнения. Охарактеризовано количественное содержание гетеротрофных, углеводородокисляющих, сульфатредуцирующих и тионовых групп бактерий в донных отложениях мыса Казантип в летний период. Численность (кл.·г⁻¹) гетеротрофных бактерий колебалась от 10⁵ до 10⁷, соответственно, углеводородокисляющих – от 1,0 до 10⁴, тионовых – от 4,5·10² до 2,5·10⁵, сульфатредуцирующих – от 1,0 до 1,5·10³. Отмечена высокая степень развития гетеротрофного бактериального сообщества, в том числе и углеводородокисляющих бактерий, на мелководных станциях исследуемой акватории.

Ключевые слова: физико-химические показатели, микробиота, донные отложения, Казантипский заповедник, Азовское море

Введение

Одной из актуальных задач, стоящих перед человечеством, является охрана живой природы в целом и постоянный контроль за состоянием особо охраняемых природных территорий, в частности (Груммо, 2018). На территории Крымского полуострова существует один заповедник, прилегающий к акватории Азовского моря – Казантипский. Заповедник расположен на севере Керченского полуострова, на мысе Казантип в 2 км от г. Щёлкино. Мыс выступает на 2 км в южную часть акватории Азовского моря. Территория входит в северо-восточный подрайон Керченского геоморфологического района. Общая площадь заповедника составляет 450,1 га, из которых 394,1 га – суша и 56 га – акватория Азовского моря (полоса шириной 50 м) (Болтачёв и др., 2016; Бондаренко и др., 2019; Литвинюк, 2016). С запада, севера и востока территория заповедника ограничена акваторией Азовского моря (внешняя граница проходит на расстоянии 50 м от берега), с юга граничит с землями Мысовского сельского поселения. Общая протяженность границ заповедника составляет ориентировочно 20 км, в том числе сухопутных – 10 км (из них внутренних – 7 км, внешних – 3 км), морских – около 10 км. Акватория заповедника (56 га) входит в состав Водно-болотного угодья международного значения «Аквально-скальный комплекс мыса Казантип» общей площадью 251 га (сертификат № 1393 от 29 июля 2004 г., Иран, г. Рамсар) и памятника природы регионального значения (240 га) «Прибрежный аквальный комплекс у мыса Казантип» (охранное обязательство № МПП-008 от 01.06.2012 г.), (Бондаренко, 2019; Литвинюк, 2016).

Охрана территории мыса Казантип и прибрежного аквального комплекса обусловлена наличием уникальных морских отложений, мест скопления птиц. Большой

* Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме государственного задания «Молисмологические и биогеохимические основы гомеостаза морских экосистем» (№ гос. регистрации АААА-А18-118020890090-2).

интерес представляет собой побережье мыса, как образец динамики берега в местах выхода древних мшанковых рифов. Флора и фауна заповедника характеризуется значительной зоологической ценностью, наличием эндемичных видов. К примеру, в Красную книгу Российской Федерации занесено 15 видов фауны и 12 видов флоры заповедника. В Красную книгу Республики Крым записано 83 вида фауны и 55 видов флоры. Подводные луга морских трав в акватории заповедника служат местом нереста аборигенных видов рыб Азовского моря. Через заповедник проходит миграционный путь птиц (Болтачёв и др., 2016; Бондаренко и др., 2019; Литвинюк, 2016; Ereemeev, 2012).

Обрывистые, абразионные берега Казантипа сложены мейотическими мшанковыми известняками (Зенкевич, 1963; Ключин, 1987; Литвинюк, 2016). Мшанковые известняки достаточно рыхлые и пористые, что при выбросе большого количества нефтепродуктов способствует накоплению последних и является источником хронического загрязнения в течение нескольких лет, оказывая негативное воздействие на водорослевую растительность.

В Керченский пролив с кораблей выбрасывается много бытового мусора. Течение в южном створе Керченского пролива направлено вдоль берега с востока на запад и образуется от слияния в районе Керченского пролива Азовского течения и струи северо-западного направления, идущей вдоль берегов Кавказа (Вылканов и др., 1983; Литвинюк, 2016). В то же время в холодный период, когда речной сток резко снижается при дополнительном влиянии ветров, черноморские воды поступают через пролив в Азовское море (Аксенов, 1962; Еремеев и др., 2003). Поскольку побережье Казантипа и аналогичных территориально-аквальных комплексов (у мысов Зюк, Чаганы, Китень, Красный Кут и т.п.) имеет мелкобухтовый характер, участки аккумулятивных галечных, ракушечно-галечных и гравийно-галечных пляжей становятся ловушками для выброшенного мусора. Работники заповедника неоднократно находили в бухтах корабельные швабры, швартовые концы, таблички, турецкую продуктовую тару и др. Учитывая активное освоение шельфа Азовского моря нефтяными и газодобывающими компаниями, значительно возрастает риск загрязнения морской среды в прибрежных водах м. Казантип. Это может крайне негативно сказаться на состоянии прибрежных биоценозов.

На береговую зону природно-аквального комплекса (ПАК) оказывают влияние антропогенно-аккумулятивные процессы, которые характерны для граничащего с ним побережья Арабатского и Казантипского заливов. Это в основном нерегулируемая рекреационная деятельность (розжиг костров, установка палаток, автотранспорта, свалка мусора и т.д.).

В 2000-х годах были проведены исследования ландшафтов Азовского моря. По полученным результатам их состояние было отнесено к четырем уровням: от удовлетворительного до критического. В районе Казантипского побережья оно оценено как конфликтное (2 уровень) (Беспалова, 2007). Основные антропогенные воздействия в данном районе – поиск и добыча полезных ископаемых. Главные экологические проблемы: вселение чужеродных организмов – интродукция, уменьшение биоразнообразия и биомассы бентоса. В тоже время, выполненная интегральная оценка качества среды аквальных природных комплексов Азовского моря позволяет характеризовать данный район моря как слабо загрязненный – грязный (Беспалова, 2007). Это свидетельствует о достаточно высоком уровне антропогенной нагрузки в исследуемом районе. Важным показателем экологического состояния акватории также является и её самоочищающая способность при антропогенной нагрузке (Бурдиян, 2011). Поэтому следует оценивать численность и распространение физиологических групп бактерий – основных деструкторов органического вещества автохтонного и аллохтонного происхождения в морских экосистемах.

Таким образом, проведение систематического экологического контроля за состоянием среды заповедника является объективной необходимостью. В связи с вышеописанным, целью настоящей работы стало физико-химическая (рН, Eh, содержание хлороформ-экстрагируемых веществ, нефтяных углеводородов) и микробиологическая характеристика (концентрации гетеротрофных, углеводородокисляющих, тионовых и сульфатредуцирующих групп бактерий) в донных отложениях наиболее уязвимых участков ПАК (прибрежные участки и участки добычи полезных ископаемых) на мысе Казантип.

Материалы и методы

Пробы донных отложений и прибрежных наносов отбирались в прибрежной акватории Казантипского заповедника ручным пробоотборником с глубин до 1,5 м, а также с борта лодки с глубин до 12 м в летний период (рис. 1). В свежесобранных пробах определяли рН и Eh, а в воздушно-сухих образцах – количество хлороформ-экстрагируемых веществ (ХЭВ) весовым методом и нефтяных углеводородов (НУ) методом ИК-спектрометрии (Методические указания..., 1996).

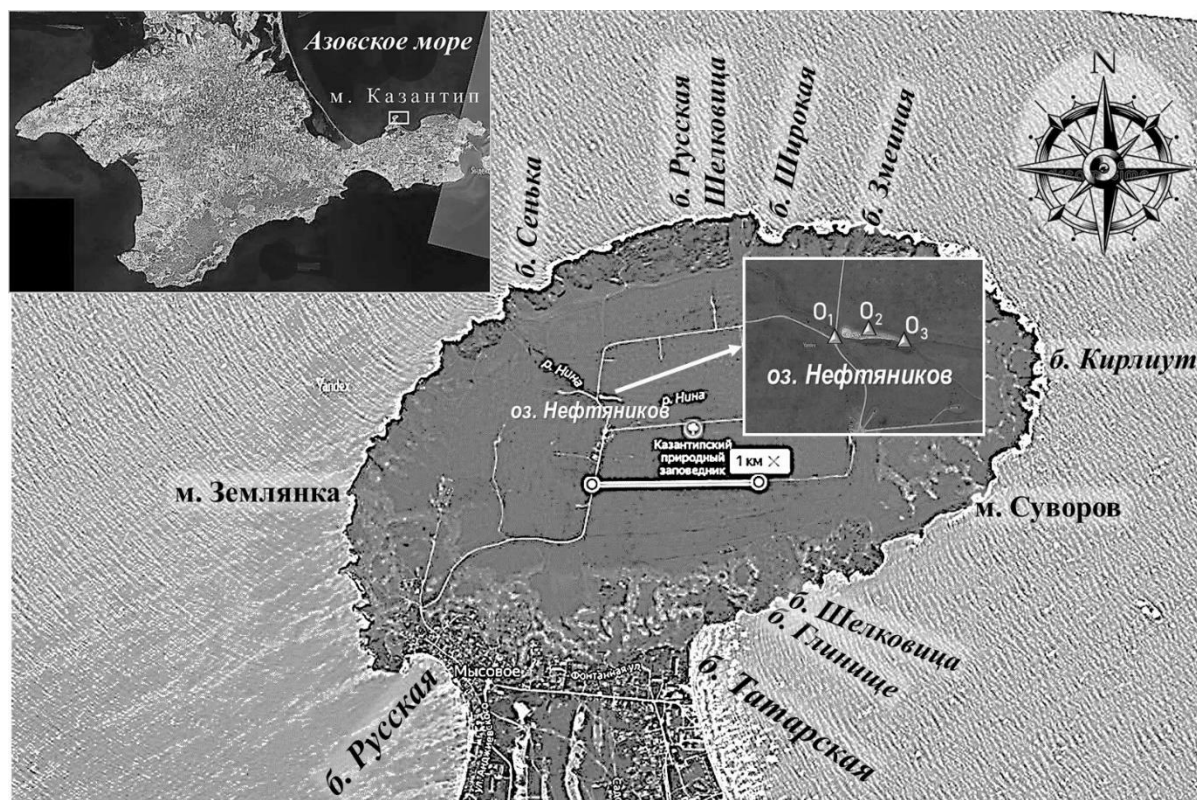


Рис. 1. Карта-схема отбора проб донных отложений и прибрежных наносов

В отобранных пробах донных отложений и прибрежных наносов определяли численность гетеротрофных бактерий – основных деструкторов органического вещества в водоёмах, углеводородокисляющих бактерий – деструкторов нефтяных углеводородов, сульфатредуцирующих бактерий – основных производителей сероводорода и тионовых бактерий – активных окислителей серы и ее неорганических восстановленных соединений. Численность бактерий в пробе определяли методом предельных разведений с использованием элективных сред (Бурдиян, 2011; Миронов и др., 2003; Нетрусова, 2005) с учетом солености воды. Наиболее вероятное число микроорганизмов в единице объёма рассчитывали по таблице Мак-Креди (в трёх повторностях), основанной на методе вариационной статистики (Нетрусова, 2005).

Результаты и обсуждение

Донные отложения в прибрежной зоне Казантипского заповедника представлены мелким песком серо-желтого цвета, иногда с примесью ракуши. Донные отложения небольшого озера в центральной части мыса (станции отбора проб О₁, О₂, О₃) представлены полужидким илом серо-коричневого цвета с соответствующими физико-химическими показателями.

Для песков рН колебался в пределах 7,86–8,73 (рис. 2 а). В илах озера «Нефтяников» ранее (Boltachev, 2013) были отмечены более низкие показатели рН (7,0–7,35), чем в настоящем исследовании.

Окислительно-восстановительный потенциал был положительным (до +295 мВ) (рис. 2 б), за исключением прибрежных наносов бухт Русская Шелковица, Русская, Сенька и озера «Нефтяников» (в котором отмечены минимальные значения Eh: –282 мВ).

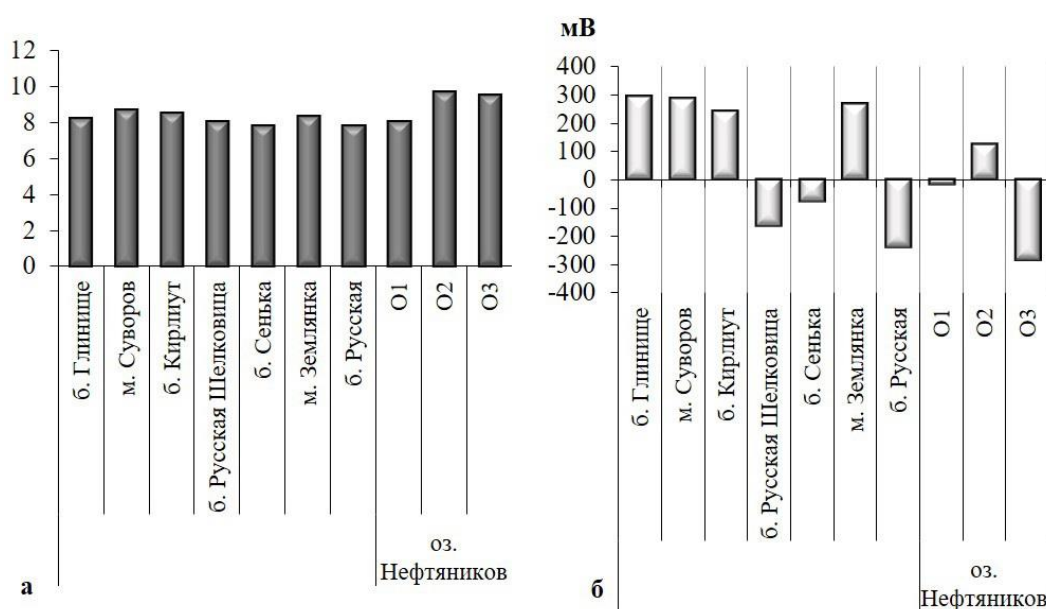


Рис. 2. Физико-химические показатели (а – рН, б – Eh, мВ) донных отложений и прибрежных наносов м. Казантип

В прибрежных наносах Казантипского природного заповедника обнаружены следовые количества ХЭВ, концентрация ХЭВ колебалась от 5,0 до 13,5 мг·100 г⁻¹ воздушно-сухого донного осадка (возд.-сух. д.о.). Данные значения являются показателем низкого уровня органического загрязнения и небольшой накопительной способности отложений, которое основано на размере их частиц. НУ во всех образцах отмечены только в следовых количествах (0,2–1,1 мг·100 г⁻¹ возд.-сух. д.о.). Доля НУ от ХЭВ в среднем составила 4,6 %.

Концентрация ХЭВ в донных отложениях озера «Нефтяников» по сравнению с остальной прибрежной акваторией была значительно выше. Ранее было показано (Болтачев и др., 2013), что на станциях О₁, О₂ и О₃ показатели ХЭВ составляли 170,0, 70,0 и 80,0 мг·100 г⁻¹ возд.-сух. д.о., соответственно. Наши исследования показали, что в илах озера «Нефтяников», расположенного в центре м. Казантип, концентрация ХЭВ составляла уже 439,3 мг·100 г⁻¹, что указывает на III уровень загрязнения из V-ти описанных в (Миронов и др., 1986). Распределение НУ соответствовало таковому для ХЭВ: минимальное количество отмечено на станции О₂ (2,7 мг·100 г⁻¹ возд.-сух. д.о.), а максимальное – на станции О₁ (57,0 мг·100 г⁻¹ возд.-сух. д.о.). Доля НУ от ХЭВ колебалась от 3,8 до 33,5 %. Таким образом, полученные нами результаты

свидетельствуют об увеличении концентрации НУ в илах озера «Нефтяников». Следует отметить, что помимо проводимой на мысе добычи нефтяных углеводородов, не менее важным фактором, влияющим на скорость и уровень концентрирования органических загрязнителей, является гранулометрический состав донных отложений (Алемов и др., 2018; Boltachev, 2013). Так, мелкодисперсные илы озера обладают большей накопительной способностью, нежели пески прибрежной акватории заповедника.

Обращает внимание (Болтачев и др., 2016; Литвинюк, 2016), что в прибрежной зоне Казантипского заповедника выявлен участок с почти полным отсутствием бентосной макрофауны. По нашему мнению, возможной причиной резкого снижения видового разнообразия и количественных характеристик бентоса на указанном участке акватории является периодическое поступление воды из расположенного в центральной части полуострова небольшого озера, при переполнении последнего ливневыми или паводковыми водами. Воды озера, вследствие проводимой на полуострове нефтедобычи, могут содержать повышенные концентрации углеводородов, как в результате первичного, так и вторичного загрязнения, когда нефтепродукты попадают в воду из донных отложений. Результаты наших исследований показывают достаточно высокий уровень органического загрязнения донных отложений озера.

Численность гетеротрофных бактерий (ГБ) в донных отложениях мелководных станциях м. Казантип варьировала от 10^5 до 10^7 кл.·г⁻¹ (рис. 3 а), на более мористых станциях число ГБ колебалось в пределах четвертого-пятого порядка.

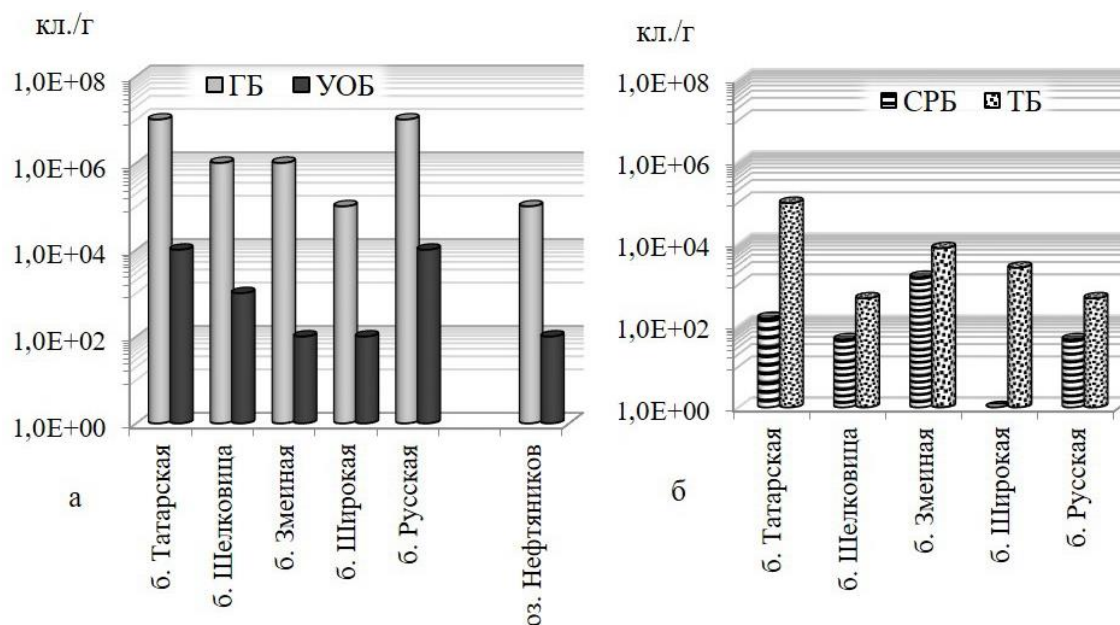


Рис. 3. Численность (кл./г) а – гетеротрофных (ГБ) и углеводородокисляющих бактерий (УОБ); б – сульфатредуцирующих (СРБ) и тионовых (ТБ) бактерий в донных отложениях акватории м. Казантип

Наибольшее количество ГБ выявлено в донных отложениях бухт Русской и Татарской, испытывающих интенсивную рекреационную нагрузку. Высокие показатели численности ГБ свидетельствуют о насыщении донных отложений указанных бухт легкоусвояемым органическим веществом.

Бактерии, осуществляющие деструкцию нефтяных углеводородов, выделены из всех проб донных отложений м. Казантип (рис. 3 а). Численность углеводородокисляющих бактерий (УОБ) на мелководных станциях колебалась от 10^2 до 10^4 кл.·г⁻¹. В пробах донных отложений глубоководных станций численность УОБ была существенно ниже и варьировала от 1,0 до 10 кл.·г⁻¹. Высокая численность УОБ,

свидетельствующая о высокой потенциальной способности акватории к самоочищению от нефтяных углеводородов, определена на мелководных станциях в бухтах Татарская и Русская.

Сульфатредуцирующие бактерии в акватории м. Казантип выделены из всех проб (рис. 3 б). Численность СРБ варьировала в широком диапазоне от 1,0 до $1,5 \cdot 10^3$ кл. \cdot г⁻¹. Наибольший показатель СРБ определён в б. Змеиная, соответственно, наименьший – в б. Широкая. В остальных пробах численность СРБ колебалась от 45 до 150 кл. \cdot г⁻¹. Высокая численность СРБ в акватории бухты Змеиной, указывает на активные процессы восстановления сульфатов, приводящих к ухудшению экологического состояния бухты, вследствие высокой токсичности сероводорода для гидробионтов.

Тионовые бактерии (ТБ) в донных отложениях выделены повсеместно, численность ТБ варьировала от $4,5 \cdot 10^2$ до $2,5 \cdot 10^5$ кл. \cdot г⁻¹ (рис. 3 б). Наименьшая численность ТБ определена в пробах, отобранных в б. Шелковица (база). Численность ТБ во всех образцах донных отложений превышала количественные показатели СРБ, тем самым предполагая наличие бактериального (тионового) фильтра, препятствующего проникновению сероводорода в близлежащие слои воды и грунта.

Выводы

1. Донные отложения прибрежной акватории Казантипского заповедника в целом являются условно чистыми. Концентрации ХЭВ и НУ указывают на низкий уровень органического загрязнения и на их невысокую накопительную способность, за исключением расположенного в центре м. Казантип, озера «Нефтяников», где показатели были значительно выше.

2. Исследуемые группы бактерий распространены повсеместно. Численность (кл. \cdot г⁻¹) гетеротрофных бактерий колебалась от 10^5 до 10^7 , соответственно, углеводородокисляющих – от 1,0 до 10^4 , тионовых – от $4,5 \cdot 10^2$ до $2,5 \cdot 10^5$, сульфатредуцирующих – от 1,0 до $1,5 \cdot 10^3$. Отмечена высокая степень развития гетеротрофного бактериального сообщества, в том числе и углеводородокисляющих бактерий, на мелководных станциях исследуемой акватории.

3. Для снижения влияния различных загрязнителей на развитие бентосных сообществ в прибрежной зоне заповедника возможно проведение работ по увеличению самоочищающего потенциала акватории, например, установка искусственных рифов или систем гидробиологической очистки. В первую очередь проведение данных работ необходимо на участках заповедника с повышенной антропогенной нагрузкой (в частности, причалы рыболовецких судов и акватория бухты Сенька). Также следует полностью исключить или свести к минимуму добычу полезных ископаемых вблизи заповедника.

Список литературы

1. Аксёнов А.А. Гидрометеорологический справочник Азовского моря. – Л.: Гидрометеоиздат, 1962. 855 с.
2. Алёмов С.В., Бурдиян Н.В., Витер Т.В., Гусева Е.В., Тихонова Е.А., Соловьева О.В., Алёмова А.С. Результаты комплексных санитарно-биологических исследований прибрежной акватории Казантипского природного заповедника (Крым) // Наземные и морские экосистемы Причерноморья и их охрана: тезисы докл. науч.-практ. шк.-конф. (Новороссийск, Краснодарский край, 23–27 апр. 2018 г.). Новороссийск, 2018. С. 7–9.

3. Беспалова Л.А. Экологическая диагностика и оценка устойчивости ландшафтной структуры Азовского моря: Автореф. дис. д. геогр. наук. – Санкт-Петербург, 2007. 30 с.
4. Болтачев А.Р., Алёмов С.В., Загородняя Ю.А., Карпова Е.Л., Манжос Л.А., Губанов В.В., Литвинюк Н.А. Подводный мир Казантипского природного заповедника: к 15-летию Казантипского природного заповедника. – Симферополь: Бизнес-Информ, 2016. 112 с.
5. Бондаренко А.В., Рябушко Л.И., Садогурская С.А. Заповедник «Казантипский» (Крым, Азовское море) // Заповедные территории. 2019. № 1. С. 125–131.
6. Бурдиян Н.В. Сульфатредуцирующие, тионовые, денитрифицирующие бактерии в прибрежной зоне Чёрного моря и их роль в трансформации нефтяных углеводородов: автореф. дис. канд. биол. наук. Севастополь, 2011. 24 с.
7. Вылканов А., Данов Х., Маринов Х., Владев П. Чёрное море. – Сборник пер. с болг. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. 408 с.
8. Груммо Д., Коробушин Д., Малашенкова Е. Мониторинг особо охраняемых природных территорий // Наука и инновации. 2018. № 10 (188). С. 63–69.
9. Еремеев В.Н., Иванов В.А., Ильин Ю.П., Океанографические условия и экологические проблемы Керченского пролива // Морской экологический журнал. 2003. Т. 2, № 3. С. 27–40.
10. Зенкевич Л.А. Биология морей СССР. – М.: Академия наук СССР, 1963. 739 с.
11. Клюкин А.А., Корженевский В.В., Щепинский А.А. Казантип (путеводитель). – Симферополь: «Таврия», 1987. 112 с.
12. Литвинюк Н.А. Кадастровая документация по государственному бюджетному учреждению республики Крым «Казантипский природный заповедник» // Научные записки природного заповедника «Мыс Мартьян». 2016. Вып. 7. С. 27–55.
13. Методические указания «Определение загрязняющих веществ в пробах морских донных отложений и взвеси». – М.: Федеральная служба России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, 1996. С. 18–26.
14. Миронов О.Г., Миловидова Н.Ю., Кирюхина Л.Н. О предельно допустимых концентрациях нефтепродуктов в донных осадках прибрежной зоны Чёрного моря // Гидробиол. журнал. Т. 22. № 6. 1986. С. 76–78.
15. Миронов О. Г., Кирюхина Л.Н., Алёмов С.В. Санитарно-биологические аспекты экологии севастопольских бухт в XX веке – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. 185 с.
16. Нетрусова А.И. Практикум по микробиологии. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. 608 с.
17. Boltachev A.R., Alyomov S.V., Zagorodnya Yu.A., Karpova E.P., Manzhos L.A., Gubanov V.V., Burdiyan N.V., Tikhonova E.A., Popova L.A. Integral Assessment of the Environment, Species Diversity and Ecological Structure of Coastal Marine Biocenoses of Kazantip Nature Reserve (the Sea of Azov): proceedings of the 5th IWA Eastern European «Young and Senior Water Professionals» Conference. Part 1 (English version). (Kiev, 26-28th of June 2013). Kiev, 2013. PP. 32–39.
18. Eremeev V.N., Boltachev A.R., Aleksandrov B.G., Alyomov S.V. Biological diversity of the coastal zone of the Crimean peninsula: problems, preservation and restoration pathways. Sevastopol: NAS Ukraine, Institute of Biology of the Southern Seas, 2012. 92 p.

**THE CHEMICAL-MICROBIOLOGICAL CHARACTERISTICS OF SEA BOTTOM
SEDIMENTS OF THE COASTAL AQUATORIA OF KAZANTIP NATURE
RESERVE (AZOV SEA)**

Tikhonova E.A., Burdijan N.V.

*A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation,
e-mail: tihonoval@mail.ru*

A chemical-microbiological assessment of sea bottom sediments of the coastal waters of the Kazantip Nature Reserve (Azov Sea) was carried out from 2013 to 2016. The results of which showed that the sea bottom sediments are conditionally clean, with the exception of the silt of Kazantip central station (Lake Neftyanikov). The concentrations of chloroform-extractable substances in this lake corresponded to the III pollution level. The quantitative content of heterotrophic, hydrocarbon-oxidizing, sulfate-reducing and thionic groups of bacteria in the bottom sediments of Cape Kazantip in the summer is characterized. The number ($\text{cell} \cdot \text{g}^{-1}$) of heterotrophic bacteria ranged from 10^5 to 10^7 , respectively, of hydrocarbon-oxidizing bacteria from 1.0 to 10^4 , of thionic bacteria from $4.5 \cdot 10^2$ to $2.5 \cdot 10^5$, of sulfate-reducing bacteria from 1.0 to $1.5 \cdot 10^3$. A high degree of growth of a heterotrophic bacterial community, including hydrocarbon-oxidizing bacteria, was observed at shallow stations of the studied water area.

Key words: physico-chemical characteristics, microbiota, sea bottom sediments, Kazantip Nature Reserve, Azov Sea.

Тихонова
Елена
Андреевна Кандидат биологических наук, старший научный сотрудник отдела
морской санитарной гидробиологии, ФГБУН ФИЦ «Институт
биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН,
e-mail: tihonoval@mail.ru

Бурдиян
Наталия
Витальевна Кандидат биологических наук, старший научный сотрудник отдела
морской санитарной гидробиологии, ФГБУН ФИЦ «Институт
биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН,
e-mail: burdiyan@mail.ru

Поступила в редакцию 14.02.2020 г

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ГИДРОБИОЛОГИЯ

УДК 581.526.325:581.14(262.5)

СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ПОПУЛЯЦИЙ В
ПЛАНКТОННОМ СООБЩЕСТВЕ *

Чмыр В.Д., Ли Р.И.

ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН»,
г. Севастополь, Российская Федерация,
e-mail: vchmyr35@mail.ru, raisa-lee@yandex.ru

Метод разбавления позволяет определять скорость роста и выедания суммарного фитопланктона, биомасса которого оценивается по концентрации хлорофилла а. В апреле – мае 2017 г. нами проведены эксперименты, в ходе которых была разработана модификация метода разбавления с целью определения основных функциональных параметров популяций отдельных видов фитопланктона. В задачи эксперимента входило определение соотношения скорости видимого и действительного роста с тем, чтобы оценивать значения скорости действительного роста и выедания по результатам короткопериодного мониторинга численности фитопланктона *in situ*. Однако, полученные в ходе экспериментов результаты не только выходят за рамки заявленных целей, но и позволяют выйти на новый уровень комплексных исследований планктонного сообщества, возможность которых и рассматривается в настоящей публикации. Так, полученные зависимости скорости роста и выедания от размера клеток показывают, что все функциональные параметры фитопланктона, в принципе, могут быть рассчитаны непосредственно по структурным характеристикам.

Ключевые слова: фитопланктон, сообщество, популяция; структура, скорость роста, элиминация.

Введение

Применяемый для изучения первичной продукции водоёмов метод склянок, как в кислородном (Винберг, 1934), так и в радиоуглеродном (Stemann Nielsen, 1952) вариантах позволяет определять суммарную продукцию фитопланктона. Определения скорости роста отдельных видов фитопланктона в условиях естественного сообщества впервые были проведены Т.М. Кондратьевой в 1961 г. в стеклянных цилиндрах, торцы которых были затянуты пористыми мембранами (Кондратьева, 1961). По этой методике позже проводили определения на Байкале (Антипова, Загоренко, 1971) и в бухте Севастопольская (Сеничева, 1980), которые позволили успешно рассчитывать как продукцию отдельных видов, так и первичную продукцию всего фитоценоза. Однако, в дальнейшем метод Кондратьевой, требующий трудоёмкого анализа проб под микроскопом, игнорировали, как устаревший, а определения первичной продукции, особенно в морских акваториях, проводили преимущественно радиоуглеродным методом.

Предложенный несколько позже метод разбавления (Landry et al., 1982, 1984) позволяет определять скорость роста и выедания всего фитоценоза, биомасса которого оценивается по концентрации хлорофилла а. В апреле – мае 2017 г. проведены

* Работа выполнена в рамках госзадания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Функциональные, метаболические и токсикологические аспекты существования гидробионтов и их популяций в биотопах с различным физико-химическим режимом (гос. рег. № АААА-А18-118021490093-4).

эксперименты, в ходе которых была разработана модификация метода разбавления, позволившая впервые определить основные функциональные параметры популяций отдельных видов. Предполагалось использовать результаты эксперимента для оценки функциональных параметров популяций по значениям скорости видимого роста, определяемого в результате подекадного мониторинга их численности (Чмыр, Ли, 2019). Однако полученные в ходе этих экспериментов результаты выходят за рамки заявленных ранее целей и позволяют выйти на новый уровень комплексных исследований планктонного сообщества, возможность которых и рассматривается в настоящей публикации.

Для ясности изложения приводим основные методические положения нашей модификации метода разбавления.

Материалы и методы

Метод разбавления был предложен в 1982 г. М. Landry с соавторами (Landry and Hassett, 1982; Landry et al., 1984) и получил широкое распространение для определения интегральных значений скорости роста и выедания суммарного фитопланктона в природных сообществах. К настоящему времени создана литература, насчитывающая сотни публикаций, описывающих результаты этих исследований. В нашей работе теоретические построения, терминология и уравнения расчётов соответствуют в основном изложенным в работах авторов метода разбавления (Landry and Hassett, 1982; Landry et al., 1984; Landry et al., 2008; Li et al., 2010). Конкретные буквенные обозначения в уравнениях, как правило, соответствуют первоисточникам. Минимальные замены предприняты с целью унификации обозначений в настоящем изложении.

Метод разбавления основан на сопоставлении плотности фитопланктона в начале (p_0) и в конце (p_t) экспозиции цельных и разбавленных фильтрованной водой проб в условиях близких к естественным. Принимается, что за время экспозиции концентрация питательных веществ и скорость размножения клеток остаётся постоянной, а скорость выедания изменяется пропорционально изменяющейся при разбавлении концентрации консументов. Основными потребителями фитопланктона являются организмы микрозоопланктона – преимущественно инфузории и личинки ракообразных размером от 20 до 200 мкм. Суммарную плотность фитопланктона первоначально оценивали по концентрации хлорофилла *a*.

В наших экспериментах классический метод разбавления, предназначенный для исследования суммарного фитопланктона, мы адаптировали для определения функциональных параметров отдельных видов. Для этого находили коэффициенты видимого роста за время экспозиции (t , сут) численности клеток (n) каждого исследуемого вида отдельно в цельной (k) и в разбавленной (k_d) пробах по следующим уравнениям:

$$k = \ln \left(\frac{n_t}{n_0} \right) / \Delta t, \quad (1)$$

$$k_d = \ln \left(\frac{n_{td}}{n_{0d}} \right) / \Delta t, \quad (2)$$

Используя значения коэффициентов k и k_d , находили коэффициент элиминации m :

$$m = \frac{k_d - k}{1 - x}, \quad (3)$$

где x – доля цельной воды в составе разбавленной пробы, объём которой принят равным единице.

Скорость размножения (действительный рост, μ) принимается как сумма видимого роста и элиминации:

$$\mu = k + m, \quad (4)$$

Единицей измерения значений k , m и μ является сут^{-1} .

Зная начальную биомассу B_0 , по найденным значениям m и μ можно рассчитать значения продукции P и выедания G популяции каждого вида в $\text{мг} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{сут}^{-1}$:

$$P = \mu \times B_0 (e^{(\mu-m)t} - 1) / (\mu - m), \quad (5)$$

$$G = m \times B_0 (e^{(\mu-m)t} - 1) / (\mu - m), \quad (6)$$

Для проведения экспериментов воду отбирали с поверхности моря на станции Равелин, расположенной в фарватере Севастопольской бухты вблизи её устья. Воду наливали в 5-литровые пластиковые баллоны.

В одной ёмкости проба на две трети объёма была разбавлена водой, пропущенной через ядерный фильтр (диаметр ячеек 1 мкм). В другой ёмкости проба оставалась неразбавленной. Баллоны экспонировали в море у причала экспериментального корпуса института в течение трёх суток. В начале и в конце экспозиции определяли численность клеток каждого найденного вида в обеих экспериментальных ёмкостях. Для определения фитопланктона пробы объёмом до 2 л концентрировали на воронке обратной фильтрации, оборудованной фильтром с диаметром ячеек 1 мкм (Сорокин, 1979, Суханова, 1983) до объёма 10 мл и фиксировали 1 мл нейтрализованного 40% формалина. Подсчет клеток фитопланктона различной плотности и размерного состава осуществляли под световым микроскопом ЛОМО Микмед-2 (увеличением крат 40х – 1500х. Расчет объёма и биомассы клеток проводили по стандартным методикам (Киселев, 1956), Водоросли. Справочник, 1989).

Результаты и обсуждение

Чтобы по полученным в естественной популяции значениям скорости видимого роста оценить скорость действительного роста и выедания, необходимо было установить взаимосвязь между этими показателями. С этой целью в апреле – мае 2017 г. были проведены эксперименты, в ходе которых в пробах, отобранных в устье Севастопольской бухты на станции Равелин, впервые были измерены функциональные параметры отдельных видов фитопланктона. Всего в этих пробах идентифицировано около 40 видов, хотя численность только 31 вида была существенной (табл. 1).

Таблица 1.

Численность видов фитопланктона (клеток/литр), обнаруженных 28 апреля 2017 г. в устье Севастопольской бухты на ст. (Равелин)

№ п/п	Таксон	Клеток/литр
ОТДЕЛ BACILLARIOPHYTA		
1	<i>Berkeleya micans</i> (Lyngbye) Grunov 1868	319
2	<i>Chaetoceros affinis</i> Lauder 1864	16907
3	<i>Ch. coronatus</i> Gran 1897	2233
4	<i>Ch. curvisetus</i> Cleve 1889	42746
5	<i>Ch. insignis</i> Proschkina-Lavrenko 1955	87406
6	<i>Ch. peruvianus</i> Brightwell 1856	2233
7	<i>Ch. socialis</i> H.S. Lauder 1864	69542

№ п/п	Таксон	Клеток/литр
8	<i>Ch. subtilis</i> Cleve 1896	34452
9	<i>Cyclotella caspia</i> Grunow 1878	1595
10	<i>Diploneis</i> sp.	638
11	<i>Licmophora abbreviata</i> C.A. Agardh 1831	319
12	<i>Fallacia forcipata</i> (Greville) Stickle & D.G. Mann in Round, Grawford & Mann 1990	319
13	<i>Navicula</i> sp.	319
14	<i>Nitzshia tenuirostris</i> Mereschk. 1902	14993
15	<i>Pleurosigma elongatum</i> W. Smith 1852	319
16	<i>Pseudo-nitzschia delicatissima</i> (Cleve) Heiden in Heiden et Kolbe 1928	2233
17	<i>Dactyliosolen fragilissimus</i> (Bergon) Hasle in Hasle & Syvertsen 1996	1595
18	<i>Skeletonema costatum</i> (Greville) Cleve 1873	765600
ОТДЕЛ MIOZOA		
19	<i>Diplopsalis pilula</i> Ostenfeld 1908	319
20	<i>Gonyaulax spinifera</i> Claparède & Lachmann Diesing 1866	319
21	<i>Heterocapsa triquetra</i> (Ehrenberg) Stein 1883	2871
22	<i>Prorocentrum micans</i> Ehrenberg 1834	957
23	<i>Protoceratium reticulatum</i> (Claparède & Lachmann) Bütschli 1885	638
24	<i>Protoperidinium bipes</i> (Paulsen) Balech 1974	1914
25	<i>Protoperidinium brevipes</i> (Paulsen) Balech 1974	1276
26	<i>Protoperidinium pallidum</i> (Ostenfeld) Balech 1973	638
27	<i>Protoperidinium pellucidum</i> Bergh 1881	1914
28	<i>Scrippsiella trochoidea</i> (Stein) Loeblich III 1976	2233
ОТДЕЛ OCHROPHYTA		
29	<i>Dinobryon porrectum</i> Schiller 1925	319
ОТДЕЛ EUKARYOTA UNASSIGNED PHYLUM		
30	<i>Poropila dubia</i> J.Schiller 1925	1276
ОТДЕЛ EUGLENOPHYTA		
31	<i>Euglena acusformis</i> J. Shiller 1925	1595

Из них для расчётов функциональных параметров могли быть использованы только массовые виды, обнаруживаемые в эксперименте в достаточных количествах в конце экспозиции. Этим требованиям вполне соответствовали только шесть видов диатомовых водорослей. Функциональные параметры: удельные суточные значения скорости видимого (k) и действительного (μ) роста и скорости выедания (m), а также значения продукции и выедания ($\text{мг} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{сут}^{-1}$) были получены в эксперименте для этих шести видов водорослей, объём клеток которых варьировал от 75 до 1413 мкм^3 (табл. 2).

По результатам эксперимента были рассчитаны зависимости функциональных показателей k , m и μ , а также их соотношений k/μ , m/μ и k/m от объёма клеток водорослей:

$$k = 0,0004V + 0,0874, R^2 = 0,9544 \quad (7)$$

$$m = 0,8581e^{-0,002V}, R^2 = 0,7469 \quad (8)$$

$$\mu = 1,1935V^{-0,087}, R^2 = 0,1665 \quad (9)$$

$$\frac{k}{\mu} = 0,0006V + 0,1109, R^2 = 0,9334 \quad (10)$$

$$\frac{m}{\mu} = 0,0006V + 0,8896, R^2 = 0,9326 \quad (11)$$

$$\frac{k}{m} = 0,1438e^{-0,0028V}, R^2 = 0,8866 \quad (12)$$

Графически эти зависимости представлены на рисунках 1, 2 и 3.

Таблица 2.

Структурные и функциональные параметры популяций шести массовых видов фитопланктона в устье б. Севастопольская. Эксперимент 28 апреля – 02 мая 2017 г.*

Виды	V , мкм ³	n , кл/л	V_0 , мг/м ³	k , сут ⁻¹	m , сут ⁻¹	μ , сут ⁻¹	k/μ	m/μ	k/m	P , мг*м ⁻³ сут ⁻¹	G , мг*м ⁻³ сут ⁻¹
Chaetoceros socialis	75	69542	5,216	0,157	0,876	1,033	0,152	0,848	0,179	5,873	4,948
Chaetoceros subtilis	157	34452	5,409	0,100	0,449	0,549	0,180	0,818	0,223	3,123	2,554
Chaetoceros insignis	314	87406	27,45	0,170	0,694	0,864	0,200	0,803	0,245	25,85	20,76
Skeletonem costatum	417	765600	319,8	0,291	0,305	0,596	0,490	0,512	0,954	220,8	113,0
Chaetoceros curvisetus	1041	42746	44,50	0,433	0,247	0,680	0,640	0,363	1,248	37,87	19,32
Chaetoceros peruvianus	1413	2233	3,155	0,629	0,049	0,678	0,928	0,072	12,84	2,978	0,215

* V – объём клетки, мкм³, n – число клеток в литре, k – удельная скорость видимого роста, сут⁻¹, m – удельная скорость выедания, сут⁻¹, μ – удельная скорость действительного роста, сут⁻¹, P – продукция, мг*м⁻³сут⁻¹, G – выедание, мг*м⁻³сут⁻¹, k/μ , k/m – отношение скорости видимого роста к скорости действительного роста и скорости выедания, m/μ – отношение скорости выедания к скорости действительного роста.

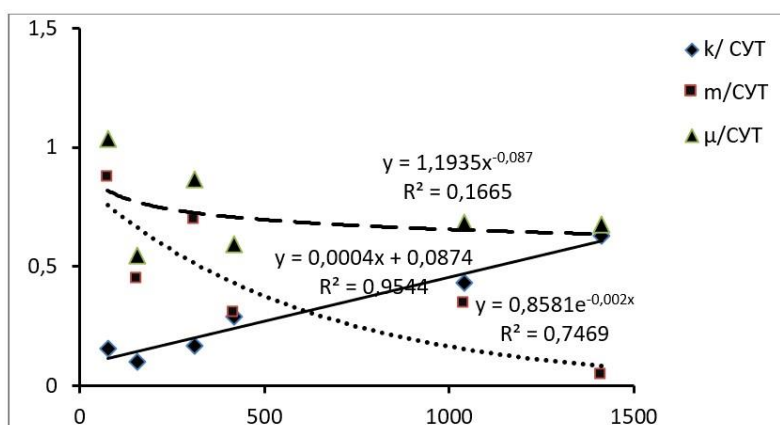


Рис. 1. Функции удельных значений скорости видимого ($k \cdot \text{сут}^{-1}$) и действительного ($\mu \cdot \text{сут}^{-1}$) роста, а также скорости выедания ($m \cdot \text{сут}^{-1}$) от объёма клеток водорослей (V , мкм³). Эксперимент 28 апреля – 2 мая 2017 г., устье б. Севастопольская

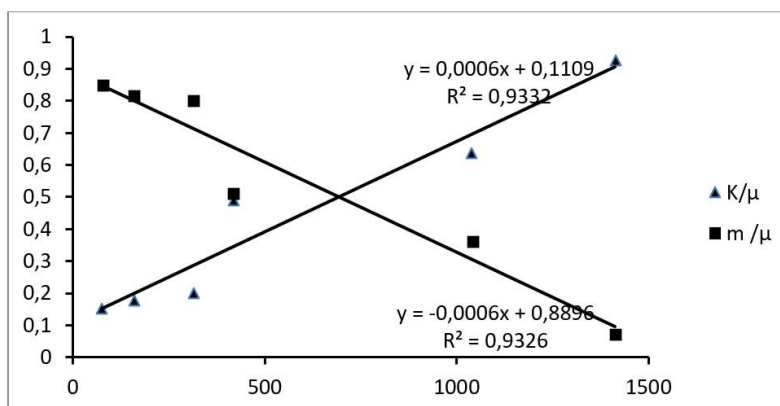


Рис. 2. Функции отношения удельных значений скоростей видимого и действительного роста k/μ , а также скоростей выедания и действительного роста m/μ от объёма клеток водорослей V , мкм³

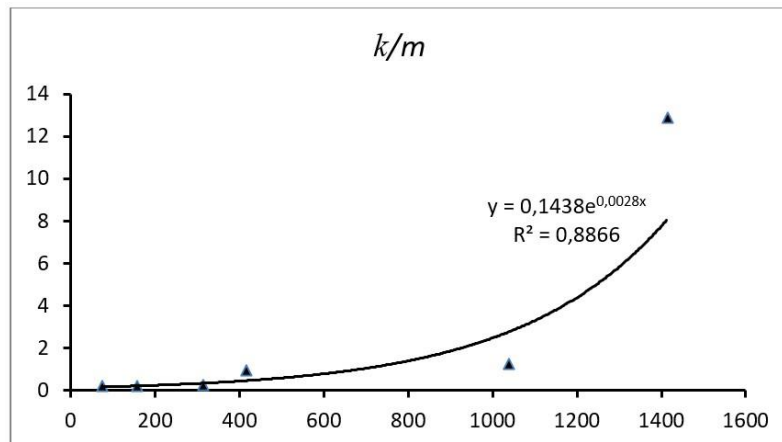


Рис. 3. Функция отношения удельных значений скорости видимого роста и скорости выедания k/m от объема клеток водорослей V , мкм³

Согласно графикам, самый высокий коэффициент детерминации имеет зависимость скорости видимого роста k от объема клетки ($R^2 = 0,9544$). Это связано с тем, что k измеряется непосредственно в неразбавленном варианте эксперимента, в то время как скорость выедания m ($R^2 = 0,7469$) рассчитывается по результатам сопоставления данных, полученных также и при разбавлении. Наименьший коэффициент детерминации имеет зависимость скорости действительного роста μ от объема клетки ($R^2 = 0,1665$). Возможно, это объясняется тем, что μ определяется как сумма $k + m$. Впрочем, все зависимости соотношений функциональных параметров от объема клеток имеют высокие коэффициенты детерминации R^2 – от 0,89 до 0,93.

Минимальные значения скорости видимого роста (около 0,1/сут) получены для самых мелких водорослей, которые имеют самые высокие скорости выедания и действительного роста (около 0,8/сут). По мере возрастания размера клеток до 1500 мкм значения скорости выедания стремятся к нулю, а видимой и действительной скорости роста – к одинаковым значениям (около 0,65/сут).

В задачи экспериментов первоначально входило определение соотношения скоростей видимого и действительного роста с тем, чтобы использовать полученные соотношения для оценки скорости действительного роста и выедания популяций отдельных видов по результатам короткопериодного мониторинга их численности в природных сообществах. Однако полученные зависимости свидетельствуют о взаимосвязи структурных и функциональных параметров популяций в планктонном сообществе: трофическая роль популяций в сообществе определяется размерами их клеток, более крупные организмы микрозоопланктона потребляют фитопланктон в соответствии с его структурными характеристиками. Эти классические представления о характере трофических связей получили выражение в виде уравнений.

Выводы

Если рассматривать найденные в экспериментах зависимости, как свойственные всем подобным планктонным сообществам в сходных условиях, полученные уравнения с высокими значениями коэффициентов детерминации, с учётом соответствующих температурных и других поправок, в принципе, могут быть использованы для определения функциональных параметров других подобных популяций непосредственно по размерам их клеток, т.е. для конкретных расчётов скорости роста, продукции и потребления по результатам обычного таксономического анализа фитопланктона.

Приведенные зависимости получены для популяций шести видов диатомовых. Поскольку максимальные скорости роста диатомовых в два-три раза выше, чем у представителей динофитовых – другой наиболее распространённой таксономической группы одноклеточных водорослей (Стельмах, Мансурова, 2017) – очевидна необходимость проведения аналогичных исследований как для этой, так и для других таксономических групп водорослей, чтобы получить полную картину структурно-функционального взаимодействия популяций в планктонном сообществе.

Список литературы

1. Антипова Н.Л., Загоренко Г.Ф. К вопросу об определении суточной продукции некоторых видов Байкальского фитопланктона. – Изв. Биол.-геогр. НИИ при Иркут. ун-те. 1971. 25. С. 20–29.
2. Винберг Г.Г. Опыт изучения фотосинтеза и дыхания в водной массе озера. К вопросу о балансе органического вещества. – Сообщ. 1. Тр. Лимнол. ст. в Косине. 1934. 18. С. 5–24
3. Киселев И.А. Методы исследования планктона // Жизнь пресных вод СССР. – Ленинград: АН СССР, 1956. Т. 4. С. 183–270.
4. Кондратьева Т.М. Определение суточной продукции фитопланктона в Севастопольской бухте. – В кн.: Первичная продукция морей и внутренних вод. Минск: Мин. Высш. и средн. спец. образования БССР, 1961. С. 71 – 82.
5. Сеничева М.И. Сезонная динамика численности, биомассы и продукции фитопланктона Севастопольской бухты // Экология моря. 1980. Вып. 1. С. 3–11.
6. Сорокин Ю.И. К методике концентрирования проб фитопланктона // Гидробиологический журнал. 1979. Т. 15. С. 71–76
7. Стельмах Л.В., Мансурова И.М. Унимодальная зависимость скорости роста от объёма клеток в культурах черноморских видов микроводорослей // Вопросы современной альгологии. 2017 № 1 (13). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://algology.ru/1101>.
8. Суханова И.Н. Концентрирование фитопланктона в пробе // Современные методы количественной оценки распределения морского планктона. – М.: Наука, 1983. С. 97–105
9. Водоросли. Справочник / Вассер С.П., Кондратьева Н.В., Масюк Н.П. и др. – Киев: Наук. думка, 1989. 608 с.
10. Чмыр В.Д., Ли Р.И., Сеничева М.И. Определение скорости роста и элиминации отдельных видов и популяций в сообществе фитопланктона бухты Севастопольская (Чёрное море) // Морской биологический журнал. 2019. Том 4 № 3. С. 81–94.
11. Landry M.R., Hassett R.P. Estimating the grazing impact of marine micro – zooplankton // Marine Biology. 1982. 67. P. 283–288.
12. Landry M.R., Haas L.W., Fagerness V.L. Dynamics of microplankton communities: experiments in Kaneohe Bay, Hawaii // Marine Ecology Progress Series. 1984. № 16. P. 127–133.
13. Landry M.R., Brown S.L. et al. Depth-stratified phytoplankton dynamics in Cyclone Opal, a subtropical mesoscale eddy // Deep-See Res., 2008. II, № 55. P. 1348–1359.
14. Li Q.P., Franks P.J.S., Landry M.R., Goericke R., Taylor A.G. Modeling phytoplankton growth rates and chlorophyll to carbon ratios in California coastal and pelagic ecosystems // J. Geophys. Res. 2010. № 115. G04003, doi: 10.1029/2009 JG001111.
15. Steemann Nielsen E. The use of radio-active carbon (C¹⁴) for measuring organic production in the sea // J. Conseil perman. Internat. Explorat. Mer. 1952. № 18. P. 117–140.

**STRUCTURAL AND FUNCTIONAL RELATIONSHIPS OF POPULATIONS IN THE
PLANKTON COMMUNITY**

Tchmyr V.D., Lee R.I.

*A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation,
e-mail: vchmyr35@mail.ru, raisa-lee@yandex.ru*

The dilution method allows you to determine the growth rate and consumption of total phytoplankton, whose biomass is estimated by the concentration of chlorophyll "a". In April - May 2017, we conducted experiments, during which a modification of the dilution method was developed in order to determine the main functional parameters of the populations of individual phytoplankton species. The objectives of the experiment included assessing the ratio of the rate of apparent and actual growth in order to evaluate the values of the rate of actual growth and grazing out from the results of short-period monitoring of the phytoplankton abundance "in situ". However, the results obtained during the experiments not only go beyond the stated goals, but also allow to reach a new level of comprehensive research of the plankton community, the possibility of which is considered in this publication. Thus, the obtained dependences of the growth and grazing rates on the cell size show that, in principle, all the functional parameters of phytoplankton can be calculated directly from the structural characteristics.

Keywords: phytoplankton, community, population, growth rate, elimination, structure.

Чмыр Виктор Демьянович	Кандидат биологических наук, старший научный сотрудник отдела функционирования морских экосистем, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН, e-mail: vchmyr35@mail.ru
Ли Раиса Игнатьевна	Научный сотрудник отдела функционирования морских экосистем, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН, e-mail: raisa-lee@yandex.ru

Поступила в редакцию 16.03.2020 г.

УДК 594.124:577.115:628.193(262.5)

ЭКСКРЕЦИЯ ТЕСТОСТЕРОНА И ЭСТРАДИОЛА КУЛЬТИВИРУЕМОЙ МИДИЕЙ *MYTILUS GALLOPROVINCIALIS* LAM. (ЧЁРНОЕ МОРЕ)*

Капранова Л.Л.

ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН»,
г. Севастополь, Российская Федерация

e-mail: lar_sa1980@mail.ru

В работе представлены данные о содержании тестостерона и эстрадиола в гонадах и половых продуктах двустворчатого моллюска *Mytilus galloprovincialis*, обитающего в Чёрном море, на разных стадиях полового созревания. Рассчитаны концентрации половых гормонов, поступающих в водную среду во время массового нереста вместе с половыми продуктами. Показано, что самцы вместе со спермой экскретируют 0,1 мг тестостерона на 1 тонну мидий. Вместе с яйцеклетками может выделяться до 0,014 мг эстрадиола на 1 т моллюсков. На протяжении жизненного цикла концентрации тестостерона и эстрадиола в гонадах и половых продуктах мидии не постоянны, так как зависят от ряда факторов: сезонности, температуры, размеров гонад, условий выращивания. Тестостерон и эстрадиол, выделяемый вместе с половыми продуктами, активно участвует в жизнедеятельности, как самих мидий, так и других гидробионтов.

Ключевые слова: мидия *Mytilus galloprovincialis*, половые продукты, тестостерон, эстрадиол, Чёрное море.

Введение

Исследованию стероидных гормонов у моллюсков предшествовали три важных открытия. Одним из таких открытий было обнаружение стероидов позвоночных в тканях моллюсков. Предполагалось, что стероиды имели эндогенное происхождение и, возможно, использовались в качестве гормонов так же, как у позвоночных (Gottfried et al., 1966). Вторым открытием стало то, что противоположающееся соединение трибутилин (ТБТ) стал возбудителем роста мужского полового органа у улиток, обитающих в устьях рек (Mathieson et al., 1998; Oehlmann et al., 2007). Третье открытие было сделано в конце 1980–х годов при работах по очистке сточных вод в Великобритании, когда при биомониторинге удалось выделить большое количество эстрогенов, вызывающих выработку незрелой рыбой вителлогенина – белка – предшественника желтка (Purdom et al., 1994).

В настоящее время в органах представителей ряда беспозвоночных, в том числе и у моллюсков, обнаружены отдельные стероидные гормоны и системы их метаболизма, но остается нераскрытым вопрос: «Стероиды в теле моллюсков формируются эндогенно или они извлекаются из окружающей среды?» (Scott, 2018). Известно, что моллюски не содержат генов ключевых ферментов, которые необходимы для постепенного превращения холестерина в стероиды позвоночных, а также генов, отвечающих за функционирование классических ядерных стероидных рецепторов (Scott, 2012). Единственный путь поступления стероидов в организм беспозвоночных – вместе с пищей и водой (Schwarz et al., 2018). Огромное количество работ посвящено

* Работа выполнена в рамках Госзадания ФГБУН ИМБИ по темам «Фундаментальные исследования популяционной биологии морских животных, их морфологического и генетического разнообразия» (гос. рег. № АААА–А19–119060690014–5) и «Исследование механизмов управления продукционными процессами в биотехнологических комплексах с целью разработки научных основ получения биологически активных веществ и технических продуктов морского генезиса» (АААА–А18–118021350003–6).

распределению стеридов в корме моллюсков: фитопланктоне, зоопланктоне, бактериях (Wakeham et al., 1990; Scott, 2018).

Присутствие тестостерона и 17 β -эстрадиола в моллюсках часто связывают с их участием в размножении. Существует мнение, что наиболее вероятный источник тестостерона, по крайней мере, у одного вида мидии *Mytilus* spp., поступает из воды (Schwarz et al., 2017).

До сих пор не существует неопровержимых доказательств существования у моллюсков эндокринной системы, напоминающую по своим функциям систему позвоночных (Scott, 2018).

Но так как в эндокринной системе высокоорганизованных групп беспозвоночных (моллюски, ракообразные, насекомые) выявлены структурно–функциональные элементы, присущие эндокринной системе позвоночных (Никитина, 1982), то можно утверждать о сходстве основных интегративных механизмов у всех многоклеточных животных. У беспозвоночных и позвоночных выделены два основных типа тканей. Первый тип тканей представлен нейросекреторной системой, продуцирующей нейросекреторные гормоны, являющиеся по химической природе белками, а другой – специализированными эпителиальными железами, например, гонадами, продуцирующими стероидные гормоны. В литературе можно встретить ряд аргументов в пользу биосинтеза стероидов у беспозвоночных: изменение концентраций стероидов в зависимости от стадии зрелости, жизненного цикла и т.д. (Кудикина, 2013; Никонова и др., 2017); описание наличия и функциональной значимости гормональных рецепторов у моллюсков и существенные отличия количественного содержания стероидов в органах, несущих разную функциональную нагрузку (Кузнецова и др., 1991).

Тем не менее, результаты лабораторных исследований вызывают сомнения в однозначности полученных данных, так как моллюсков невозможно изучать в «чистых лабораторных условиях», не содержащих источников искусственного загрязнения стероидами позвоночных (Scott, 2018). У моллюсков, находящихся в лабораторных условиях, где отсутствуют всякого рода загрязнения, тестостерон и эстрадиол, постоянно выводится через поверхность тела. Наличие стероидов позвоночных в моллюсках не может рассматриваться как надежное доказательство либо эндогенного биосинтеза, либо их эндокринной роли (Scott, 2018).

Тестостерон и эстрадиол, выделяемые вместе с половыми продуктами, активно участвуют в жизнедеятельности как самих мидий, определяя их пол (Crews, 1995), так и других беспозвоночных, а также являются потенциальными стимуляторами полового поведения животных (Юрьева и др., 2002).

Цель данной работы заключалась в исследовании экскреции стероидов (тестостерона и эстрадиола) в водную среду вместе с половыми продуктами во время массового нереста мидии *Mytilus galloprovincialis*, культивируемой в Чёрном море.

Материалы и методы

Материал для исследований отбирали в акватории мидийного хозяйства бухты Ласпи Крымского побережья Чёрного моря (координаты 44°24'56" с.ш.; 33°42'19" в.д.). Моллюсков добывали водолазным способом с глубины 2–3 м 1 раз в квартал и во время массового нереста в период с 2012 по 2019 гг. Температурный диапазон воды при этом составлял от 7 до 21 °С. Всего собрано около 600 экз. мидий. Транспортировку мидий осуществляли сразу после сбора в ведрах с чистой морской водой, отобранной в акватории бухты Ласпи. Перед началом эксперимента моллюсков 4 часа выдерживали в профильтрованной морской воде для очистки пищеварительных трактов.

С целью определения массового нереста в лабораторных условиях у 150 экз. мидий извлекали гонады. Половую принадлежность и стадии репродуктивного цикла

M. galloprovincialis определяли на мазках гонад с помощью микроскопа, основываясь на анализе гистологических препаратов гонад (Пиркова и др., 2019).

Для получения половых продуктов каждого моллюска помещали макушкой вниз в стеклянный стакан объемом 0,5 дм³. Посуда для эксперимента была химически чистой. В каждый стакан заливали профильтрованную через мембранный фильтр (размер пор 3–5 мкм) морскую воду, нагретую до 25 °С, таким образом, чтобы покрыть верхний край створок мидий, стимулируя тем самым нерест (Караванцева и др., 2012). Морская вода, в которой проходил нерест удовлетворяла следующим требованиям: рН – 7,8–8,3; концентрация Ca²⁺ – от 210 до 290 мг/л; концентрация Mg²⁺ – от 460 до 640 мг/л; соленость – 18 ‰, насыщенность воды растворенным кислородом составляла 100–110 %. Во время нереста, наступившего через 4 часа после его стимуляции, яйцеклетки оседали на дно в виде ярко-оранжевого осадка, сперма выметывалась в воду в виде белого облака. После выделения половых продуктов моллюсков удаляли из стаканов.

Половые продукты отфильтровывали от биоотложений. Воду над осадком яйцеклеток сливали, взвесь сперматозоидов центрифугировали при 1500 об./мин в течение 10 мин. В результате получали чистый однородный осадок яйцеклеток и сперматозоидов (Никонова и др., 2017). Гонады и отобранную дозатором суспензию половых продуктов от каждой особи гомогенизировали в фарфоровой ступке с добавлением минимального количества этанола (не более 10 % от объема гонад или суспензии половых продуктов). Низкая концентрация этанола в пробе (5–10 %) существенно не влияет на результат иммуноферментного анализа (Sapir et al., 2013). Пробы хранили в течение суток при 4–8 °С, так как эстрадиол стабилен именно при такой температуре (Меньшиков, 2003). Сухую массу гонад (половых продуктов) определяли после высушивания 1 мл взвеси гомогенизированных гонад, сперматозоидов и яйцеклеток при температуре 105 °С.

Концентрацию общего тестостерона и эстрадиола в гонадах и половых продуктах определяли методом твердофазного иммуноферментного анализа с помощью автоматического анализатора закрытого типа Chorus (Diesse Diagnostica Senese SpA, Италия), на длине волны 450 нм, используя набор стандартов для иммуноферментного анализа (DRG, Германия): Testosterone ELISA (User's Manual. Testosterone ELISA. EIA–1559) с номинальными значениями: 0; 0,2; 0,5; 1; 2; 6; 16 нг/мл; Estradiol ELISA (User's Manual. Estradiol ELISA. EIA–2693) с номинальными значениями: 0; 25; 100; 250; 500; 1000; 2000 пг/мл (Никонова и др., 2017).

Относительная погрешность измерения оптической плотности не превышала ± 2,5 %. Концентрации тестостерона и эстрадиола в половых продуктах определяли в десяти повторностях. Коэффициент вариации концентрации половых гормонов не превышал 10,53 % (Никонова и др., 2017).

Результаты и обсуждение

Содержание тестостерона и эстрадиола, также как и жирных кислот (ЖК), в гонадах и половых продуктах мидии зависит от половой принадлежности и стадии полового созревания (Никонова и др., 2017). Динамика концентраций тестостерона в гонадах на разных стадиях половой зрелости связана с динамикой жирных кислот (Dridi et al., 2007; Капранова и др., 2019).

Тенденция уменьшения концентрации тестостерона и эстрадиола к концу репродуктивного цикла свидетельствует о важной роли стероидных гормонов в регуляции гаметогенеза. Количество тестостерона в гонадах мидии, как у самцов, так и самок, резко снижается от 1 к 3 стадии и в дальнейшем остается примерно на одном уровне (рис. 1).

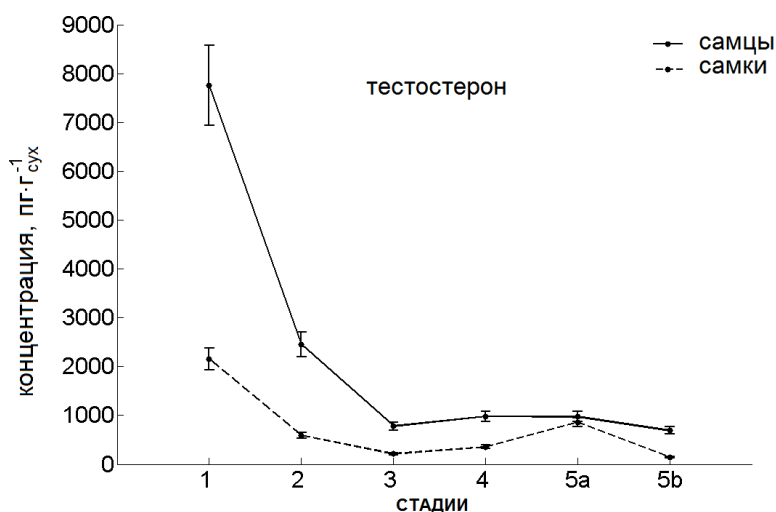


Рис. 1. Концентрация тестостерона в гонадах мидии *M. galloprovincialis* в зависимости от стадии половой зрелости. 5a и 5b – гонады до и сразу после нереста

Совсем другой характер изменения количества эстрадиола наблюдается в гонадах мидии в зависимости от стадии полового созревания (рис. 2). Содержание эстрадиола у самцов остается на одном уровне. Максимум концентраций эстрадиола отмечен у самок для 3 стадии зрелости гонад. Концентрация эстрадиола на 4 стадии половой зрелости женских гонад распределена нормально по критериям Лилиефорса и Андерсона–Дарлинга (рис. 3).

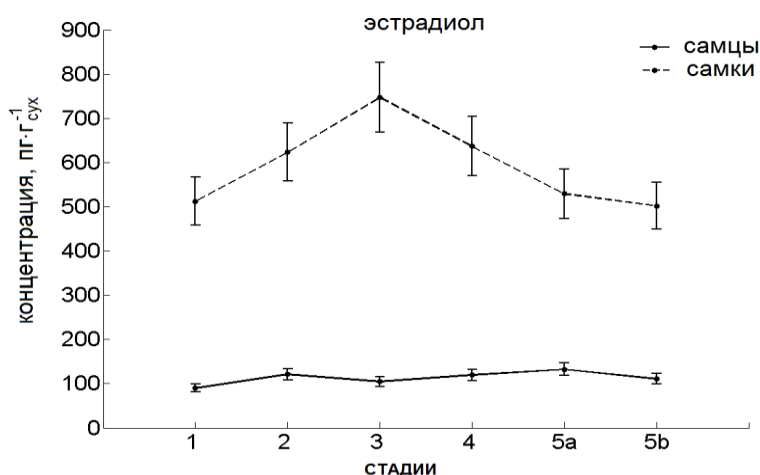


Рис. 2. Концентрация эстрадиола в гонадах мидии *M. galloprovincialis* в зависимости от стадии половой зрелости. 5a и 5b – гонады до и сразу после нереста

Установлено, что липиды мидий накапливают стероидные гормоны (Капанова и др., 2019).

Диаграмма относительного содержания жирных кислот в гонадах и половых продуктах на разных стадиях половой зрелости представлена на рис. 4.

Содержание ЖК максимально на 1 стадии полового созревания и в половых продуктах (яйцеклетках и сперматозоидах). К концу репродуктивного цикла концентрация ЖК снижается. На 2–4 стадиях полового созревания в мужских гонадах концентрация НЖК ниже, чем в женских. Вероятно, это связано с различной концентрацией тестостерона в мужских и женских гонадах. Тестостерон способствует снижению жировых запасов (Капанова и др., 2019).

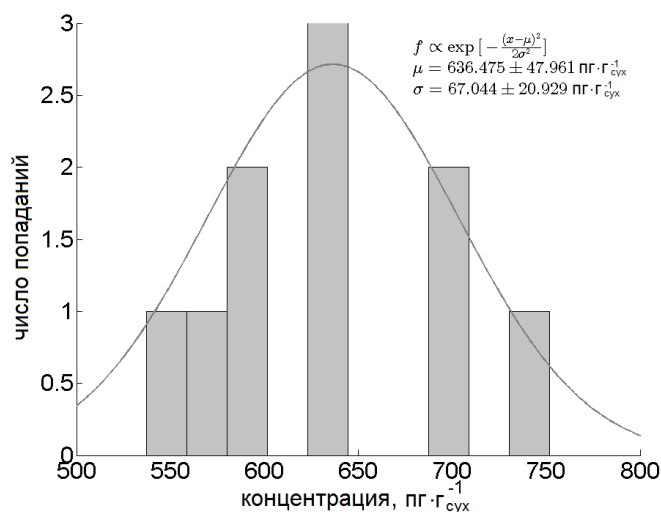


Рис. 3. Аппроксимация распределения функции Гаусса концентрации эстрадиола в гонадах на 4 стадии половой зрелости мидии *M. galloprovincialis*

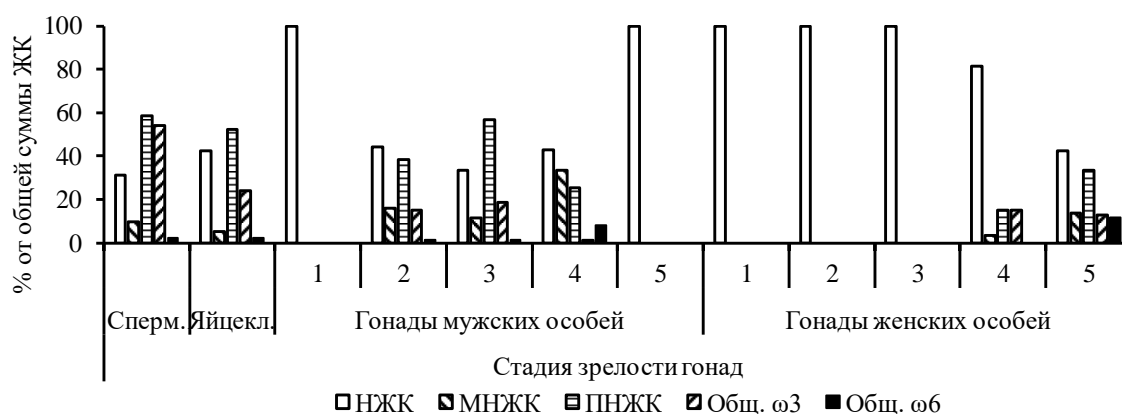


Рис. 4. Жирнокислотный состав сперматозоидов, яйцеклеток и гонад разных стадий половой зрелости мидии *M. galloprovincialis* (% от суммы всех жирных кислот). НЖК – сумма насыщенных жирных кислот, МНЖК – сумма мононенасыщенных жирных кислот, ПНЖК – сумма полиненасыщенных жирных кислот, общ. $\omega 3$ – сумма омега 3 жирных кислот, общ. $\omega 6$ – сумма омега 6 жирных кислот.

Особую ценность представляют половые продукты, в которых относительное содержание МНЖК, ПНЖК и половых гормонов достигает максимальных значений по сравнению с гонадами (рис. 4). В сперматозоидах концентрация тестостерона превышает его концентрацию в гонадах в среднем более чем в пять раз и на три порядка, чем в яйцеклетках. Максимальная концентрация тестостерона в пересчете на 1 г. сухой массы отмечена в половых продуктах у мужских особей (табл. 1). Средняя концентрация эстрадиола в яйцеклетках в 3 раза выше, чем в сперме, что подтверждает общее положение, что эстрадиол по своей природе является преимущественно женским гормоном.

Таблица 1.
Содержание стероидных гормонов в половых продуктах мидии *M. galloprovincialis*

Половые продукты	Концентрация стероидных гормонов, пг/г _{сух.}			
	Общий тестостерон		Эстрадиол	
	Самцы	Самки	Самцы	Самки
Яйцеклетки	Н.о.	10,1 ± 4,8	Н.о.	539,5 ± 122,8
Сперматозоиды	14284,8 ± 259,2	Н.о.	194,4 ± 59,2	Н.о.

Примечание: н.о. – не обнаружено.

Мидии *M. galloprovincialis*, являясь доминирующим по биомассе видом в донных сообществах, играют важную роль в донных экосистемах, так как вовлекают в биотический круговорот химические вещества естественного и антропогенного происхождения, участвуют в процессе обмена вещества и энергии (Биоэнергетика, 1990). В настоящее время на Чёрном море растёт количество морских ферм по выращиванию мидий, что приводит к увеличению биомассы этих моллюсков в прибрежье. Поэтому существует потребность в пересмотре и обновлении представлений о функционировании мидийных хозяйств. Так, уже исследован поток биологически активных веществ – каротиноидов в системе «среда – мидия (*Mytilus galloprovincialis*) – биоотложения мидий» и получены предварительные балансовые данные о потоке каротиноидов из пищи мидии в биоотложения (Поспелова и др., 2003). Установлена зависимость содержания кадмия, свинца, меди, никеля, цинка, железа в мягких тканях и раковинах мидии от индивидуального возраста моллюсков (Козинцев, 2002; Рябушко и др., 2002; Караванцева и др., 2012).

Тем не менее, в литературе до сих пор отсутствуют сведения о количестве биологически активных веществ, выделяемых мидиями в акватории морской фермы вместе с половыми продуктами (спермой и яйцеклетками), хотя ранее было показано, что производные стероидов играют роль в гормональной регуляции метаболических процессов у эукариот (Wakeham et al., 1990). Имеются данные о содержании тестостерона и эстрадиола в гонадах типичного представителя инфауны двухстворчатого моллюска *Sinonovacula constricta*, обитающего в верхней сублиторали Желтого моря (Yan et al, 2011). Установлено, что средняя концентрация общего тестостерона в женских и мужских гонадах *S. constricta* составляет 1870 пг/г и 8060 пг/г, соответственно. Изменение концентрации эстрадиола в женских гонадах *S. constricta* происходит скачкообразно, а в мужских – практически остается на одном уровне, достигая минимального значения к концу репродуктивного цикла. Общая концентрация эстрадиола в гонадах мужских особей значительно ниже, чем женских. Поскольку гормоны принимают непосредственное участие в процессах биосинтеза, то снижение уровня стероидных гормонов происходит к окончанию репродуктивного цикла животных.

В крымском прибрежье существует два четко выраженных пика размножения мидий: осенний и весенний (Холодов и др., 2017). При этом индикатором скорости созревания и развития мидий является температура воды. Многолетние исследования показали, что осенний пик размножения начинается в конце августа и продолжается в сентябре – середине октября. К концу октября в гонадах моллюсков начинается посленерестовая перестройка (Золотницкий, 2005). Осенний пик размножения более продолжителен, чем весенний. Зимой наблюдается период покоя с небольшой вспышкой размножения в декабре.

С повышением температуры воды до 8–9 °С начинается весеннее размножение мидий (50 % обследованных мидий находятся в состоянии нереста). В мае наступает фаза покоя. Известно, что в весенний и осенний периоды в нересте участвует 55–80 % моллюсков, а в зимний – 47 % (Холодов и др., 2017). Температурный диапазон при этом составляет от 7 до 21 °С. Для определения начала массового размножения мидий, начиная с января, два раза в месяц необходимо проводить исследование состояния гонад мидий. Когда около 50 % обследованных мидий будут находиться в состоянии нереста (гонады текут) и не менее 25 % мидий будут иметь уже пустые гонады, наступает нерестовый период – время, в течение которого происходит многократный вымет половых продуктов до полного опустошения гонад.

Данные, полученные нами ранее, дают возможность рассчитать концентрации тестостерона и эстрадиола, экскретируемые культивируемыми мидиями во время нереста, а также оценить количество гормонов, попадающих в морскую среду вместе с

половыми продуктами (Никонова и др., 2017). Для этого используем данные по содержанию тестостерона и эстрадиола в половых продуктах мидии (табл. 1) и количественным характеристикам моллюсков, выращиваемых на морской ферме (Холодов и др., 2017).

Наиболее простой моделью для оценки количества стероидов, выделяемых в водную среду культивируемыми мидиями, является расчетный метод, учитывающий число особей, выращиваемых на определенном участке фермы, а также соотношение числа самцов и самок в выборке. Для этого подразумевают, что все экземпляры в выборке мужского пола. Если в 1 грамме сухой массы сперматозоидов содержится $14284,8 \pm 259,2$ пг/г тестостерона, а масса половых продуктов, полученных от одного самца, составляет 0,007 г сух./особь, тогда количество тестостерона в сухой массе сперматозоидов, выметанных одним самцом, составит: $14284,8$ пг/г сух. \times 0,007 г сух./особь = 1000 пг/особь. Так как в тонне мидий содержится примерно 71124 особей (Холодов и др., 2017), то количество тестостерона, выделяемое одной тонной самцов вместе с половыми продуктами, составит 71124000 пг/т или 0,1 мг/т (табл. 2). Аналогичным способом можно пересчитать концентрацию эстрадиола в сперматозоидах. Если принять, что в тонне мидий присутствуют исключительно самки, тогда при сухой массе яйцеклеток, выметанных одной особью, равной $0,360 \pm 0,121$ г/особь (Караванцева и др., 2012), количество эстрадиола, выделяемое одной самкой, составит: $539,5$ пг/г сух. \times 0,360 г сух./особь = 194,3 пг/особь. В тонне мидий количество эстрадиола составит 13821377,6 пг/т или 0,014 мг/т (табл. 2).

Таблица 2.
Количество тестостерона и эстрадиола, поступающее в окружающую среду вместе с половыми продуктами, в расчете на одну тонну мидий *M. galloprovincialis*

Половые продукты	Количество стероидных гормонов, мг/т			
	Общий тестостерон		Эстрадиол	
	Самцы	Самки	Самцы	Самки
Яйцеклетки	н.о.	0,0005	н.о.	0,014
Сперматозоиды	0,1	н.о.	0,005	н.о.

Примечание: н.о. – не обнаружено.

Соотношение отнерестившихся самок и самцов не является постоянной величиной и оценивается из выборки, включающей 100–150 экземпляров мидий. Например, если соотношение отнерестившихся в лабораторных условиях моллюсков составляло 1 : 4 (самки : самцы), то в тонне мидий будет насчитываться 14225 особей женского пола и 56899 – мужского. Количество эстрадиола, выделяемое 14225 самками, составит 2751115 пг/т или 0,013 мг/т, а количество тестостерона, выделяемое одной тонной самцов вместе с половыми продуктами, – 56899000 пг/т или 0,07 мг/т. Используя полученные данные, несложно рассчитать баланс стероидов между морской фермой, несущей 100 т мидий, и окружающей средой, учитывая, что в марте на одном коллекторе содержится 180 экз. мидий размерной группы 51–60 мм, а в октябре всего 35 экземпляров (Холодов и др., 2017).

Выводы

На основании проведенных исследований выявлены тенденции изменения содержания тестостерона и эстрадиола в гонадах и половых продуктах мидии *M. galloprovincialis*. Показано, что моллюски способны поглощать стероиды из окружающей среды и сохранять их в течение длительных периодов посредством этерификации с жирными кислотами, поддерживая баланс между свободными и связанными формами гормонов. Неэтерифицированные стероиды экскретируются

мидиями в водную среду вместе с половыми продуктами. Впервые рассчитано количество тестостерона и эстрадиола, выделяемых во время нереста в водную среду одной тонной мидий. Во время нереста концентрации тестостерона и эстрадиола не постоянны, так как зависят от ряда факторов: сезонности, температуры, состояния гонад, условий выращивания мидий. Тестостерон и эстрадиол, выделяемый вместе с половыми продуктами мидий, активно участвует в жизнедеятельности, как самих мидий, так и других гидробионтов.

Список литературы

1. Золотницкий А.П. Экологические закономерности размножения мидии (*Mytilus galloprovincialis* Lam.) в различных районах Черного моря // Ученые записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского. Серия «Биология, химия». 2005. Т. 18 (57), № 2. С. 21–33.
2. Капранова Л.Л., Нехорошев М.В., Малахова Л.В., Рябушко В.И., Капранов С.В., Кузнецова Т.В. Жирнокислотный состав гонад и половых продуктов двустворчатого моллюска *Mytilus galloprovincialis* Lam. (1819) из Черного моря на разных стадиях половой зрелости // Журнал эволюционной биохимии и физиологии. 2019. Т. 55, № 6. С. 398–406. doi: 10.1134/S0044452919050085
3. Караванцева Н.В., Поспелова Н.В., Бобко Н.И., Нехорошев М.В. Методика отбора половых продуктов мидии *Mytilus galloprovincialis* Lam. // Системы контроля окружающей среды. 2012. № 17. С. 184–187.
4. Козинцев А.Ф., Рябушко В.И. Накопление тяжелых металлов в мидиях, культивируемых в бухте Казачья Чёрного моря // Морські біотехнічні системи. Севастополь. 2002. Вып. 2. С. 222–230.
5. Кудикина Н.П. Стероидные гормоны в жизненном цикле двустворчатых моллюсков // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. 2013. Вып. 7. С. 79–85.
6. Кузнецова Л.А., Плеснева С.А., Перцева М.Н. Биохимические механизмы проведения гормонального сигнала у беспозвоночных // Биологические мембраны. 1991. Т. 8. С. 1142–1144.
7. Меньшиков В.В. Обеспечение качества лабораторных исследований. Проаналитический этап. – М.: Юнимед – пресс, 2003. 206 с.
8. Никитина С.М. Стероидные гормоны у беспозвоночных животных. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1982. 169 с.
9. Никонова Л.Л., Нехорошев М.В., Рябушко В.И. Общий тестостерон и эстрадиол в гонадах и половых продуктах двустворчатого моллюска *Mytilus galloprovincialis* Lam. // Журнал эволюционной биохимии и физиологии. 2017. Т. 53, № 6. С. 459–461.
10. Пиркова А.В., Ладыгина Л.В., Щуров С.В. Формирование поселений мидий *Mytilus galloprovincialis* (Lamarck, 1819) на коллекторах фермы в бухте Ласпи в зависимости от экологических факторов // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского Биология. Химия. 2019. Т. 5 (71), № 1. С. 92–106.
11. Поспелова Н.В., Нехорошев М.В. Содержание каротиноидов в системе «взвешенное вещество–мидия (*Mytilus galloprovincialis* Lmk.)–биоотложения мидий» // Экология моря. 2003. Вып. 64. С. 62–66.
12. Рябушко В.И., Козинцев А.Ф., Макаrchук Т.Л., Шинкаренко В.К. Содержание тяжелых металлов в мидии *Mytilus galloprovincialis* Lam. из бухты Казачья Чёрного моря // Морські біотехнічні системи. Севастополь. 2002. Вып. 2. С. 215–221.

13. Финенко Г.А., Романова З. А., Аболмасова Г.И. Экологическая энергетика черноморских мидий / Ред. Г.Е. Шульман, Г.А. Финенко. Биоэнергетика гидробионтов. – Киев: Наук. думка, 1990. С. 32 – 72.
14. Холодов В.И., Пиркова А.В., Ладыгина Л.В. Выращивание мидий и устриц в Черном море. – Воронеж: ООО «Издатпринт», 2017. 240 с.
15. Юрьева М., Лисаковская О.В., Акулин В.Н., Кропотов А.В. Гонады морских ежей – источник для создания препаратов, стимулирующих половое поведение // Биология моря. 2003. Т. 29, № 3. С. 213–216.
16. Crews D., Bergeron J., McLachlan J. The role of estrogen in turtle sex determination and the effect of PCBs // Environmental Health Perspectives. 1995. Vol. 103. P. 73–77. Doi: 10.1289/ehp.95103s773
17. Dridi S., Romdhane S.M., Elcafsi M. Seasonal variation in weight and biochemical composition of the Pacific oyster, *Crassostrea gigas*, in relation to the gametogenic cycle and environmental conditions of the Bizert lagoon, Tunisia // Aquaculture. 2007. Vol. 263, iss.1–4. P. 238–248. Doi: 10.1016/j.aquaculture.2006.10.028
18. Fingerman M., Nagabhushanam R., Sarojini K. Vertebrate-type hormones in crustaceans: localization, identification and functional signification // Zoological Science. 1993. Vol.10. No. 1. P. 13–29.
19. Giusti A, Joaquim-Justo C. Esterification of vertebrate like steroids in molluscs: a target of endocrine disruptors? // Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology. 2013. Vol. 158, iss. 4. P. 187–198. Doi. 10.1016/j.cbpc.2013.08.003
20. Gottfried H., Lulis O. Steroids of Invertebrates: The in Vitro Production of 11-ketotestosterone and Other Steroids by the Eggs of the Slug, *Arion ater* Rufus (Linn.) // Nature. 1966. Vol.12. P. 1488–1489. Doi: 10.1038/2121488a0
21. Janer G., Porte C. Sex steroids and potential mechanisms of non-genomic endocrine disruption in invertebrates // Ecotoxicology. 2007. Vol. 16, iss. 1. P. 145–160. Doi: 10.1007/s10646-006-0110-4
22. Mathieson P., Gibbs P.E. Critical appraisal of the evidence for tributyltin-mediated endocrine disruption in mollusks // Environmental Toxicology and Chemistry. 1998. Vol. 17, iss.1. P. 37–43. Doi: 10.1002/etc.5620170106
23. Oehlmann J., Benedetto Di P., Tillmann M., Duft M., Oetken M., Schulteoehlmann U. Endocrine disruption in prosobranch molluscs: evidence and ecological relevance // Ecotoxicology. 2007. Vol. 16, iss. 1. P. 29–43. DOI: 10.1007/s10646-006-0109-x
24. Purdom C.E., Hardiman P.A., Bye V.J., Eno N.C., Tyler C.R., Sumpter J.P. Estrogenic effects of effluents from sewage treatment works // Journal of Chemical Ecology. 1994. Vol. 8. P. 275–85. Doi:10.1080/02757549408038554
25. Sapir A., Shalev A.H., Skalka N., Bronshtein A., Altstein M. Development of an enzyme – linked immunosorbent assay and a beta-1 adrenergic receptor – based assay for monitoring the drug atenolol // Environmental Toxicology and Chemistry. 2013. Vol. 32, iss. 3. P. 585–593. Doi: 10.1002/etc.2078
26. Schwarz T. I., Katsiadaki I., Maskrey B.H., Scott A.P. Uptake and metabolism of water-borne progesterone by the mussel, *Mytilus* spp. (Mollusca) // Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology. 2018. Vol. 178. P. 13–21. Doi:10.1016/j.jsbmb.2017.10.016
27. Scott A. Do mollusks use vertebrate sex steroids as reproductive hormones? Part I: Critical appraisal of the evidence for the presence, biosynthesis and uptake of steroids // Steroids. 2012. Vol. 77, iss. 13. P. 1450–1468. Doi: 10.1016/j.steroids.2012.08.009
28. Scott A. Is there any value in measuring vertebrate steroids in invertebrates? // General and Comparative Endocrinology. 2018. Vol. 265. P. 77–82. Doi: 10.1016/j.ygcen.2018.04.005
29. Wakeham S.G., Beier J.A. Fatty acid and sterol biomarkers as indicators of particulate matter source and alteration processes in the Black Sea // Deep Sea Research Part A.

- Oceanographic Research Papers. 1990. Vol. 38. P. 943–968. Doi: 10.1016/S0198–0149(10)80018–4
30. Yan H., Li Q., Liu W., Ke Q., Yu R., Kong L. Seasonal changes of oestradiol–17b and testosterone concentrations in the gonad of the razor clam *Sinonovacula constricta* (Lamarck, 1818) // Journal of Molluscan Studies. 2011. Vol. 77, iss. 2. P. 116–122. Doi: 0.1093/mollus/eyq045

**TESTOSTERONE AND ESTRADIOL EXCRETION BY CULTIVATED MUSSELS
MYTILUS GALLOPROVINCIALIS LAM. (BLACK SEA)**

Капранова Л.Л.

*A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS,
Sevastopol, Russian Federation
e-mail: lar_sa1980@mail.ru*

In this review, data on the concentrations of sex hormones (testosterone and estradiol) in the bivalve mollusk *Mytilus galloprovincialis* Lam. (1819) living in the Black Sea are presented and the concentrations of testosterone and estradiol released into the environment during the mass spawning of the cultivated mussel *M. galloprovincialis* are calculated. It is found that the maximum concentration of testosterone (0.1 mg/ton) is excreted by the mussel males into the environment with sperm. With the eggs of female mussels, up to 10 mg/ton of estradiol can be released into the aquatic environment. The concentrations of testosterone and estradiol during the mussel spawning are not constant, and they depend on a number of factors: seasonality, gonad size, mussel nutrition and growth conditions, population of other aquatic organisms, and also on anthropogenic impact. Testosterone and estradiol excreted with the sex products of mussels are involved in the vital functions of mussels and other aquatic animals.

Key words: mussel *Mytilus galloprovincialis*; sex products; testosterone; estradiol; Black Sea.

Капранова младший научный сотрудник лаборатории проблем
Лариса идентификации видов, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных
Леонидовна морей имени А.О. Ковалевского РАН», e-mail: lar_sa1980@mail.ru

Поступила в редакцию 18.02.2020 г.

УДК 57.04:574.34

ОЦЕНКА АНТИРАДИКАЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ ВТОРИЧНЫХ КАРОТИНОИДОВ У ЧЕТЫРЁХ ВИДОВ ЗЁЛЕННЫХ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ ПОРЯДКА SPHAEROPLEALES В СИСТЕМЕ *IN VITRO**

Чубчикова И.Н., Дробецкая И.В.

ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН»,
г. Севастополь, Российская Федерация
e-mail: chubchikova@mail.ru, drobotzkaya@mail.ru

Представлены новые данные по ростовым характеристикам, накоплению вторичных каротиноидов и их антирадикальной активности у 4-х видов зелёных микроводорослей порядка Sphaeropleales *Pseudospongiococcum protococcoides*, *Bracteacoccus minor*, *Coelastrella rubescens* и *Cromochloris zofingiensis* в условиях двухстадийной накопительной культуры с использованием мочевины в качестве единственного источника азота. Показано, что все исследуемые виды хорошо растут на среде с мочевиной. На первой стадии их удельные скорости роста (максимальные 0,28–0,37 сут⁻¹ и средние 0,15–0,17 сут⁻¹) и продуктивность по сухой биомассе (0,08–0,09 г·л⁻¹·сут⁻¹) различались незначительно. На второй стадии индукцию биосинтеза вторичных каротиноидов осуществляли при помощи стресс-комплекса, включавшего: 10-кратное уменьшение азота и фосфора в среде, 12-кратное разбавление культур, удвоенное круглосуточное освещение, снабжение CO₂, внесение на 8-е сутки NaCl до концентрации в среде 200 ммоль·л⁻¹. Реакция культур на стресс-индукцию вторичного каротиногенеза была сходной: накопление биомассы, снижение уровня хлорофиллов и накопление вторичных каротиноидов. Продуктивность культур по биомассе за весь эксперимент составила 0,41–0,53 г·л⁻¹·сут⁻¹ при максимальных величинах у *P. protococcoides* и *C. rubescens* с конечным содержанием суммарных каротиноидов в сухой биомассе 2,3–3,9 мг·г⁻¹ при максимальных значениях у *B. minor*. Для всех видов был получен технологически значимый выход вторичных каротиноидов из литра исходной культуры (1,1–1,6 мг·л⁻¹·сут⁻¹). Антирадикальную активность экстрактов каротиноидов исследуемых видов оценивали по реакции со стабильным радикалом 2,2-дифенил-1-пикрилгидразилом (DPPH[•]) по двум параметрам: «процент ингибирования DPPH[•]» (I%) и «эффективная концентрация» (EC₅₀). Экстракты всех видов продемонстрировали более высокую антирадикальную активность (на 49,30–70,33%), чем синтетический антиоксидант 2,6-бутилгидрокситолуол (ВНТ, или ионол). Показано, что по совокупности продукционных и антирадикальных свойств *C. rubescens* и *P. protococcoides*, эти виды можно рассматривать в качестве наиболее перспективных потенциальных источников вторичных каротиноидов для пищевой и фармацевтической индустрии.

Ключевые слова: *Pseudospongiococcum protococcoides*, *Bracteacoccus minor*, *Coelastrella rubescens*, *Cromochloris zofingiensis*, двухстадийная накопительная культура, DPPH[•], антирадикальная активность, каротиноиды, эффективная концентрация.

Введение

Свободные радикалы (СР) и другие активные формы кислорода (АФК) являются побочными продуктами окислительного метаболизма в растительных и животных организмах (Young, Woodside, 2001; Demidchik, 2015; Sharma et al., 2012). Это гидроксил-радикал (ОН[•]), супероксид-радикал (O₂^{•-}), пероксид-радикалы (ROO[•]), синглетный кислород (¹O₂[•]), радикал оксида азота (II) и др. Из-за наличия на внешнем электронном

* Работа выполнена в соответствии с планом научно-исследовательской работы ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского» на 2018–2020 гг. в рамках темы № 0828-2018-0004 «Исследование механизмов управления продукционными процессами в биотехнологических комплексах с целью разработки научных основ получения биологически активных веществ и технических продуктов морского генезиса», подраздел 2.4 «Экспериментальные исследования морфо-биологических и физиолого-биохимических характеристик зеленых микроводорослей как потенциальных промышленных источников кетокаротиноидов группы астаксантина».

уровне неспаренного электрона эти молекулы обладают исключительной реакционной способностью. В низких концентрациях они играют важную роль в различных физиологических процессах – выработке энергии, фагоцитозе, реакциях микросомального окисления, самообновлении мембранных структур, сигнальной трансдукции, апоптозе и др. (Valko et al., 2007; Zuo et al., 2015). Повышение концентрации этих соединений в клетке и организме в результате воздействия негативных факторов (высокие дозы радиации и ультрафиолетового излучения, интоксикация, действие озона, органических растворителей, поллютантов и др.) приводит к окислительному стрессу, который вызывает повреждения биомолекул – нуклеиновых кислот, липидов, белков и др. (Halliwell, 1996; McCord, 2000; Zuo et al., 2015; Tan et al., 2018; Kalam et al., 2015). Деградация и/или модификация этих молекул под действием СР способна провоцировать ряд патологий у человека и животных (онкологические, сердечно-сосудистые, кожные, воспалительные заболевания, атеросклероз, сахарный диабет, катаракта, возрастная мышечная дистрофия, артриты, неврологические расстройства и др.) (Finkel, Holbrook, 2000; Tan et al., 2018; Zuo et al., 2015; Kalam et al., 2015). Деструктивное влияние окислительного стресса в животных клетках ослабляется с помощью эндогенных (глутатион, убихинол, мочевая кислота) и экзогенных (витамины С и Е, каротиноиды (Кар), липоевая кислота, флавоноиды и др.) антиоксидантов (АО) (Kim et al., 2007; Rahman, 2007; Varela et al., 2015; Kalam et al., 2015). Синтетические АО, например, 2,6-бутилгидрокситолуол (ВНТ, или ионол) и бутилгидроксианизол (ВНА), считаются не вполне безопасными, поскольку их употребление может вызывать токсические, канцерогенные и мутагенные эффекты (Whysner et al., 1994). Поэтому спрос на природные АО, инициированный рекомендациями ВОЗ по полному исключению синтетических биологически активных веществ и красителей из производства продуктов питания и кормов (Carlsson et al., 2007; Varela et al., 2015;), растёт. Особенно эффективными АО в отношении $^1\text{O}_2^*$ и ROO^* являются Кар, и, в особенности, вторичные каротиноиды (ВКар) (Varela et al., 2015;). Эти биологически активные соединения широко используются в аквакультуре лососёвых рыб и ракообразных, медицине, пищевой и косметической промышленности. Однако до сих пор около 90% всех производимых Кар получают путем химического синтеза и только около 10% – из природного сырья (März, 2008).

Источником промышленного производства природного АО – вторичного каротиноида атаксантина (Аст) – в настоящее время (помимо дрожжей *Xanthophyllomyces dendrorhous*) служит зелёная микроводоросль *Haematococcus pluvialis* (пор. Chlamydomonadales) – экстремофитный обитатель временных пресноводных водоёмов. Содержание Аст в клетках этой микроводоросли в сухой биомассе (СБ) достигает 3,8% (Wang et al., 2013). Но выращивание *H. pluvialis* осложняется рядом неблагоприятных для массового культивирования биологических особенностей, таких как низкая скорость роста и значительная доля погибших к концу культивирования клеток (Hagen et al., 2001), а содержание Аст в биомассе *X. dendrorhous* невелико (30-800 мг·кг⁻¹) (Dufossé, 2009).

В качестве альтернативы перспективным сырьём для производства природных Кар могут служить аэрофитные и эдафитные хлорококковые микроводоросли, которые, как и *H. pluvialis*, существуют в условиях постоянного абиотического стресса (пересыхание, перегрев или переохлаждение, избыточная инсоляция, недостаток элементов минерального питания и др.) (Чубчикова и др., 2009). При наступлении неблагоприятных условий содержание АФК в клетках микроводорослей увеличивается. Декомпенсированный окислительный стресс может вызывать перекисное окисление липидов мембран, дисфункцию повреждённых молекул протеинов и нуклеиновых кислот (Demidchik, 2015; Sharma et al., 2012), повреждаются хлоропласты, митохондрии, ядро и другие органеллы, что может стать причиной гибели клетки (Pikula et al., 2019).

Система противодействия разрушительному влиянию АФК в клетках микроводорослей (как и других растений) представлена антиоксидантами ферментной (каталаза, пероксидаза, супероксиддисмутаза и др.) и неферментной (флавоноиды, стероиды, Кар, убихинон, витамины А, Е, С, К и др.) природы (Pikula et al, 2019; Колупаев, Ястреб, 2015; Sharma et al., 2012; Романенко и др., 2015). Наиболее эффективными АО неферментной природы являются Кар. Механизмом защиты от избыточной концентрации АФК, выработанным многими экстремофитными микроводорослями в процессе эволюции, является вторичный каротиногенез (ВКРГ), выражающийся в биосинтезе и накоплении в цитоплазме клеток С40-каротиноидов (вторичных каротиноидов), не участвующих в фотосинтезе, но выполняющих защитную роль. ВКар ингибируют развитие окислительного стресса в клетках и тем самым обеспечивают возможность метаболических перестроек, необходимых для образования стадий покоя, в которых водоросли переживают неблагоприятные периоды. Явление ВКРГ характерно преимущественно для микроводорослей порядков Sphaeropleales и Chlamydomonadales, среди которых насчитывается около 80 каротиногенных видов (Минюк и др., 2010). У зелёных микроводорослей порядка Sphaeropleales в клетках, помимо Аст, синтезируется широкий спектр Кар – его метаболических предшественников. Среди них преобладают кантаксантин, адониксантин и его моно- и диэфиры, адонирубин и его моноэфиры, эхиненон, которые характеризуются сходной с Аст биологической активностью (Чубчикова и др., 2011; Minyuk et al., 2017).

Эти виды отличаются высокой скоростью роста, в том числе и на недорогих органических субстратах. Несмотря на то, что содержание Кар в биомассе этих видов намного ниже, чем у *H. pluvialis*, быстрый рост и удешевление культивирования может компенсировать этот недостаток. Целью настоящей работы было сравнение антиоксидантного потенциала экстрактов биомассы четырёх видов зелёных микроводорослей порядка Sphaeropleales: *Pseudosporangium protocooides*, *Bracteacoccus minor*, *Coelastrella rubescens* и *Chromochloris zoefingiensis*, выращиваемых методом двухстадийной накопительной культуры на питательной среде с мочевиной в качестве единственного источника азота.

Материалы и методы

Объектом исследования являлись четыре вида зелёных микроводорослей порядка Sphaeropleales, предметом исследования – экстракты каротиноидов, полученные из их биомассы.

Pseudosporangium protocooides Gromov (штамм IBSS-10 = CALU-221) и *Chromochloris zoefingiensis* (Dönn) Fucíková & Lewis (штамм CALU-190 = ССАР-211/14 = UTEX 32 = SAG 211-14 = АТТС 30412) были получены в 2006 г. из Музея живых культур микроорганизмов Санкт-Петербургского государственного университета), *Bracteacoccus minor* (R. Chodat) Petrová 1931 (штамм IBSS-88 = АСКУ 506-06) был передан в 2009 году из Коллекции культур водорослей Киевского национального университета имени Тараса Шевченко, а *Coelastrella rubescens* (Vinatzer) Kaufnerová et Eliás (штамм IPPAS H-350 = IBSS-12) – в 2006 г. из коллекции Института физиологии растений РАН.

Микроводоросли выращивали методом двухстадийной накопительной культуры, описанном Минюк (Минюк и др., 2015), на питательной среде ВВМ с заменой нитрата натрия NaNO_3 на мочевины $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$.

На первой («зеленой») стадии концентрация мочевины составляла 3 ммоль·л⁻¹. Освещённость на наружной поверхности колб обеспечивали люминесцентными лампами «Feron», Россия (DL 28W T4 6400K), плотность потока фотонов – 120 мкмоль·м⁻²·с⁻¹), фотопериод – 15 ч свет : 9 ч темнота. Для предотвращения перегрева культур температуру среды (25±1 °С) поддерживали, охлаждая лампы встречными потоками

воздуха от двух вентиляторов. Объём культур в стеклянных конических колбах составлял 0,4 л. Культуры круглосуточно барботировали атмосферным воздухом со скоростью $0,3 \text{ л} \cdot \text{мин}^{-1} \cdot \text{л}^{-1}$. Начальная биомасса составляла для *P. protococcoides*, *B. minor*, *C. rubescens* и *C. zofingiensis* $0,121 \pm 0,003$; $0,134 \pm 0,002$; $0,104 \pm 0,001$ и $0,123 \pm 0,008 \text{ мг} \cdot \text{мл}^{-1}$, соответственно. Продолжительность стадии составляла 16 суток.

Стресс-индукция биосинтеза вторичных каротиноидов заключалась в резком увеличении освещённости (перевод культур на круглосуточное двухстороннее освещение по $120 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ с каждой стороны), а также шестикратном вначале (десятикратно редуцированной по мочеvine и фосфатам средой) и двукратном на 8-е сутки (с добавлением NaCl до концентрации $200 \text{ ммоль} \cdot \text{л}^{-1}$ в качестве ускорителя каротиногенеза) разбавлении культур. К воздуху для барботирования культур добавили CO_2 (0,3 % v/v). Уровень pH, равный $7 \pm 0,5$, поддерживали при помощи pH-контроллера «Aqua Medic». «Красная» стадия длилась также 16 суток.

Содержание сухой биомассы (СБ) в культурах определяли гравиметрически (Vonshak, 1986), концентрацию мочеvine в среде – диацетилмонооксимным методом (Основы клинической..., 2013). Содержание хлорофиллов и суммарных каротиноидов в культуре и биомассе микроводорослей, а также концентрацию DPPH^{*} и Кар в пробах, определяли спектрофотометрически (спектрофотометр СФ-2000, ОКБ «Спектр», Россия) в диметилсульфоксидных и метанольных экстрактах по методикам, предложенным Lichtenthaler (Lichtenthaler, 1987) и Solovchenko (Solovchenko et al., 2010).

Антирадикальную активность (АРА) каротиноидосодержащих экстрактов биомассы исследуемых микроводорослей определяли экспресс-методом с использованием стабильного радикала 2,2-дифенил-1-пикрилгидразила (DPPH^{*}), опираясь на методические рекомендации, подробно изложенные в работе Marxen (Marxen et al., 2007).

АРА метанольных экстрактов Кар оценивали спектрофотометрически по обесцвечиванию фиолетового метанольного раствора DPPH^{*} в присутствии восстановителей (в данном случае – Кар) в сравнении с исходной окраской. Из биомассы, соответствующей 20 мл красной культуры, Кар экстрагировали 100% ацетоном, экстракт упаривали и перерастворяли каротиноиды в 2,5–3 мл (в зависимости от содержания Кар в биомассе) 100% метанола. В пробирках с притёртыми пробками готовили два параллельных ряда возрастающих концентраций суммарных Кар в метаноле, каждую в двух повторностях: ряд измерительных проб и ряд проб сравнения. Каждая измерительная проба содержала аликвоту экстракта Кар и 100 мкл метанольного раствора DPPH^{*}. Соответствующая ей по концентрации Кар проба сравнения не содержала DPPH^{*}. Объём каждой пробы составлял 1,5 мл. Объёмы аликвот концентрированного экстракта Кар подбирали в зависимости от содержания в нём суммарных Кар таким образом, чтобы концентрации каротиноидов в пробах не выходили за рамки диапазона $0,5\text{--}8 \text{ мкг} \cdot \text{мл}^{-1}$, что обеспечивает линейный характер снижения концентрации DPPH^{*} в присутствии Кар (Gupta, Ghosh, 2013; Marxen et al., 2007). Пробы спектрофотометрировали после 30-минутной экспозиции в темноте при комнатной температуре против чистого метанола на длине волны, равной 515 нм, рекомендуемой для измерения экстинкции растворов DPPH^{*} (Bandoniene et al., 2002; Molyneux, 2004). Одновременно определяли содержание Кар в пробах сравнения методом, предложенным Solovchenko (Solovchenko, 2010). Чтобы исключить влияние абсорбционных свойств экстракта микроводорослей, из значения экстинкции каждой измерительной пробы вычитали значение экстинкции парной ей пробы сравнения. По полученной разнице рассчитывали остаточную концентрацию DPPH^{*} в измерительных пробах по построенной заранее калибровочной кривой, описываемой уравнением:

$$C_{\text{DPPH}^*} (\text{мкмоль} \cdot \text{л}^{-1}) = 84,046 * A_{515} + 1.892, \quad (1)$$

с коэффициентом корреляции $R^2 = 0,995$,

где A_{515} – экстинкция раствора DPPH[•] в метаноле на длине волны 515 нм.

Анализ зависимости между содержанием Кар и остаточной концентрацией DPPH[•] в измерительных пробах позволил оценить антирадикальную активность экстрактов биомассы исследуемых микроводорослей.

Процент ингибирования свободных радикалов (I%). Долю радикалов DPPH[•], инактивированных каротиноидами, (% от начальной концентрации) рассчитывали по формуле:

$$\% \text{ ингибирования} = [(A_0 - A_1)/A_0] * 100, \quad (2)$$

где A_0 – экстинкция начальной концентрации DPPH[•], A_1 – экстинкция измерительной пробы (DPPH[•], инактивированный в присутствии Кар) (Evary, Nur, 2018).

Значение углового коэффициента в уравнении регрессии, описывающем рост доли инактивированного DPPH[•] с увеличением концентрации Кар в пробах, характеризует антирадикальную активность экстракта Кар каждого вида микроводорослей.

Эффективная концентрация (EC₅₀) – это концентрация экстракта Кар, в присутствии которой концентрация активных радикалов DPPH[•] в пробе снижается на 50% (Marxen et al., 2007). Этот параметр рассчитывали по уравнениям линейной регрессии, описывающим зависимость падения концентрации активных DPPH-радикалов с увеличением содержания присутствующих в пробе Кар. В данном эксперименте для каждого вида рассчитывали значение EC₅₀ для концентрации DPPH[•], равной 50 ммоль·л⁻¹. Для сравнения было определено значение EC₅₀ для 2,6-бутилгидрокситолуола (ВНТ, или ионола) – синтетического антиоксиданта, применяющегося в настоящее время в производстве пищевых продуктов.

Все измерения проводили в трёх биологических и трёх аналитических повторностях. На рисунках и в тексте приведены средние значения показателей и их стандартные отклонения. Достоверность различий между средними определяли по t-критерию Стьюдента при уровне значимости $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение

Замена нитрата натрия на мочевины в питательной среде для выращивания сфероплеальных микроводорослей продиктована потребностью в снижении затрат при их массовом культивировании для получения полезного продукта – каротиноидосодержащей биомассы. В литературе приводятся результаты успешного культивирования многих видов зелёных микроводорослей на органических субстратах, в том числе и на мочедине (Minyuk et al., 2019; Kim et al., 2016; Casal et al., 2011; Hsieh, Wu, 2009; Khalili et al., 2015).

Водоросли хорошо усваивали мочевины. Уже на 8-е сутки её концентрация в культуре *P. protococcoides* снизилась на 98,7%, а в остальных культурах на 85,7–89,6% от начального уровня. На 16-е сутки эксперимента мочевина в среде ни у одного вида уже не регистрировалась (рис. 1А).

Темпы роста четырёх исследуемых видов на протяжении всей стадии эксперимента были близкими. За 16 суток их биомасса увеличилась на порядок (рис. 1Б). Средние удельные скорости роста ($\mu_{\text{ср.}}$), рассчитанные по содержанию СБ (0,15–0,17 сут⁻¹), были сходными (рис. 2А). Значения максимальной удельной скорости роста ($\mu_{\text{макс.}}$) – параметра, характеризующего потенциальные возможности вида – были наиболее высокими в первые 4 суток и составляли от 0,28 сут⁻¹ у *B. minor* до 0,37 сут⁻¹ у *C. rubescens*. Средняя

продуктивность по СБ (рис. 2В) была самой низкой у *C. zofingiensis*, а самой высокой – у *P. protococcoides* (79,4 и 91,1 мг·мл⁻¹·сут⁻¹, соответственно).

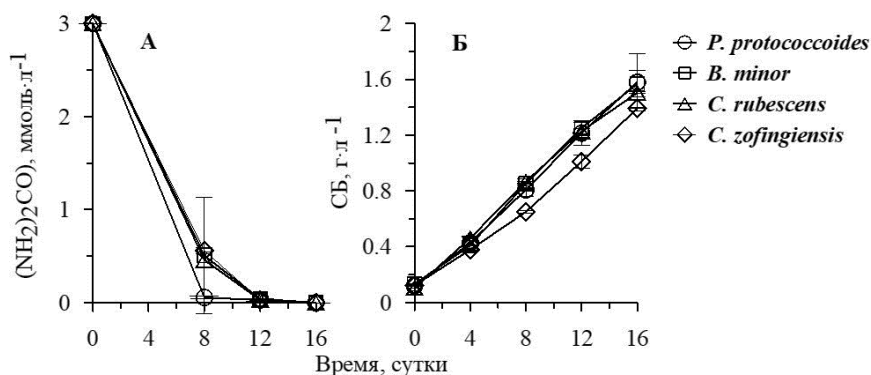


Рис. 1. Динамика убывания мочевины в среде (А) и увеличения биомассы (Б) на "зелёной" стадии эксперимента.

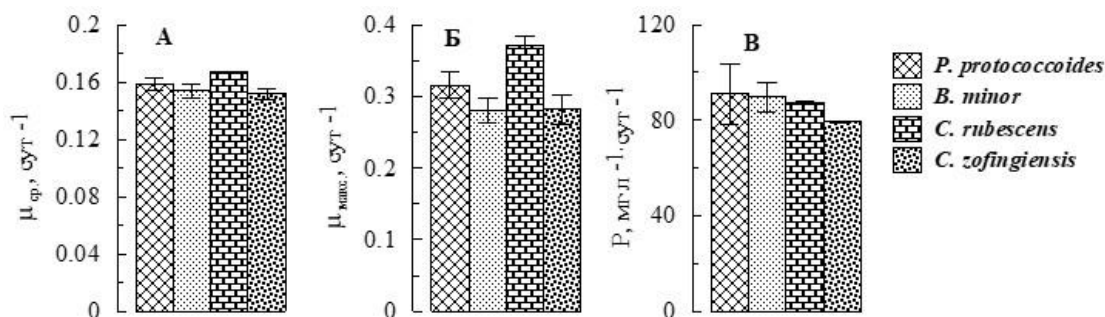


Рис. 2. Максимальная (А) и средняя (Б) удельная скорость роста, а также продуктивность культур по СБ за 16 суток (В) на "зелёной" стадии эксперимента

Близость ростовых характеристик, полученных в данном эксперименте и более ранних исследованиях при выращивании водорослей в аналогичных условиях на нитратах (Minyuk et al., 2019), указывает на возможность удешевления питательных сред (как минимум в 3 раза) для аэрофильных и наземных каротиногенных видов путём использования вместо нитратов более дешёвой и более богатой азотом мочевины.

К концу «зелёной» стадии клетки микроводорослей ещё содержали значительное количество хлорофиллов (33–46 мг·г⁻¹), но массовая доля каротиноидов в СБ достигла 0,72–0,93% (рис. 3А и 3Б). Увеличение значений индекса Кар/Хла с 0,22–0,25 на стадии активного роста культур до 0,25–0,33 в конце «зелёной» стадии может служить оценочным критерием голодания культур и их готовности к переводу на стадию вторичного каротиногенеза (рис. 3В).

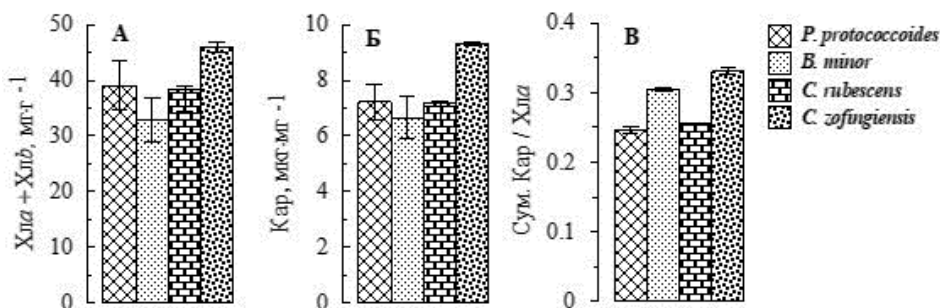


Рис. 3. Содержание хлорофиллов *a* и *b* (А) и суммарных каротиноидов (Б) в биомассе микроводорослей, а также индекс Кар/Хла (В) в конце «зеленой» стадии эксперимента

Реакция культур на стресс-индукцию вторичного каротиногенеза была сходной у всех исследуемых видов. Шестикратное разбавление культур при наличии $0,3 \text{ ммоль} \cdot \text{л}^{-1}$ мочевины оказалось недостаточным при максимально доступной интенсивности освещения, и рост культур продолжился (рис. 4А). После повторного двукратного разбавления культур и внесения NaCl увеличение плотности культур замедлилось и происходило, как показывают результаты более ранних исследований (Чубчикова и др., 2009), за счёт укрупнения клеток и накопления в них СБ.

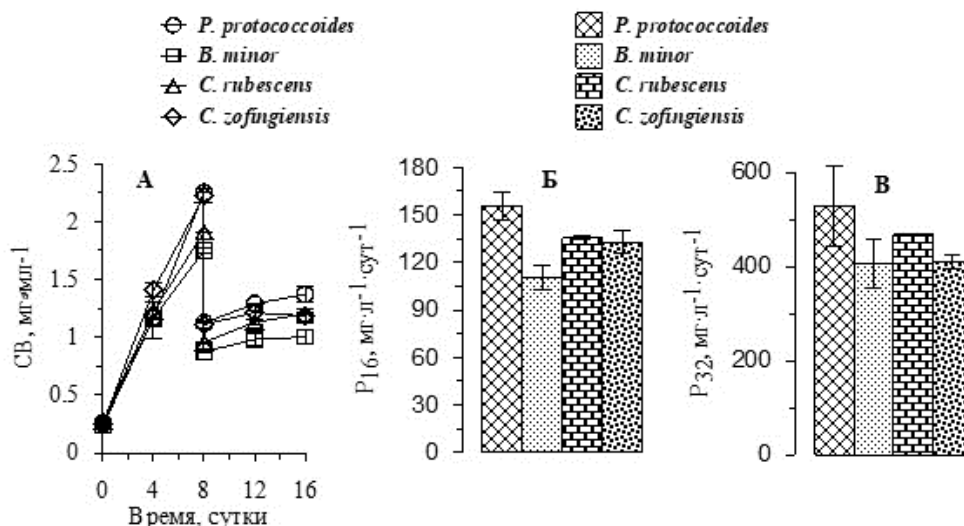


Рис. 4. Динамика изменения биомассы микроводорослей на "красной" стадии эксперимента (А), продуктивность по СВ на стадии ВКРГ (Б) и за весь эксперимент (В)

Продуктивность культур по сухому веществу ($P_{СВ}$) на стадии ВКРГ была максимальной у *P. protococcoides* ($155,63 \pm 8,54 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$) и минимальной у *B. minor* ($110,36 \pm 7,57 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$). За весь период наблюдений с учётом разведения культур $P_{СВ}$ достигла наибольших значений у *P. protococcoides* и *C. rubescens* ($528,38 \pm 86,90$ и $467,95 \pm 0,69 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$, соответственно).

Перевод культур на «красную» стадию сопровождался характерной для каротиногенных микроводорослей динамикой содержания пигментов: снижением уровня хлорофиллов и фотосинтетических каротиноидов (Минюк и др., 2015; Чубчикова и др., 2009) и накоплением ВКар (с 8-х по 16-е сутки) (рис. 5А, 5Б).

Индекс Кар/Хла в первые 8 суток увеличился 2,5 раза у *C. rubescens* и *C. zofingiensis*, в 4 раза у *P. protococcoides* и в 5,1 раза у *B. minor* практически только за счёт гораздо более медленного падения содержания Кар, чем хлорофиллов, в биомассе микроводорослей (рис. 5А, 5Б). Далее увеличение индекса в 8,9; 3,78; 5,2 и 11,1 раза у *P. protococcoides*, *B. minor*, *C. rubescens* и *C. zofingiensis* происходило за счёт разрушения молекул хлорофиллов и активного синтеза ВКар, препятствующих свободнорадикальному окислению (рис. 5В).

Конечное значение массовой доли Кар в биомассе микроводорослей составило 0,23–0,39% с максимумом у *B. minor*. При учёте выхода биомассы за весь период наблюдений (рис. 4В) это дает выход Кар, равный $1,34 \pm 0,01$; $1,59 \pm 0,13$; $1,06 \pm 0,01$ и $1,32 \pm 0,05 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$ для *P. protococcoides*, *B. minor*, *C. rubescens* и *C. zofingiensis*, соответственно.

Экстракты всех исследуемых видов проявили достаточно сильную антирадикальную активность, свойства экстрактов биомассы различались незначительно (рис. 6).

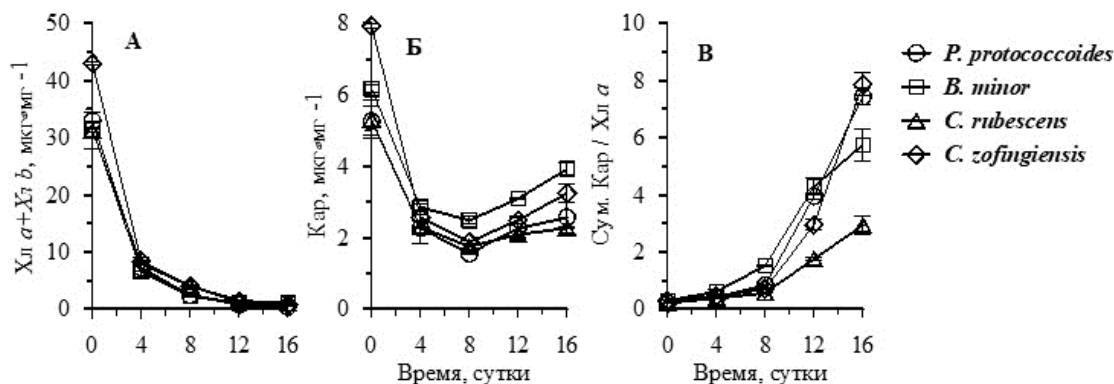


Рис. 5. Динамика содержания хлорофиллов *a* и *b* (А) и суммарных Кар (Б) в биомассе микроводорослей, а также отношения суммарных Кар/Хла в культурах (В) на "красной" стадии эксперимента

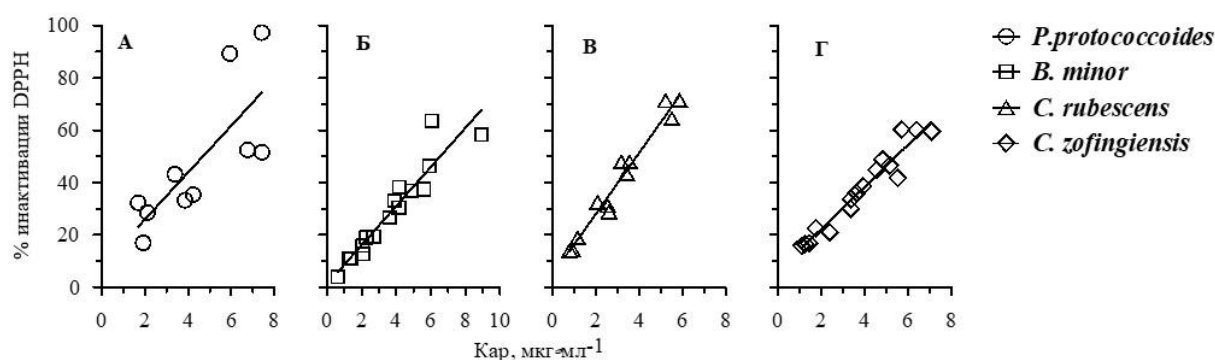


Рис. 6. Зависимость между содержанием суммарных Кар в пробе и долей инактивированного DPPH*

Зависимость восстановления DPPH-радикалов от содержания каротиноидов в реакционной смеси (% ингибирования, или I %) описывалась уравнениями линейной регрессии для *P. protococcoides*, *B. minor*, *C. rubescens* и *C. zofingiensis*, соответственно:

$$Y = 8,96 * X + 7,99 \quad (R^2 = 0,60), \quad (3)$$

$$Y = 7,46 * X + 1,17 \quad (R^2 = 0,89), \quad (4)$$

$$Y = 11,67 * X + 4,68 \quad (R^2 = 0,97), \quad (5)$$

$$Y = 8,03 * X + 6,22 \quad (R^2 = 0,94), \quad (6)$$

где *X* – содержание суммарных Кар, *Y* – % ингибирования DPPH* в пробах.

Тангенс угла наклона результирующей к оси *X* численно представлен угловым коэффициентом в уравнении регрессии. Его величина является критерием антиоксидантного потенциала вида: у более сильного антиоксиданта она больше. По этому параметру экстракты *C. rubescens* (11,67) и *P. protococcoides* (8,96) характеризуются более высокой АРА.

Существенная вариабельность коэффициентов детерминации в уравнениях может объясняться видовыми различиями состава ВКар, и в частности, долей неэтерифицированных Кар, а также возможным присутствием в экстрактах антиоксидантов некаротиноидной природы (например, флавоноидов).

Эффективную концентрацию (ЕС₅₀) для отдельных экстрактов рассчитывали по уравнениям линейной регрессии, отражающим степень снижения концентрации DPPH* вдвое (с 50 до 25 мкмоль·л⁻¹) в зависимости от содержания суммарных каротиноидов в пробе (рис. 7).

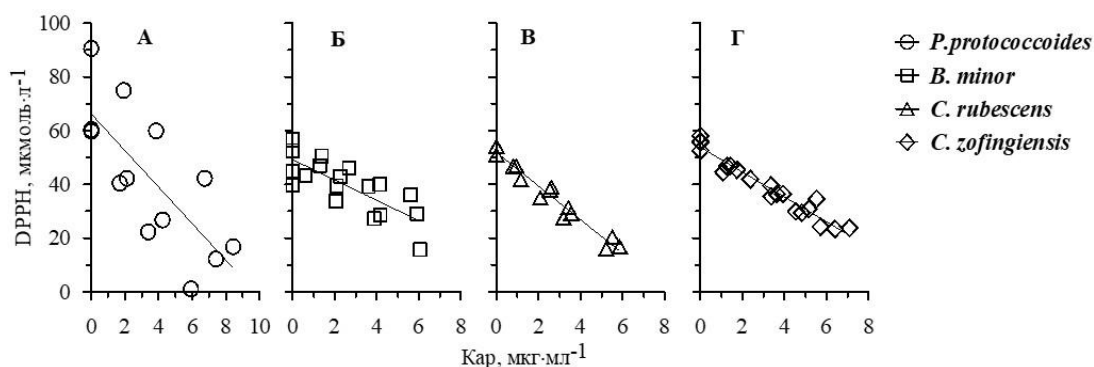


Рис. 7. Снижение концентрации DPPH* в зависимости от содержания присутствующих в пробе суммарных Кар.

Уравнения регрессии, отражающие эту зависимость, имели следующий вид:

$$P. \textit{protococcoides} \quad Y = -6,80 * X + 66,19 \quad (R^2 = 0,57), \quad (7)$$

$$B. \textit{minor} \quad Y = -3,79 * X + 49,22 \quad (R^2 = 0,61), \quad (8)$$

$$C. \textit{rubescens} \quad Y = -6,27 * X + 51,94 \quad (R^2 = 0,96), \quad (9)$$

$$C. \textit{zofingiensis} \quad Y = -4,63 * X + 53,80 \quad (R^2 = 0,94), \quad (10),$$

где X – содержание Кар, мкг·мл⁻¹, Y – остаточная концентрация DPPH*, ммоль·л⁻¹.

Значения (EC₅₀), рассчитанные по уравнениям (7–10) для каждого вида микроводорослей при начальной концентрации DPPH* в пробах 50 ммоль·л⁻¹ и выраженные в количестве Кар (мкг·мл⁻¹), представлены в таблице 1. В качестве стандарта приведено значение EC₅₀ для синтетического пищевого антиоксиданта 2,6-бутилгидрокситолуола (ВНТ, или ионола) при той же (50 ммоль·л⁻¹) начальной концентрации DPPH*.

Таблица 1.
Сравнение EC₅₀ экстрактов биомассы исследуемых видов микроводорослей и синтетического антиоксиданта ВНТ

Вид	EC ₅₀	
	Сум. Кар, мкг·мл ⁻¹	ВНТ (ионол), мкг·мл ⁻¹
<i>P. protococcoides</i>	3,37 ± 0,48	–
<i>B. minor</i>	6,48 ± 0,20	–
<i>C. rubescens</i>	3,95 ± 0,23	–
<i>C. zofingiensis</i>	5,23 ± 0,25	–
Ионол	–	12,78 ± 0,73

Тот факт, что значение EC₅₀, выраженное в концентрации суммарных Кар, у всех видов была ниже, чем для стандарта, свидетельствует о более высоком антирадикальном потенциале исследуемых видов в сравнении с ионолом. Наиболее сильными антиоксидантами оказались экстракты суммарных Кар из биомассы *P. protococcoides* и *C. rubescens*. Количество суммарных Кар, необходимое для снижения вдвое начальной концентрации (50 ммоль·л⁻¹) молекул DPPH* в реакционной смеси, у этих видов было минимальным.

Выводы

Для всех исследуемых видов мочевины может служить адекватной заменой более дорогому нитрату натрия, что удешевит питательную среду примерно в 3 раза. При этом сохраняются достаточно высокие значения продуктивности культур по СБ.

Снижения содержания биомассы в культурах не наблюдалась. Продуктивность культур (за весь эксперимент) по СБ составила 407,35–528,38 мг·л·сут⁻¹), при максимальных величинах у *P. protococcoides*, при конечном содержании суммарных каротиноидов в сухой биомассе 2,53–3,91 мг·г⁻¹ с максимальными значениями у *B. minor* и *C. zofingiensis*. При этом конечный выход суммарных Кар из литра исходной культуры всех видов (1,1–1,6 мг·л⁻¹·сут⁻¹) является коммерчески значимым.

Каротиноидосодержащие метанольные экстракты всех исследуемых видов проявили высокую антирадикальную активность. По критериям I% и ЕС₅₀ все полученные экстракты существенно (на 25,5–64,8%) превосходили синтетический антиоксидант ионол, служащий одним из стандартов для сравнения активности различных антиоксидантов. Наиболее сильными антиоксидантами оказались экстракты Кар из биомассы *P. protococcoides* и *C. rubescens*.

В целом, все четыре вида являются быстро растущими и устойчивыми к абиотическому стрессу. Коммерчески значимая продуктивность культур по сухой биомассе и способность активно усваивать амидный азот из более дешёвой, чем нитраты, мочевины, а также значительный антиоксидантный потенциал компенсируют относительно невысокое содержание вторичных каротиноидов в их биомассе. Наиболее перспективными для дальнейших исследований в качестве потенциальных объектов массового культивирования являются *C. rubescens* и *P. protococcoides*.

Список литературы

1. Колупаев Ю.Е., Ястреб Т.О. Физиологические функции неэнзиматических антиоксидантов растений // Вісн. Харків. нац. аграрн. ун-ту. Сер. Біологія. 2015. Вип. 2 (35). С. 6–25.
2. Минюк Г.С., Дробецкая И.В., Чубчикова И.Н., Данцюк Н.В., Челебиева Э.С. Скрининг зелёных микроводорослей как потенциальных источников природных кетокаротиноидов. Актуальность, стратегия и тактика исследований // Экология моря. 2010. Спец. вып. 80. С. 67–78.
3. Минюк Г.С., Челебиева Э.С., Чубчикова И.Н. Особенности вторичного каротиногенеза у *Bracteacoccus minor* (Chlorophyta) в условиях двухстадийной культуры // Альгология. 2015. Т. 25. № 1. С. 21–34.
4. Основы клинической биохимии: пособие для студентов медико-диагностического факультета / С.В. Лелевич, И.А. Курстак, Т.Н. Гриневич и др. – Гродно: ГрГМУ, 2013. 184 с.
5. Романенко Е.А., Косаковская И.В., Романенко П.А. Фитогормоны микроводорослей: биологическая роль и участие в регуляции физиологических процессов. Ч. I. Ауксины, абсцизовая кислота, этилен // Альгология. 2015. Т. 25. № 3. С. 330–351.
6. Чубчикова И.Н., Дробецкая И.В., Минюк Г.С., Данцюк Н.В., Челебиева Э.С. Скрининг одноклеточных зелёных водорослей как потенциальных источников природных кетокаротиноидов. 2. Особенности роста и вторичного каротиногенеза у представителей рода *Bracteacoccus* (Chlorophyceae) // Морск. экол. журн. 2011. Т. 10. № 1. С. 91–97.
7. Чубчикова И.Н., Минюк Г.С., Дробецкая И.В., Терентьева Н.В. Хлорококковые микроводоросли как потенциальный источник природных кетокаротиноидов // Экология моря. 2009. Вып. 77. С. 77–83.
8. Bandoniene D., Murkovic M., Pfannhauser W., Venskutonis P.R., Gruzdiene D. Detection and activity evaluation of radical scavenging compounds by using DPPH free radical and online HPLC-DPPH methods // Eur. Food Res. Technol. 2002. V. 214. pp. 143–147.

9. Carlsson A.S., van Beilen J.B., Moller R., Clayton D. Micro- and macro-algae: Utility for industrial applications. Outputs from EPOBIO project. – Chippenham: CPL Press, 2007. 86 p.
10. Casal C., Cuaresma M., Vega J.M., Vilchez C. Enhanced Productivity of a Lutein-Enriched Novel Acidophile Microalga Grown on Urea // *Mar. Drugs*. 2011. V. 9. № 1. pp. 29–42.
11. Demidchik V. Mechanisms of oxidative stress in plants: From classical chemistry to cell biology // *Environ. Exp. Bot.* 2015. V. 109. pp. 212–228.
12. Dufossé L. Microbial and Microalgal Carotenoids as Colourants and Supplements // *Carotenoids*. – V. 5: Nutrition and Health. – Basel: Birkhauser Verlag, 2009. pp. 67–82.
13. Evary Y.M., Nur A.M. Antioxidant and Antidiabetes Capacity of Hexane, Ethylacetate and Ethanol Extracts of *Durio zibethinus* Murr. Root // *Pharmacogn J.* 2018. V. 10. pp. 937–940.
14. Finkel T., Holbrook N.J. Oxidants, oxidative stress and the biology of ageing // *Nature*. 2000. V. 408. pp. 239–247.
15. Gupta S., Ghosh M. In vitro antioxidative evaluation of α - and β -carotene, isolated from crude palm oil // *J. Anal. Methods Chem.* 2013. V. 2013. Article ID 351671. 10p.
16. Hagen C., Grünewald K., Xyländer M., Rothe E. Effect of cultivation parameters on growth and pigment biosynthesis in flagellated cells of *Haematococcus pluvialis* // *J. Appl. Phycol.* 2001. V. 13. pp. 79–87.
17. Halliwell B. Oxidative stress, nutrition and health. Experimental strategies for optimization of nutritional antioxidant intake in humans // *Free Radical Res.* 1996. V. 25. pp. 57–74.
18. Hsieh C.H., Wu W.T. Cultivation of microalgae for oil production with a cultivation strategy of urea limitation // *Bioresour. Technol.* 2009. V. 100. № 17. pp. 3921–3926.
19. Kalam S., Gul M.Z., Singh R., Ankati S. Free radicals: Implications in etiology of chronic diseases and their amelioration through nutraceuticals // *Pharmacologia*. 2015. V. 6. pp. 11–20.
20. Khalili A., Najafpour G.D., Amini G., Samkhaniyani F. Influence of nutrients and LED light intensities on biomass production of microalgae *Chlorella vulgaris* // *Biotechnol. Bioprocess Eng.* 2015. V. 20. pp. 284–290.
21. Kim G., Mujtaba G., Lee K. Effects of nitrogen sources on cell growth and biochemical composition of marine chlorophyte *Tetraselmis sp.* for lipid production // *Algae*. 2016. V. 31. № 3. pp. 257–266.
22. Kim Y., Lian F., Yeum K.-J., Chongviriyaphan N., Choi S.-W., Russell R.M., Wang X.-D. The effects of combined antioxidant (beta-carotene, alpha-tocopherol and ascorbic acid) supplementation on antioxidant capacity, DNA single-strand breaks and levels of insulin-like growth factor-1/IGF-binding protein 3 in the ferret model of lung cancer // *Int. J. Cancer*. 2007. V. 120. № 9. pp. 1847–1854.
23. Lichtenthaler H. Chlorophyll and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes // *Method. Enzymol.* 1987. V. 148. pp. 350–382.
24. Marxen K., Vanselow K.H., Lippemeier S., Hintze R., Ruser A., Hansen U.-P. Determination of DPPH Radical Oxidation Caused by Methanolic Extracts of Some Microalgal Species by Linear Regression Analysis of Spectrophotometric Measurements // *Sensors*. 2007. V. 7. pp. 2080–2095.
25. März U. The global market for carotenoids. – Business report FOD925C. 2008. [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.bccresearch.com.
26. McCord J.M. The evolution of free radicals and oxidative stress // *Am. J. Med.* 2000. V. 108. № 8. pp. 652–659.
27. Minyuk G., Chelebieva E., Chubchikova I., Dantsyuk N., Drobetskaya I., Sakhon E., Chekanov K., Solovchenko A. Stress-induced secondary carotenogenesis in *Coelastrrella rubescens*, a producer of value-added keto-carotenoids // *Algae*. 2017. V. 32. № 3. pp. 245–259.
28. Minyuk G.S., Dantsyuk N.V., Chubchikova I.N., Chelebieva E.S., Drobetskaya I.V., Solovchenko A.E. The effect of diverse nitrogen sources in the nutrient medium on the

- growth of the green microalgae *Chromochloris zofingiensis* in the batch culture // Marine Biological Journal. 2019. V. 4. № 4. pp. 41–52.
29. *Molyneux P.* The use of the stable free radical diphenylpicryl-hydrazyl (DPPH) for estimating antioxidant activity // Songklanakarin J. Sci. Technol. 2004. V. 26. pp. 211–219.
 30. *Pikula K.S., Zakharenko A.M., Aruoja V., Golokhvast K.S., Tsatsakis A.M.* Oxidative stress and its biomarkers in microalgal ecotoxicology // Curr. Opin. Toxicol. 2019. V. 13. pp. 8–15.
 31. *Rahman K.* Studies on free radicals, antioxidants, and co-factors // Clin. Interv. Aging. 2007. V. 2. № 2. pp. 219–236.
 32. *Sharma P., Jha A.B., Dubey R.S., Pessarakli M.* Reactive Oxygen Species, Oxidative Damage, and Antioxidative Defense Mechanism in Plants under Stressful Conditions // J. Bot. 2012. V. 2012. Article ID 217037. 26 p.
 33. *Solovchenko A., Merzlyak M., Khozin-Goldberg I., Cohen Z., Boussiba S.* Coordinated carotenoid and lipid syntheses induced in *Parietochloris incisa* (Chlorophyta, Trebouxiophyceae) mutant deficient in $\Delta 5$ desaturase by nitrogen starvation and high light // J. Phycol. 2010. V. 46. pp. 763–772.
 34. *Tan B. L., Norhaizan M. E., Liew W. P., Rahman H. S.* Antioxidant and Oxidative Stress: A Mutual Interplay in Age-Related Diseases. // Front. Pharmacol 2018. V. 9. Article 1162. 28p.
 35. *Valko M., Leibfritz D., Moncol J., Cronin M.T.D., Mazur M., Telser J.* Free radicals and antioxidants in normal physiological functions and human disease // Int. J. Biochem. Cell Biol. 2007. V. 39. № 1. pp. 44–84.
 36. *Varela J.C., Pereira H., Vila M., León R.* Production of carotenoids by microalgae: achievements and challenges // Photosynth. Res. 2015. V. 125. № 3. pp. 423–436.
 37. *Vonshak A.* Microalgae: Laboratory growth techniques and outdoor biomass production. In: Coombs J, Hall D, Long S, Scurlock J (eds) Techniques in Bioproduktivity and Photosynthesis. Pergamon Press, Oxford, 1985. pp. 188–203.
 38. *Wang J.F., Sommerfeld M.R., Lu C.M., Hu Q.* Combined effect of initial biomass density and nitrogen concentration on growth and astaxanthin production of *Haematococcus pluvialis* (Chlorophyta) in outdoor cultivation // Algae. 2013. V. 28. pp. 193–202.
 39. *Whysner J., Wang C.X., Zang E., Iatropoulos M.J., Williams G.M.* Dose response of promotion by butylated hydroxyanisole in chemically initiated tumours of the rat forestomach // Food Chem. Toxicol. 1994. V. 32. № 3. pp. 215–222.
 40. *Young I.S., Woodside J.V.* Antioxidants in health and disease // J. Clin. Pathol. 2001. V. 54. № 3. pp. 176–186.
 41. *Zuo L., Zhou T., Pannell B. K., Ziegler A., Best T. M.* Biological and physiological role of reactive oxygen species – the good, the bad and the ugly. // Acta Physiol. 2015. V. 214. pp. 329–348.

**ANTIRADICAL ACTIVITY ESTIMATION OF SECONDARY CAROTENOIDS OF
FOUR GREEN MICROALGAE SPECIES FROM ORDER SPHAEROPLEALES
IN VITRO**

Chubchikova I.N., Drobetskaya I.V.

*A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS,
Sevastopol, Russian Federation*

e-mail: chubchikova@mail.ru, drobetzkaya@mail.ru

New data on growth characteristics, accumulation of secondary carotenoids and their antiradical activity in 4 species of green microalgae (order Sphaeropleales) *Pseudospongiococcum protococcoides*, *Bracteacoccus minor*, *Coelastrella rubescens* and *Cromochloris zofingiensis* in a two-stage batch culture using urea as the sole source of nitrogen are presented. It was shown that all the studied species

grow well on the urea medium. At the first stage, their specific growth rates (maximum $0.28\text{--}0.37\text{ day}^{-1}$ and average $0.15\text{--}0.17\text{ day}^{-1}$) and dry biomass productivity ($0.08\text{--}0.09\text{ g}\cdot\text{l}^{-1}\cdot\text{day}^{-1}$) did not differ significantly. At the second stage, the biosynthesis of secondary carotenoids was induced using a stress complex, including: 10-fold decrease in nitrogen and phosphorus in the medium, 12-fold culture dilution, doubled round-the-clock lighting, CO₂ supply, NaCl addition on the 8th day to a concentration of $200\text{ mmol}\cdot\text{l}^{-1}$ in the medium. The response of the cultures to the stress-induction of secondary carotenogenesis was similar: the accumulation of biomass, the decrease in chlorophyll levels and the accumulation of secondary carotenoids. Biomass crop productivity calculated for the entire experiment was $0.41\text{--}0.53\text{ g}\cdot\text{l}^{-1}\cdot\text{day}^{-1}$ at maximum values for *P. protocooides* and *C. rubescens* with a final total carotenoid content in dry biomass of $2.3\text{--}3.9\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ at maximum values in *B. minor*. For all species, a technologically significant yield of secondary carotenoids from a liter of the initial culture was obtained ($1.1\text{--}1.6\text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}\cdot\text{day}^{-1}$). The antiradical activity of carotenoid extracts of the investigated species was evaluated by the reaction with the stable radical 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH[•]) in two parameters: “percent inhibition of DPPH[•]” (I%) and “effective concentration” (EC₅₀). Extracts of all species showed a higher antiradical activity (at 49.30–70.33%) than the synthetic antioxidant 2,6-butylhydroxytoluene (BHT, or ionol). It was shown that, according to the combination of production and antiradical properties of *C. rubescens* and *P. protocooides*, this species can be considered as the most promising potential sources of secondary carotenoids for the food and pharmaceutical industries.

Keywords: *Pseudosporangium protocooides*; *Bracteacoccus minor*; *Coelastrella rubescens*; *Cromochloris zofingiensis*; two-stage batch culture; DPPH[•]; antiradical activity; carotenoids; effective concentration.

Чубчикова
Ирина
Николаевна

младший научный сотрудник отдела физиологии животных и биохимии, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН», e-mail: chubchikova@mail.ru

Дробецкая
Ирина
Викторовна

Кандидат биологических наук, научный сотрудник отдела физиологии животных и биохимии, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН», e-mail: drobetzkaya@mail.ru

Поступила в редакцию 13.03.2020 г.

ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ, ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ
И ПАЛЕОНТОЛОГИЧЕСКИЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 573(597.253)

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ РАДИАЦИОННОГО БАЛАНСА
СРЕДНЕГОРНЫХ ТРОПИЧЕСКИХ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ
НАЦИОНАЛЬНОГО ПАРКА БИДУП-НУЙБА (ЮЖНЫЙ ВЬЕТНАМ)
ВО ВЛАЖНЫЙ СЕЗОН ГОДА *

Горбунов Р.В.^{1,2,3}, Горбунова Т.Ю.^{1,2,3}, Лебедев Я.О.^{1,2,3}, Кузнецов А.Н.^{1,2},
Кузнецова С.П.^{1,2}, Нгуен Данг Хой¹

¹Совместный Российско-Вьетнамский Тропический научно-исследовательский и
технологический центр, г. Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам
e-mail: forestkuz@mail.ru

²ФГБУН Институт проблем экологии и эволюции имени А.Н. Северцова РАН,
г. Москва, Российская Федерация

³ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН»,
г. Севастополь, Российская Федерация
e-mail: karadag_station@mail.ru, gorbunovatyu@gmail.com, ya.o.lebedev@yandex.ru

Для условий зимнего влажного сезона получены картографические модели поступления суммарной солнечной радиации на поверхность крон ключевого участка, проанализировано поступление суммарной солнечной радиации в зависимости от крутизны и экспозиции склонов кронового рельефа, рассчитаны величины элементов радиационного баланса поверхности крон ключевого участка и пространственно-временная структура доли пропускания суммарной солнечной радиации пологом леса. Проведено сравнение полученных данных в сухой и влажный сезоны. Рассчитаны величины элементов длинноволновой части радиационного баланса ключевого участка в период измерений. Полученные результаты позволили построить карту коэффициента пропускания пологом леса солнечной радиации в конце влажного сезона, что важно для понимания структуры радиационного баланса лесных экосистем.

Ключевые слова: радиационный баланс, суммарная солнечная радиация, рельеф поверхности крон, среднегорные тропические леса, Вьетнам, национальный парк Бидуп-Нуйба.

Введение

Формирование радиационного баланса горных тропических лесных экосистем характеризуется внутригодовой динамикой, связанной с чередованием влажных и сухих сезонов года. Эти сезоны определяют количество поступающей суммарной солнечной радиации и пространственно-временную дифференциацию потоков энергии в пределах лесного полога. В прошлой работе авторов (Горбунов и др., 2019) были представлены результаты исследований радиационного баланса среднегорных тропических лесных экосистем в условиях сухого сезона, характеризующегося преимущественно ясным

* Работа выполнена в рамках НИР Тропического центра Э-1.2 «Сохранение, восстановление и устойчивое использование тропических лесных экосистем на основе изучения их структурно-функциональной организации», раздел «Изучение особенностей структуры и функционирования равнинных и горных экосистем Вьетнама (национальные парки Бидуп-Нуйба)», а также в рамках НИР «Изучение пространственно-временной организации водных и сухопутных экосистем с целью развития системы оперативного мониторинга на основе данных дистанционного зондирования и ГИС-технологий» № АААА-А19-119061190081-9.

небом и практически полным отсутствием атмосферных осадков. В данной работе нами поставлена задача проанализировать структуру и суточную динамику радиационного баланса в период влажного сезона, что с одной стороны потребовало принятия определённых допущений в процессе исследований, связанных с невозможностью регистрации данных в период ливневых осадков, но с другой стороны, полученные данные позволяют судить об особенностях формирования радиационного баланса в этом периоде, что является на сегодняшний день практически неизученной темой. Конечно, можно говорить о наличии данных реанализа, с помощью которых можно игнорировать проблемы наземных измерений. Однако в тропическом лесу величина солнечной радиации, поступающей под полог леса, в большей степени определяется, как было показано ранее, морфометрическими характеристиками кронового рельефа, который сильно дифференцирует значения солнечной радиации, поступающей на его поверхность (склоны кронового рельефа) и значения солнечной радиации, проходящей сквозь кроновое пространство, и в меньшей степени – характеристиками рельефа.

Таким образом, целью данной работы является выявить особенности формирования радиационного баланса горных тропических лесных экосистем в условиях влажного сезона и сравнение выявленных процессов с процессами, характерными для сухого сезона года.

Методика исследований

Исследования проводились в период экспедиционных исследований в декабре 2019 года на базе природного парка Бидуп-Нуйба. В основу исследований были положены материалы и методология, описанная в предыдущих работах авторов (Горбунов и др. 2018; Горбунов и др., 2019). В процессе экспедиционных исследований проводилась регистрация данных о пропускании суммарной солнечной радиации по стандартной сети точек, описанной в работе (Горбунов и др., 2019). С целью геоинформационного моделирования и представления картографических результатов исследований использовалась программа Arc GIS 10.2.

Результаты исследований и их обсуждение

На основе полученной цифровой модели поверхности крон были рассчитаны значения поступления суммарной солнечной радиации на середину декабря (15.12.2019 г. - средняя дата экспедиционных исследований) на 9:00, 12:00, 15:00 часов и в сумме за сутки. Результаты моделирования представлены на рис. 1.

Из рисунка следует, что территория ключевого участка характеризуется пространственной неоднородностью в дифференциации величин суммарной солнечной радиации. Причем минимальные значения характерны в вечерний период, что связано с затенением солнечной радиации соседними хребтами. В целом следует отметить достаточно низкие значения суммарной солнечной радиации во влажный сезон, что связано с практически стопроцентной облачностью в этот сезон и ежедневными ливневыми осадками. Это обстоятельство ограничивало процесс измерений коэффициента пропускания солнечной радиации под полог леса, т.к. проводить измерения люксометром в период дождя технически невозможно. Это обстоятельство часто вызывало необходимость остановки процесса измерений. В то же самое время, продолжительность экспедиционных исследований позволило сформировать достаточный статистически достоверный набор данных, позволивших получить пространственную модель пропускания солнечной радиации во влажный сезон. Это обстоятельство упрощает тот факт, что за период экспедиции тип погодного состояния практически не изменялся.

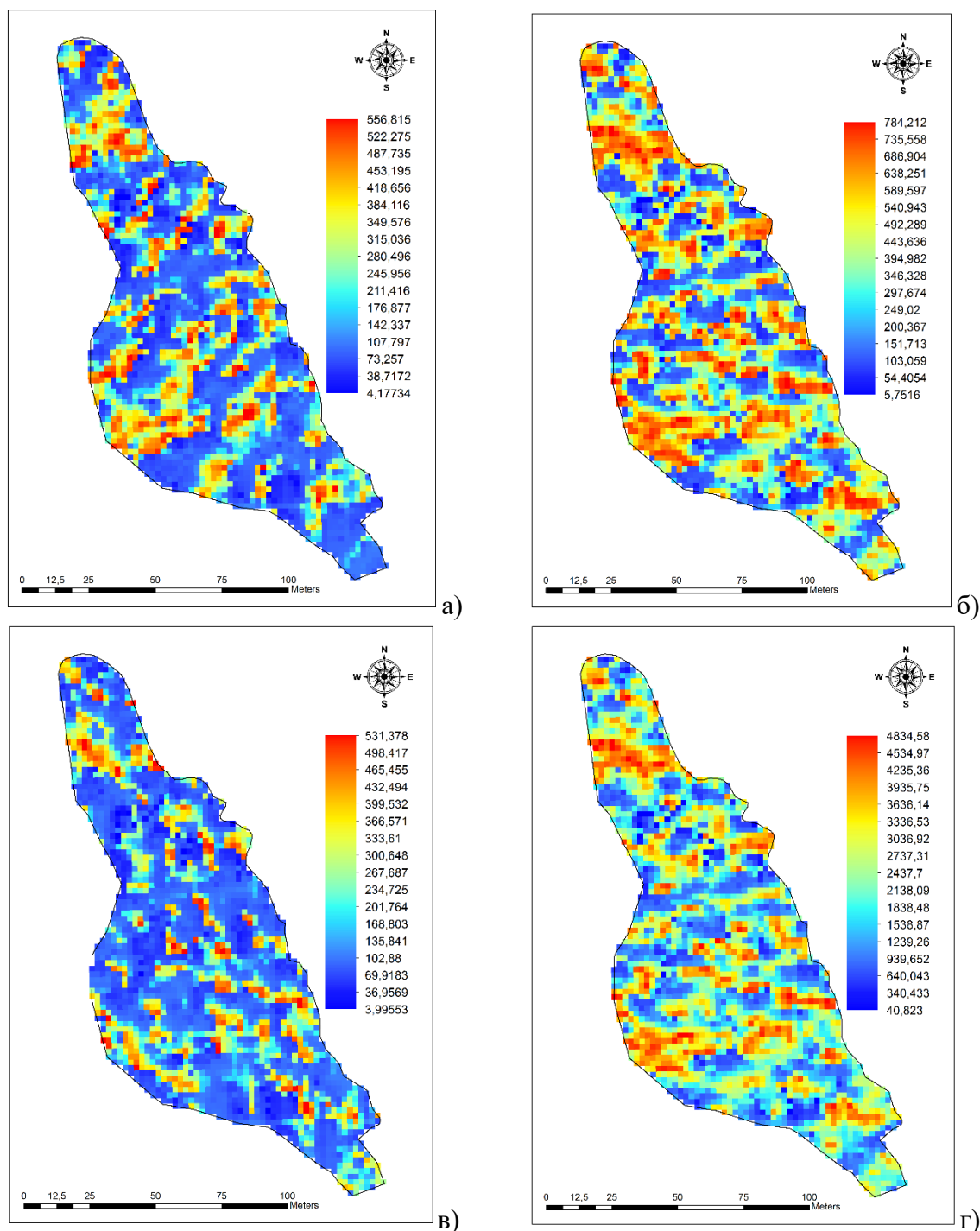


Рис. 1. Поступление суммарной солнечной радиации на территорию ключевого участка 15 декабря, Вт·ч/м²: а) 9:00; б) 12:00; в) 15:00; г) суточная сумма

С целью анализа пространственной дифференциации поступления суммарной солнечной радиации на поверхность кроны были рассчитаны средневзвешенные значения поступления суммарной солнечной радиации на склоны кронового рельефа различной крутизны и экспозиции (табл. 1).

В течение всего дня максимум поступления солнечной радиации наблюдается на пологих (0–3°) склонах северо-западной экспозиции. Слабо крутые склоны (3–8°) кронового рельефа имеют явный и стабильный максимум при восточной и северо-восточной экспозиции, в то время как на склонах юго-восточной и юго-западной экспозиции максимальные значения поступления солнечной радиации наблюдаются при крутизне 8–15°.

Таблица 1.

Расчётная величина поступления суммарной солнечной радиации (среднегоголетняя) 15 декабря (средняя дата полевых измерений экспедиции 2019 года) в зависимости от крутизны и экспозиции кронового рельефа ключевого участка, Вт·ч/м²

Экспозиция	Крутизна склонов (градации по В.О. Смирнову (2012))					
	0–3°	3–8°	8–15°	15–30°	30–45°	более 45°
9:00						
С	192,781	190,5	194,5	193,5	193,0	194,4
СВ		206,7	196,5	193,7	194,2	194,9
В		209,7	195,9	197,0	197,4	197,0
ЮВ		192,8	206,6	196,3	198,2	198,3
Ю		186,5	198,9	198,0	198,8	200,5
ЮЗ		196,7	200,2	196,2	198,7	197,2
З	154,2	201,7	193,5	193,1	197,5	196,7
СЗ	229,8	196,5	196,1	192,8	194,1	192,9
12:00						
С	376,5	369,4	376,2	376,9	376,4	376,3
СВ		383,2	378,0	376,1	376,0	376,6
В		390,0	374,5	378,6	378,5	378,6
ЮВ		373,4	382,7	378,5	378,3	378,2
Ю		348,2	378,0	379,4	377,8	380,6
ЮЗ		373,4	379,3	378,1	378,5	377,1
З	310,1	372,7	376,7	376,9	379,0	377,6
СЗ	438,8	361,6	378,1	376,6	376,4	376,4
15:00						
С	151,7	147,6	151,3	152,1	151,7	150,8
СВ		154,9	151,4	151,6	150,8	150,8
В		160,1	149,5	151,8	152,2	151,8
ЮВ		149,0	154,7	151,6	152,5	152,3
Ю		132,9	152,7	152,3	152,4	154,1
ЮЗ		150,4	152,2	151,5	152,6	151,6
З	115,5	149,6	151,6	151,9	152,3	151,7
СЗ	179,5	141,1	151,2	151,8	151,1	151,7
Сумма за сутки						
С	2122,4	2084,1	2123,8	2125,9	2122,9	2123,4
СВ		2185,0	2134,6	2123,7	2121,9	2125,5
В		2232,7	2116,2	2139,1	2141,5	2139,1
ЮВ		2104,3	2181,9	2136,9	2143,3	2143,2
Ю		1958,9	2143,1	2146,2	2142,2	2161,2
ЮЗ		2115,7	2150,1	2134,8	2145,5	2133,3
З	1721,1	2123,1	2125,0	2124,8	2142,6	2135,1
СЗ	2490,9	2055,5	2134,0	2123,2	2124,2	2122,6

Крутые (15–30°) и крайне крутые (более 45°) склоны кронового рельефа получают максимальные значения суммарной солнечной радиации при южной экспозиции. Сильно крутые (30–45°) склоны не имеют ярко выраженного максимума в поступлении солнечной радиации в зависимости от экспозиции – высокие значения наблюдаются на склонах южных румбов, а также на склонах восточной и западной экспозиций.

В течении дня поступления суммарной солнечной радиации на склоны кронового рельефа различных экспозиций практически не меняет своего максимума по крутизне и величины солнечной радиации закономерно растут к полудню и уменьшаются к вечеру. Исключением являются склоны северной, западной и юго-западной экспозиции, на которых максимум поступления суммарной солнечной радиации в течение дня смещается на более крутые склоны.

Таким образом наблюдается инсоляционная диссимметрия склонов кроневого рельефа в зависимости от крутизны и экспозиции. Как видно из рис. 2, максимум суточного поступления суммарной солнечной радиации наблюдается на склонах северо-западной экспозиции. Немного меньшие значения имеют склоны восточной и юго-восточной экспозиций. Минимальными значениями в поступлении суммарной солнечной радиации обладают склоны западной экспозиции.

Если сравнить поступление суммарной солнечной радиации в сухой и влажный сезоны, схемы инсоляционной диссимметрии в целом схожи между собой, однако максимум поступления суммарной солнечной радиации со склонов северной экспозиции в сухой сезон смещается на склоны северо-западной экспозиции.

Аналогично проведенным работам по данным измерений во время сухого сезона, были рассчитаны величины элементов радиационного баланса поверхности крон ключевого участка во влажный сезон (табл. 2).

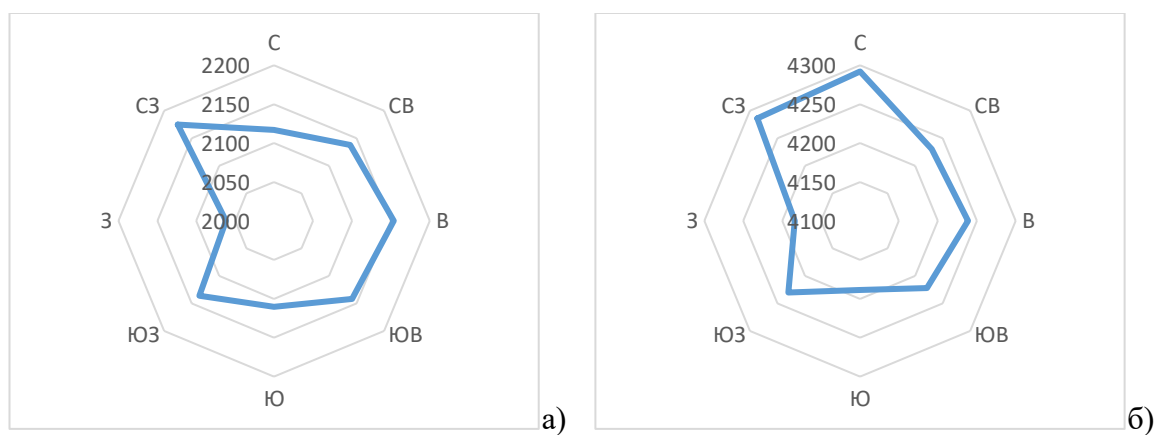


Рис. 2. Инсоляционная диссимметрия склонов кроневого рельефа разной экспозиции, Вт·ч/м²: а) влажный сезон; б) сухой сезон

Таблица 2.

Величины элементов радиационного баланса поверхности крон ключевого участка, Вт/м²

Элементы радиационного баланса		Время суток			Сутки
		9:00	12:00	15:00	
Суммарная солнечная радиация	средняя	192,8	376,5	151,7	2122,4
	максимальная	556,8	784,2	531,4	4834,6
	минимальная	4,2	5,8	4,0	40,8
Отражённая солнечная радиация	средняя	28,9	56,5	22,8	318,4
	максимальная	83,5	117,6	79,7	725,2
	минимальная	0,6	0,9	0,6	6,1
Поглощённая солнечная радиация	средняя	163,9	320,0	129,0	1804,0
	максимальная	473,3	666,6	451,7	4109,4
	минимальная	3,6	4,9	3,4	34,7

При сравнении рассчитанных значений получена следующая картина. В изменении элементов радиационного баланса во влажный сезон наблюдается снижение поступления солнечной радиации, однако изменения в течении дня имеют различную величину. В утренние часы поступление солнечной радиации уменьшилось в среднем на 51%, при это максимальные значения уменьшились на 22%, а минимальные – на 19%. В полдень наблюдается более существенные различия в значениях – в среднем поступление солнечной радиации уменьшилось на 44%, максимальные значения уменьшились на 15%, а минимальные – на 97%. В вечерние часы солнечная радиация снизилась на 58%, максимум поступления уменьшился на 25%, минимум – на 23%.

Проведенные в ходе экспедиции измерения освещенности под пологом леса позволяют построить пространственно-временную структуру изменения пропускания солнечной радиации в исследуемых точках ключевого участка (рис. 3).

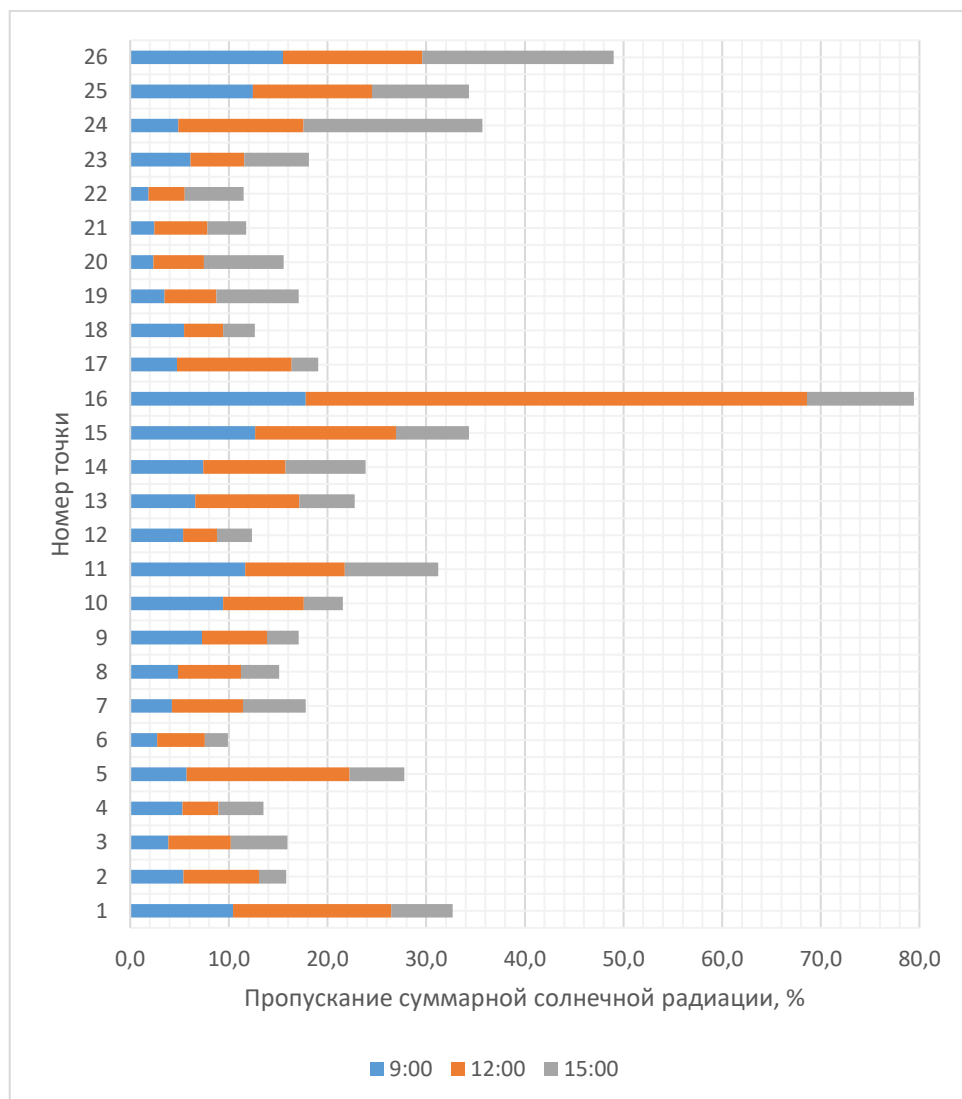


Рис. 3. Пространственно-временная структура доли пропускания суммарной солнечной радиации пологом леса

Максимальные значения пропускания характерны для точки 16, при этом большая часть солнечной радиации поступает в полуденные часы. Значения выше среднего наблюдается для точки 26, где характер пропускания в течение дня примерно одинаков, с небольшим увеличением в вечерние часы. Следует отметить, что во время измерений в сухой сезон значения освещенности в точке 16 были ниже среднего. Максимум пропускающей в сухой сезон наблюдался в точке 3. Кроме того, высокие значения были характерны для точек 19, 24 и 26.

Интерполяция полученных данных о пропускании солнечной радиации позволила получить пространственные модели этого явления и проанализировать его изменение в течение суток. На рис. 4 представлен суточный ход доли пропускающей суммарной солнечной радиации под полог леса.

Максимальные значения пропускания характерны для полуденных часов (рис. 4), однако они сконцентрированы в пределах юго-западной части ключевого участка и связаны с изменением общей сомкнутости лесного покрова – в интервале между экспедициями 2019 года в летний период произошёл сильный ветровал деревьев, что

вызвало появление в отдельных частях стационара широких окон. В то же самое время, если исключить высокие значения коэффициента пропускания в одной точке пространства стационара, полученные часы сохраняют максимальные величины доли пропускания, равные максимальным значениям в утренние и вечерние часы.

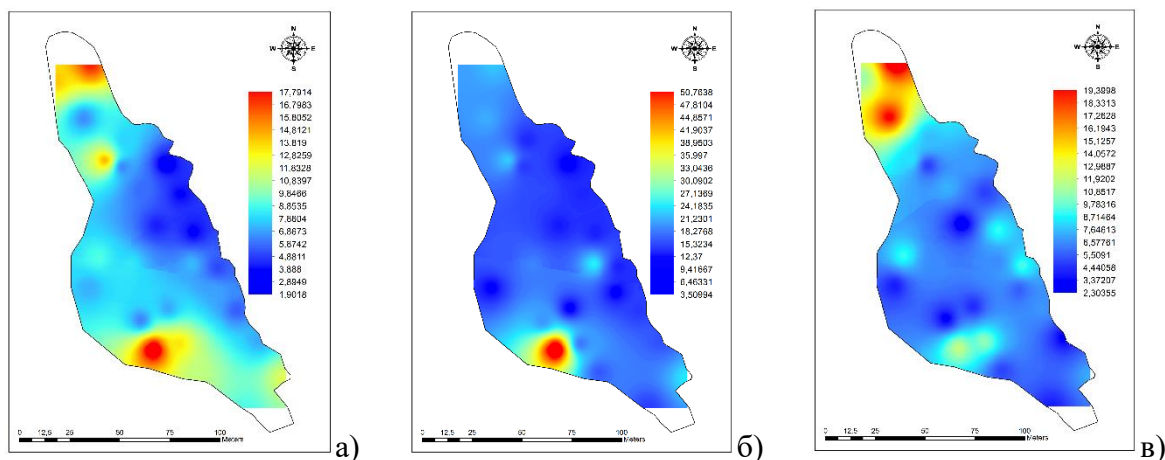


Рис. 4. Пространственная дифференциация доли пропускания суммарной солнечной радиации пологом леса во влажный сезон на территории ключевого участка, %: а) 9:00; б) 12:00; в) 15:00.

Полученные пространственные модели пропускания позволяют сделать расчет количества суммарной солнечной радиации, проникшей через кроновое пространство. Результаты этих расчётов представлены в табл. 3. Из таблицы видно, что значения суммарной солнечной радиации во влажный сезон чрезвычайно малы и составляют в среднем $37,5 \text{ Вт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ в полдень. Однако при этом наблюдается сильная пространственная дифференциация распределения солнечной радиации, обусловленная долей пропускания через кроны.

Таблица 3.

Количество суммарной солнечной радиации, прошедшей через кроны деревьев, $\text{Вт}/\text{м}^2$

Суммарная солнечная радиация	Время		
	9:00	12:00	15:00
влажный сезон			
средняя	13,0	37,5	10,1
максимальная	80,0	247,0	90,6
минимальная	0,2	0,4	0,3
сухой сезон			
средняя	19,43	22,89	7,10
максимальная	144,58	270,59	26,12
минимальная	0,38	0,94	0,27

Интересная особенность проявляется при сравнении значений в поступлении суммарной солнечной радиации в подкroновое пространство в сухой и влажный сезоны. Так, при сохранении закономерного суточного хода поступления солнечной радиации, в зимний влажный сезон средние значения суммарной солнечной радиации превышают аналогичные значения в сухой весенний сезон. При этом максимальные и минимальные значения суммарной солнечной радиации сохраняют максимум в сухой сезон. Это явление можно объяснить снижением угла падения солнечных лучей в зимний период при высокой крутизне кронового пространства, что определяет большие значения пропускания суммарной солнечной радиации в зимний влажный сезон.

Проникая под полог леса, коротковолновая солнечная радиация преобразуется в длинноволновую, составляющую длинноволновую часть радиационного баланса. Результаты расчёта элементов длинноволновой части радиационного баланса ключевого участка представлены в табл. 4. Следует отметить, что полученные значения не могут характеризовать реальную ситуацию, а представляют собой случайно выбранный день в период экспедиции (15 декабря 2019 г.), когда производились инструментальные измерения температуры и влажности воздуха под лесным пологом. В связи с этим, сравнение полученных значений со значениями сухого сезона, в период которого имеется статистически достоверный ряд измерений не представляется возможным.

Таблица 4.
Величины элементов длинноволновой части радиационного баланса
ключевого участка в период измерений, Вт·ч/м²

Суммарная солнечная радиация	Время		
	9:00	12:00	15:00
Влажный сезон			
Тепловое излучение подстилающей поверхности	440,4	421,2	415,7
Собственное тепловое излучение атмосферы	389,5	372,1	365,9
Эффективное излучение подстилающей поверхности (поверхность почвы, лиственной опад, ярус трав)	50,9	49,1	49,8

В то же время имеющиеся данные позволяют оценить величину эффективного излучения во влажный зимний сезон, составляющую в среднем 49,1 Вт·ч/м², что при сопоставлении со средними величинами суммарной солнечной радиации, проникающей под полог леса, позволяет говорить об отрицательном радиационном балансе территории ключевого участка в зимний влажный сезон.

Заключение

В результате проведённых исследований получены значения элементов радиационного баланса среднегорных тропических лесных экосистем в пределах ключевого участка на территории национального парка Бидуп-Нуйба. Получены пространственные модели дифференциации элементов радиационного баланса ключевого участка и описаны пространственно-временные закономерности их дифференциации в зависимости от морфометрических характеристик кронового рельефа.

Выполнен сравнительный анализ закономерностей пространственно-временной дифференциации элементов радиационного баланса во влажный зимний и сухой весенний сезоны. Выявлено превышение значений пропускания суммарной солнечной радиации в подкروновое пространство во влажный сезон года, что связано с высокой крутизной кронового рельефа и снижением угла падения солнечных лучей.

На основании полученных значений элементов радиационного баланса сделан вывод о том, что рассматриваемые лесные экосистемы характеризуются отрицательным радиационным балансом в подкроновой части, что определяется высокими значениями эффективного излучения и свидетельствует об их высокой теплоёмкости.

Список литературы

1. Горбунов Р.В., Горбунова Т.Ю., Кузнецов А.Н., Кузнецова С.П., Лебедев Я.О., Нгуен Д.Х, Ву М. Особенности формирования элементов радиационного баланса среднегорных тропических лесов южного Вьетнама // Труды Карадагской научной

- станции им. Т.И. Вяземского – природного заповедника РАН. 2019. Вып. 4(12). С. 3–16.
2. Горбунов Р.В., Кузнецов А.Н., Лебедев Я.О., Горбунова Т.Ю., Котлов И.П., Хой Н.Д. О некоторых особенностях структуры и функционирования горных тропических лесных ландшафтов центрального Вьетнама и необходимости создания ландшафтноэкологического стационара // Труды Карадагской научной станции им. Т.И.Вяземского – природного заповедника РАН. 2018. Вып. 3 (7). С. 43–67.
 3. Смирнов В.О. Некоторые аспекты фитоактинометрических исследований в лесах заповедника «Мыс Мартьян» // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2012. Т. 8. Вып. 1–2. С. 104–109.

PECULIARITIES OF THE RADIATION BALANCE FORMATION OF THE MID-MOUNTAIN TROPICAL FOREST ECOSYSTEMS OF BIDUP-NUIBA NATURAL PARK (SOUTHERN VIETNAM) DURING THE WET SEASON

Gorbunov R.V.^{1,2,3}, Gorbunova T.Yu.^{1,2,3}, Lebedev Ya.O.³, Kuznetsov A.N.^{1,2}, Kuznetsova S.P.^{1,2}, Nguyen Dang Hoi¹

¹Russian-Vietnamese Tropical Center, Hanoi, Socialist Republic of Vietnam

²A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Moscow, Russian

Federation, e-mail: forestkuz@mail.ru,

³A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation, e-mail: karadag_station@mail.ru, gorbunovatyu@gmail.com, ya.o.lebedev@yandex.ru

For the conditions of the winter wet season, cartographic models of the total solar radiation incoming to the crown surface of the key area were obtained. We analyzed the incoming of total solar radiation depending on the steepness and exposure of the crown relief. Values of the radiation balance elements of the key area crown' surface and the spatio-temporal structure of the total solar radiation part' transmission by the forest canopy were calculated. Comparison of the data obtained in dry and wet seasons was carried out. The values of the elements of the long-wave part of the radiation balance of the key area during the measurement period were calculated. The results obtained made it possible to construct a map of the transmission coefficient of solar radiation by the forest canopy at the end of the wet season, which is important for understanding the structure of the radiation balance of the forest ecosystems.

Keywords: radiation balance, total solar radiation, crown surface relief, mid-mountain tropical forests, Vietnam, Bidup-Nuiba National Park

Горбунов Роман Вячеславович	Кандидат географических наук, временно исполняющий обязанности директора, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН», e-mail: karadag_station@mail.ru
Горбунова Татьяна Юрьевна	Научный сотрудник научно-исследовательского центра геоматики, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН», e-mail: gorbunovatyu@gmail.com
Кузнецов Андрей Николаевич	Доктор биологических наук, главный научный сотрудник ФГБУН «Институт проблем экологии и эволюции имени А.Н. Северцова РАН, согендиректор Совместного Российско-Вьетнамского Тропического научно-исследовательского и технологического центра, e-mail: forestkuz@mail.ru
Кузнецова Светлана Павловна	Старший инженер Института тропической экологии, Совместный Российско-Вьетнамский Тропический научно-исследовательский и технологический центр

Лебедев Ярослав Олегович	Научный сотрудник научно-исследовательского центра геоматики, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН», e-mail: ya.o.lebedev@yandex.ru
Нгуен Данг Хой	Кандидат географических наук, директор Института тропической экологии, Совместный Российско-Вьетнамский Тропический научно-исследовательский и технологический центр, e-mail: danghoi110@gmail.com

Поступила в редакцию 11.06.2020 г.

УДК 550.4.02

ОСОБЕННОСТИ МИГРАЦИИ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В АГРОЭКОСИСТЕМАХ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ПРЕДГОРЬЯ КРЫМСКИХ ГОР

Дубас В.В., Алексахин И.В.

Таврическая академия, ФГАОУ ВО «КФУ им. В. И. Вернадского»,

г. Симферополь, Российская Федерация

e-mail: aligor@rambler.com

Настоящая работа направлена на оценку экологического состояния агроценозов в контексте установления степени загрязненности тяжелыми металлами и выявления особенностей их биогеохимической миграции в различные среды. Для реализации поставленной цели были проведены: полевые работы, включающие в себя отбор проб материала различного генезиса (горные породы, почвы и вегетативные части агрокультур), а также камеральные работы, включающие в себя лабораторные анализы, проявляющиеся в проведении качественного и количественного элементного химического анализа, в проведении на основе полученных данных расчетов величин кларков и коэффициентов концентрации, аккумуляции и/или рассеяния, биофильности, показателя интегрального загрязнения территории и построения на их основе геохимических спектров. В качестве проектной территории намеченных исследований были использованы сельхозугодья расположенные в пределах Русаковского сельского поселения, Белогорского района.

Ключевые слова: агроэкосистемы, почвы, тяжелые металлы, кларки, биогеохимическая миграция.

Введение

Почвы являются основным источником поступления тяжелых металлов в различные экосистемы. В них регулярно происходят процессы накопления, перераспределения и миграции из одной системы в другую различных катионогенных и анионогенных химических элементов, способных оказывать как благоприятное действие для роста и развития растений на микроэлементном уровне, так и негативное воздействие, находясь в избытке (в виде макроэлементов) или недостатке. Растения в таких случаях выступают в качестве промежуточного звена на пути миграции тяжелых металлов из почв в организм животных и/или человека, при этом обладая различным характером действия на них.

Внедрение технологий органического земледелия, предполагает полный отказ от использования удобрений (за исключением органических) и ядохимикатов, означая сведение количества антропогенных источников поступления тяжелых металлов в почвенный слой и растительность на минимальный уровень. Исследование почвенного покрова в данных условиях позволяет оценить уровень содержания и распределения металлов в системе «подстилающая порода – почва – растения», а также смоделировать характер накопления отдельных элементов в агроэкосистеме.

Цель настоящей работы – изучение особенностей биогеохимической миграции некоторых тяжелых металлов в системе «подстилающая порода – почва – сельхозкультура» в пределах сложившегося агроландшафта на территории Русаковского сельского поселения, Белогорского района, Республики Крым.

На основании поставленной цели, реализуются следующие задачи:

- 1) установить поэлементный химический состав образцов;
- 2) произвести геохимическую оценку состояния почвенного покрова на основании рассчитываемых коэффициентов концентрации, аккумуляции, рассеяния и биофильности;
- 3) оценить агроэкологическое состояние почв в пределах анализируемых сельхозугодий.

Материал и методы

Территория Русаковского сельского поселения (далее – СП) расположена в центральной части Крымского полуострова, в пределах Северного Предгорья, Внешней гряды Крымских гор (рис. 1). В севообороте преобладают зерновые культуры, в меньшем количестве культивируются эфиромасличные культуры (лаванда, шалфей). Основой для возделывания тех или иных агрокультур является почвенный покров. Зональные почвы в предгорном Крыму – это кальций-гумусовые степные почвы – черноземы, относящиеся к автоморфному ряду увлажнения. Они развиваются в плакорных условиях при непромывном водном режиме под травяными ассоциациями, характерными для каждого из этих типов. Интразональные почвы приурочены к участкам территории с наличием локальных факторов почвообразования (близость к поверхности уровня грунтовых вод или специфической материнской породы) (Драган, 2004).

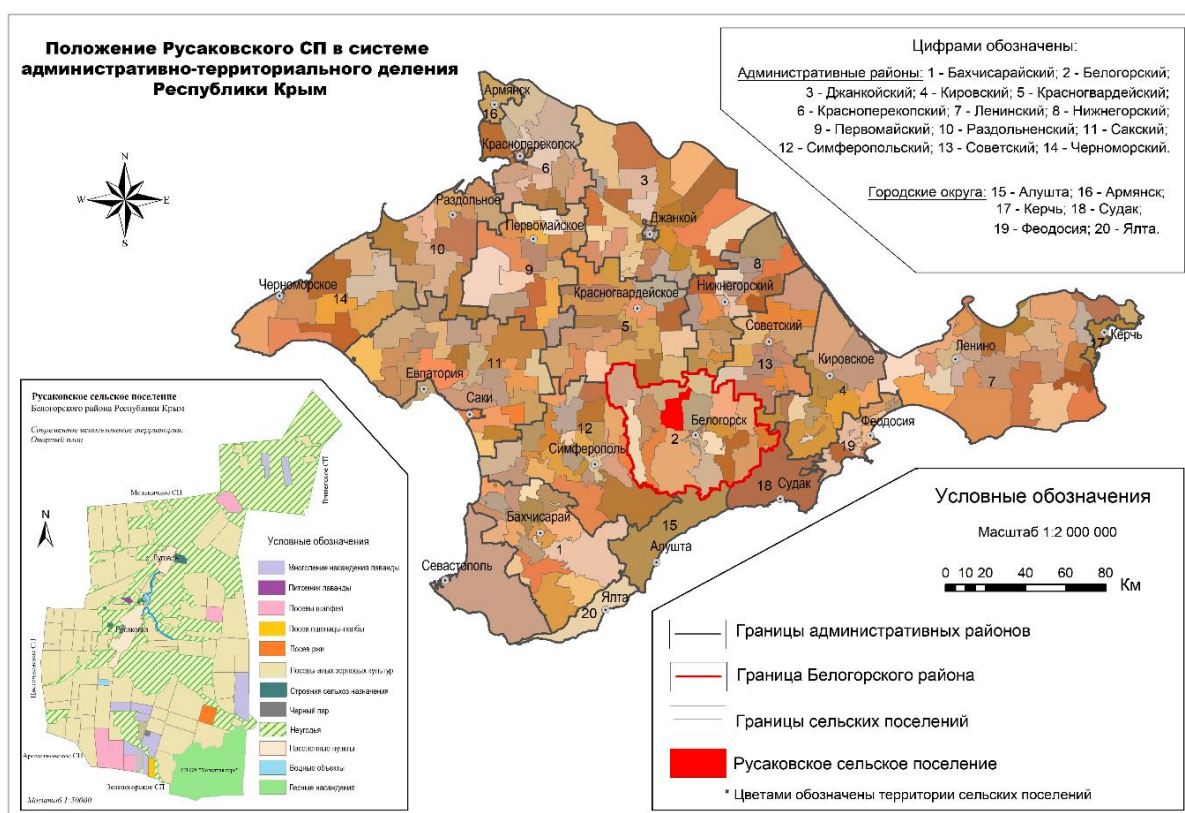


Рис. 1. Комплексная картосхема положения Русаковского СП в системе административно-территориального деления Республики Крым и структура современного землепользования территории Русаковского СП (составлено авторами)

На территории сельхозугодий Русаковского СП в качестве зональных почв распространены черноземы предгорные и дерново-карбонатные почвы, а к интразональным следует отнести различные разновидности луговых почв.

Объектом исследования выбраны образцы горных пород, почв и культурных растений, распространенных в пределах Русаковского СП, Белогорского района, Республики Крым. Предметом исследования выступает геохимическое состояние почвенного покрова сельхозугодий Русаковского СП, Белогорского района.

За время проведения полевых работ, осуществляемых в течение 2018–2019 гг. было отобрано около 250 проб различного материала. Места отбора проб устанавливались в зависимости от геологических условий местности, типов почв, выращиваемых в их пределах агрокультур и наличия дополнительных источников

поступления металлов. При отборе почвенных проб применялся метод конверта (согласно ГОСТ 17.4.4.02-2017). Отбор проб надземной фитомассы осуществлялся в одну фенологическую фазу (зерновые – начало июля 2018 г, эфиромасличные культуры – середина июня 2019 г.). В общей сложности было исследовано более 100 га сельхозугодий.

Качественное и количественное определение химического состава образцов (горных пород и почв) проводилось рентгенофлуоресцентным методом анализа. Предел обнаружения элементов – 0,1 ppm (0,0001%). Подготовка образцов к анализу основывалась на измельчении исходного материала до состояния максимально однородного мелкодисперсного порошка, который в последствии совместно с КВг спрессовывался в таблетки. Исследование растительных структур проводилось после предварительного озоления, полученные результаты пересчитывались с учетом коэффициента озоления на массу воздушно-высушенной пробы. Результаты исследований приведены для наиболее распространенных химических элементов среди опасных металлов (Cu, Co, Cr, Mo, Ni, Pb, Zn), значения для химических элементов, относимых к неметаллам, не учитывались.

Отсутствие объективной системы нормативов, учитывающей геохимические особенности той или иной территории, предопределило необходимость использования кардинально отличающихся от установленных ПДК методик изучения миграций химических элементов в экосистемах и оценки их экологического состояния в целом. Кларк концентрации (Кк) и кларк рассеяния (Кр) рассчитываются по формуле (1) и (2) соответственно (МУ 2.1.7.730-99, 1999):

$$K_k = \frac{C_i}{K}, \quad (1)$$

$$K_p = \frac{K}{C_i}, \quad (2)$$

где, C_i – содержание i -го химического элемента в исследуемой геохимической системе (горной породе и/или почве);

K – кларк i -го элемента в земной коре.

В случае когда рассчитанный кларк превышает единицу ($K_k > 1$), то справедливо говорить о кларке концентрации (Кк) и накоплении тяжелых металлов (ТМ) в системе; при кларке равном единице ($K_k = 1$) говорят об отношении концентраций ТМ равных кларку в земной коре. В некоторых случаях рассчитываемый кларк меньше единицы ($K_k < 1$), что свидетельствует о рассеянии ТМ в системе, поэтому вводят понятие кларк рассеяния (Кр) и производят для большей наглядности расчеты по формуле (2).

Построение геохимических спектров, на основе полученных кларков позволяет сопоставлять и анализировать химические составы различных компонентов экосистемы представляя результаты коэффициентов в более наглядном виде.

Коэффициент аккумуляции (Ка) является частным случаем коэффициента концентрации и определяется для анализа содержания химических элементов в таких смежных системах как подстилающие породы-почвы. Формула для определения данного коэффициента представляет собой следующее (МУ 2.1.7.730-99, 1999):

$$K_a = \frac{C_{i1}}{C_{i2}}, \quad (3)$$

где C_{i1} – содержание i -го химического элемента в почве; C_{i2} – содержание i -го химического элемента в подстилающей породе.

Коэффициент биологического поглощения (Кб) позволяет проследить миграцию металлов в системе (растения – почва) и рассчитывается по следующей формуле (Перельман, 1975):

$$K_b = \frac{BCi}{CiI}, \quad (4)$$

где BCi – содержание i -го химического элемента в живом веществе (растительности); CiI – содержание i -го химического элемента в почве.

В случае если $K_b > 1$, то химический элемент накапливается в растениях, если $K_b < 1$, то растения лишь захватывают тот или иной химический элемент, но не накапливают.

Для расчета коэффициента K_b проводились измерения концентраций химических элементов в смешанных пробах листьев и стеблей таких сельхоз культур как лаванда узколистная (*Lavandula officinalis*), шалфей мускатный (*Salvia sclarea L.*), пшеница мягкая (*Triticum Vulgare*), рожь (*Secale cereale*) и ячмень обыкновенный (*Hordeum vulgare*).

Изучение распределения и миграции тяжелых металлов в системе «почва – растение» необходимо для установления путей поступления поллютантов в пищевые цепи человека и определения степени опасности для его здоровья. О негативном влиянии тяжелых металлов на организм человека позволяет также говорить показатель интегрального загрязнения территории (Z_c), определяемый по формуле ниже (МУ 2.1.7.730-99, 1999):

$$Z_c = \sum(KCi + \dots Kcn) - (n - 1); \quad (5)$$

где n – число химических элементов, обладающих суммационным эффектом;
 KCi – коэффициент (кларк) концентрации i -го элемента.

Применение изложенных выше методов и методик позволяет провести качественную и количественную оценку современного состояния почвенного покрова.

Результаты и обсуждение

В ходе исследования почвенного покрова на территории Русаковского СП было выделено несколько типов почв: большую часть хозяйства (~60%) занимают черноземы предгорные, около 25% территории приходится на дерново-карбонатные почвы, в виде отдельных участков выделяются луговые почвы (до 4%) приуроченные к местам близкого залегания грунтовых вод (0-0,5 м) и черноземно-луговые почвы (~1%) приуроченные к долине «безымянного ручья». Кроме того, некоторую часть территории СП (~10%) занимают выходы скальных пород. Полученная качественная и количественная характеристика почвенных образцов представлена в таблице 1.

Содержание ТМ в почвах не превышает кларкового, что свидетельствует о нахождении ТМ в рассеянном состоянии. Значительно варьирует количество ТМ по отношению к почвообразующей породе, что обусловлено различным уровнем антропогенного воздействия. Так, в черноземах, развитых на глинах содержание Cr и Zn меньше чем в подстилающей породе, а Cu , Co , Mo , Ni и Pb больше; в черноземах, образованных на суглинке содержание Cr и Mo ниже по отношению к почвообразующей породе, а Cu , Co , Ni , Pb и Zn выше; в черноземах, развитых на карбонатных породах (известняк и мергель) наблюдается превышение содержания всех перечисленных металлов над содержанием в почвообразующей породе. Дерново-карбонатная почва характеризуется практически равным количеством свинца по отношению к почвообразующей породе и некоторым превышением остальных металлов. Содержание Cu и Co в лугово-черноземной почве несколько выше, чем в подстилающей глине, в то время как в луговой заболоченной почве превышения наблюдаются лишь для меди.

Таблица 1.

Средневзвешенное валовое содержание ТМ в различных компонентах сельхозугодий

Компонент агроэкосистемы	Содержание ТМ, массовые %						
	Cu	Co	Cr	Mo	Ni	Pb	Zn
Чернозем предгорный на глинах	0,00465	0,0014	0,00662	0,0001	0,00546	0,00176	0,00765
Чернозем предгорный на суглинке	0,00356	0,00074	0,00398	0,000017	0,00297	0,00159	0,00488
Чернозем предгорный на известняке	0,00095	0,00026	0,00145	-	0,00126	0,00074	0,00075
Чернозем предгорный на мергеле	0,001	0,00086	0,00214	-	0,0014	0,00098	0,00371
Дерново-карбонатная почва	0,00088	0,00043	0,0021	0,00003	0,00121	0,00068	0,0048
Лугово-черноземная почва на глинах	0,00462	0,00162	0,00437	0,000088	0,00531	0,00157	0,0071
Луговая почва на глинах	0,00519	0,00198	0,00696	-	0,00534	0,00181	0,00762
Подстилаящая порода:							
- известняк	0,00053	-	0,001	-	0,00118	0,00064	-
- мергель	0,00061	-	0,002	-	0,00118	0,00058	-
- глина	0,0066	0,00199	0,00814	0,00009	0,00566	0,00181	0,00834
- суглинок	0,00425	0,0013	0,00491	0,00003	0,00296	0,00143	0,00447
Кларк в земной коре (по А.П. Виноградову, 1962)	0,0047	0,0018	0,0083	0,00011	0,0058	0,0016	0,0083

Почвообразующие породы соответствуют глинистым и карбонатным ассоциациям пород. Среднее валовое содержание ТМ в глинах в целом ниже кларкового, а убывающий ряд максимальных значений концентраций имеет следующий вид: Zn, Cr, Ni, Pb, Co, Cu и Mo. Аналогичная ситуация характерна и для суглинка. В карбонатных породах (известняк и мергель) концентрации ТМ также, как и в глинах ниже кларковых величин. Согласно максимальным значениям концентраций ТМ убывающий ряд приобретает следующий вид: Ni, Cr, Pb, Cu в известняке, Ni, Cr, Cu, Pb в мергеле. Концентрации Co, Mo и Zn в анализируемых пробах выявлены не были.

Пониженное содержание химических элементов в почве по отношению к подстилаящей породе – глине и суглинку отчасти отражает сущность миграций металлов, некоторые из которых мигрируют от дневной поверхности вниз по почвенному профилю и концентрируются на подстилаящей породе, образуя геохимические барьеры. В таких условиях возможно также увеличение емкостных свойств почв, что приводит к повышению скорости закрепления металлов, сорбируемых из иных природных сред. В свою очередь несколько повышенное содержание ТМ в почве на фоне подстилаящих карбонатных пород позволяет судить о миграциях металлов в процессе почвообразования (от исходных концентраций в подстилаящей породе к последующим концентрациям в почве).

В ходе проведения анализа растительной золы некоторые химические элементы не определялись, поэтому для дальнейших расчетов использовались наиболее распространенные металлы, обладающие токсическими для живых организмов свойствами. Средневзвешенное содержание Cu, Ni, Pb и Zn приведено в табл. 2, указанные концентрации в большинстве случаев ниже кларковых и лишь значения характерные для меди, свинца и цинка в некоторых случаях показывают несколько повышенные величины на фоне кларковых, при этом не достигая уровня токсических концентраций.

Таблица 2.

Средневзвешенное валовое содержание ТМ в живом веществе

Тип почвы	Содержание ТМ, в пересчете из мг/кг в массовые %			
	Cu	Ni	Pb	Zn
Лаванда узколистная (<i>Lavandula officinalis</i>)				
Чернозем предгорный на глинах	0,000041	0,0000138	0,000057	0,00183
Чернозем предгорный на мергеле	0,000036	0,000076	0,0000154	0,0019
Дерново-карбонатная почва	0,000039	0,00008	0,000034	0,00191
Шалфей мускатный (<i>Salvia sclarea</i> L.)				
Чернозем предгорный на глинах	0,000028	0,000079	0,000021	0,00094
Дерново-карбонатная почва	0,000031	0,00001	0,00002	0,00101
Пшеница мягкая (<i>Triticum Vulgare</i>)				
Чернозем предгорный на глинах	0,000021	0,000038	0,000056	0,00167
Чернозем предгорный на известняке	0,000038	0,0000456	0,0000142	0,00051
Лугово-черноземная почва на глинах	0,0000173	0,000032	0,00005	0,0023
Луговая почва на глинах	0,000026	0,000028	0,000043	0,00211
Рожь (<i>Secale cereale</i>)				
Чернозем предгорный на известняке	0,00003	0,000041	0,000024	0,00052
Дерново-карбонатная почва	0,000026	0,000038	0,000043	0,00046
Ячмень обыкновенный (<i>Hordeum vulgare</i>)				
Чернозем предгорный на суглинке	0,000026	0,000067	0,0000118	0,0016
Чернозем предгорный на глинах	0,000023	0,000079	0,0000102	0,00181
Дерново-карбонатная почва	0,000024	0,000041	0,000038	0,00094
Луговая почва на глинах	0,000153	0,000019	0,000051	0,00213
Кларк в живом веществе (по А.А. Ярошевскому, 1990)	0,00004	0,00008	0,00005	0,002

Основной путь поступления в почвы и культурные растения свинца в данном случае – аэральный. Прежде всего, это наблюдается в пробах, отобранных в местах, расположенных в непосредственной близости от автодорог, что может быть связано с содержанием тетраэтилсвинца в автомобильном топливе и выделяемом в окружающую среду в составе продуктов сгорания. Следует также принимать во внимание возможность поступления свинца в растения из почв, предварительно загрязненных аэралью и/или за счет природной миграции металла вверх по профилю из горных пород или совместно с ними. Однако, необходимо учитывать, что свинец, поступивший в растение, инактивируется уже в корневой системе и практически не перемещается с восходящим током метаболитов (Алексеев, 2008). В целом, свинец в повышенных концентрациях оказывает негативное воздействие на организм человека: он блокирует сульфгидрильные группы белков, ингибирует некоторые ферменты, вызывает отравления, поражает нервную систему (ГН 2.1.7.020-94, 1994).

Произведенные расчеты коэффициентов концентрации и/или рассеяния позволяют выявить группы химических элементов, находящихся в агросистеме в аккумулярованном и/или рассеянном виде. В табл. 3 представлены рассчитанные величины кларков концентрации (Кк) и рассеяния (Кр).

Геохимические ряды металлов, находящихся в почвах в различных концентрациях, имеют следующий вид:

- $Cu_{(1,01)} - Ni_{(1,06)} - Zn_{(1,08)} - Mo_{(1,1)} - Cr_{(1,25)} - Co_{(1,29)}$ для химических элементов, находящихся в рассеянном виде в черноземах предгорных развитых на глинах различного генезиса. Аккумуляционным эффектом в данной почве обладает $Pb_{(1,1)}$;

- $Pb_{(1,01)} - Cu_{(1,32)} - Zn_{(1,7)} - Ni_{(1,95)} - Cr_{(2,08)} - Co_{(2,43)} - Mo_{(6,47)}$ для химических элементов, находящихся в рассеянном виде в черноземах предгорных развитых на суглинистых отложениях;

- $Pb_{(2,16)} - Ni_{(4,6)} - Cu_{(4,96)} - Cr_{(5,72)} - Co_{(6,92)} - Zn_{(11,06)}$ для химических элементов, находящихся в рассеянном виде в черноземе предгорном образованном на известняке. Кларк концентрации и/или рассеяния для Мо не рассчитывался ввиду отсутствия некоторых исходных данных;

- $Pb_{(1,63)} - Co_{(2,09)} - Zn_{(2,24)} - Cr_{(3,88)} - Ni_{(4,14)} - Cu_{(4,7)}$ для химических элементов, находящихся в рассеянном виде в черноземах предгорных развитых на мергеле. Как и в случае с почвой выше, кларк концентрации и/или рассеяния для Мо не рассчитывался;

- $Zn_{(1,73)} - Pb_{(2,35)} - Mo_{(3,67)} - Cr_{(3,95)} - Co_{(4,19)} - Ni_{(4,79)} - Cu_{(5,34)}$ для химических элементов, находящихся в рассеянном виде в дерново-карбонатных разновидностях почв;

- $Cu_{(1,02)} - Pb_{(1,02)} - Ni_{(1,09)} - Co_{(1,11)} - Zn_{(1,17)} - Mo_{(1,17)} - Cr_{(1,9)}$ для химических элементов, находящихся в рассеянном виде в лугово-черноземной почве развитой на иловато-глинистых отложениях;

- $Pb_{(1,13)} - Cu_{(1,1)} - Co_{(1,1)}$ для химических элементов, обладающих аккумуляционным эффектом, $Zn_{(1,09)} - Ni_{(1,09)} - Cr_{(1,19)}$ для химических элементов, находящихся в рассеянном виде в луговой заболоченной почве, образованной на иловатой глине. Кларк концентрации и/или рассеяния для Мо не рассчитывался.

Таблица 3.

Кларки ТМ в различных компонентах сельхозугодий

Компонент агроэко­системы	Кoeffици­ент	Значения кларков						
		Cu	Co	Cr	Mo	Ni	Pb	Zn
Чернозем предгорный на глинах	Кк	-	-	-	-	-	1,1	-
	Кр	1,01	1,29	1,25	1,1	1,06	-	1,08
Чернозем предгорный на суглинке	Кк	-	-	-	-	-	-	-
	Кр	1,32	2,43	2,08	6,47	1,95	1,01	1,7
Чернозем предгорный на известняке	Кк	-	-	-	*	-	-	-
	Кр	4,95	6,92	5,72	*	4,6	2,16	11,06
Чернозем предгорный на мергеле	Кк	-	-	-	*	-	-	-
	Кр	4,7	2,09	3,88	*	4,14	1,63	2,24
Дерново-карбонатная почва	Кк	-	-	-	-	-	-	-
	Кр	5,34	4,19	3,95	3,67	4,79	2,35	1,73
Лугово-черноземная почва на глинах	Кк	-	-	-	-	-	-	-
	Кр	1,02	1,11	1,9	1,25	1,09	1,02	1,17
Луговая почва на глинах	Кк	1,1	1,1	-	*	-	1,13	-
	Кр	-	-	1,19	*	1,09	-	1,09
Известняк	Кк	-	*	-	*	-	-	*
	Кр	8,87	*	8,3	*	4,91	2,5	*
Мергель	Кк	-	*	-	*	-	-	*
	Кр	7,7	*	4,15	*	4,91	2,76	*
Глина	Кк	1,4	1,11	-	-	-	1,13	1,00
	Кр	-	-	1,02	1,22	1,02	-	-
Суглинок	Кк	-	-	-	-	-	-	-
	Кр	1,11	1,38	1,69	3,67	1,96	1,12	1,86

Примечание: * – кларки не рассчитывались ввиду отсутствия исходных значений для одного из компонентов агроэко­системы

Геохимические ряды металлов, находящихся в почвообразующих породах, имеют следующий вид:

- $Pb_{(2,5)} - Ni_{(4,91)} - Cr_{(8,3)} - Cu_{(8,87)}$ для химических элементов, находящихся в рассеянном виде в известняке, для Со, Мо и Zn кларки не рассчитывались;

- $Pb_{(2,76)} - Cr_{(4,15)} - Ni_{(4,91)} - Cu_{(7,7)}$ для химических элементов, находящихся в рассеянном виде в мергеле, для Со, Мо и Zn кларки не рассчитывались;

• $Cu_{(1,4)} - Pb_{(1,13)} - Co_{(1,11)}$ для химических элементов, обладающих аккумуляционным эффектом, $Cr_{(1,02)} - Ni_{(1,02)} - Mo_{(1,22)}$ для химических элементов, находящихся в рассеянном виде в глинах, $Zn_{(1,00)}$ сходен с кларковым значением;

• $Cu_{(1,11)} - Pb_{(1,12)} - Co_{(1,38)} - Cr_{(1,69)} - Zn_{(1,86)} - Ni_{(1,96)} - Mo_{(3,67)}$ для химических элементов, находящихся в рассеянном виде в суглинке.

На рис. 2 приведены геохимические спектры всех типов исследуемых почв, которые иллюстрируют отличия их химического состава в зависимости от почвообразующей породы. Наиболее контрастное распределение микроэлементов наблюдается при сравнении почв, образовавшихся на глинах с почвами, развитыми на карбонатных породах. Указанные отличия свидетельствуют о значительной геохимической дифференциации горных пород, что характеризуется варьированием в их составе концентраций таких редких металлов, как Pb, Co, Cr.

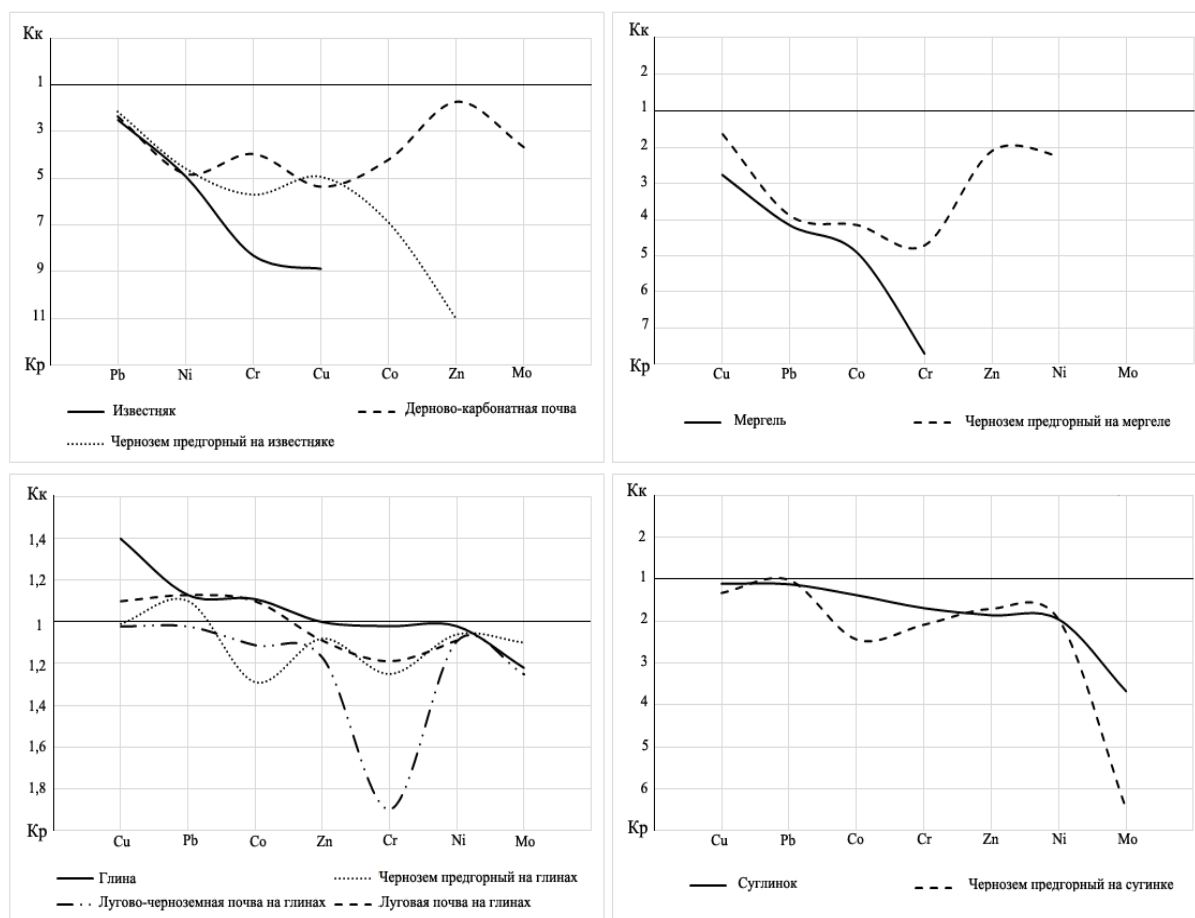


Рис. 2. Геохимические спектры подстилающих пород и почв

Среди осадочных пород возможно выделить отличия химического состава глин от суглинков, в которых происходит аккумуляция Cu, Pb и Co. Практически аналогичная тенденция сохраняется и для почв, образованных на глинистых отложениях. Карбонатные породы, обеднены большинством химических элементов, в известняке отсутствуют такие металлы как Co, Zn, Mo, а в мергеле – Zn, Ni, Mo. В почвах же данная тенденция не наблюдается, что свидетельствует о поступлении указанных элементов извне.

Полученные в ходе анализа значения коэффициента аккумуляции ТМ для смежной системы «подстилающие породы – почвы» представлены в табл. 4. Все значения варьируют в пределах от 0,5 до 2,1.

Биогенная миграция ТМ осуществляется разными видами растений избирательно, что отличает полученные концентрации ТМ в золе от их содержания в компонентах

природной агроэкосистемы. Коэффициент биологического поглощения ТМ для системы «растительность – почва» показывает значения в пределах 0,002–0,693 (табл. 5).

Таблица 4.

Коэффициент аккумуляции ТМ в системе «подстилаящая порода-почва»

Компонент агроэкосистемы	Значения Ка1						
	Cu	Co	Cr	Mo	Ni	Pb	Zn
Чернозем предгорный / глина	0,7	0,7	0,81	1,11	0,96	0,97	0,92
Чернозем предгорный / суглинок	0,84	0,57	0,81	0,57	1,00	1,11	1,09
Чернозем предгорный / известняк	1,79	*	1,45	*	1,07	1,16	*
Чернозем предгорный / мергель	1,64	*	1,07	*	1,19	1,69	*
Дерново-карбонатная почва / известняк	1,66	*	2,1	*	1,02	1,06	*
Лугово-черноземная почва / глина	0,7	0,81	0,54	0,98	0,94	0,87	0,85
Луговая почва / глина	0,79	0,99	0,85	*	0,94	1,00	0,91

Примечание: * – коэффициенты не рассчитывались ввиду отсутствия исходных значений для одного из компонентов агроэкосистемы

Таблица 5.

Коэффициент аккумуляции ТМ в системе «растительность – почва»

Компонент агроэкосистемы	Значения Кб			
	Cu	Ni	Pb	Zn
Лаванда узколистная (<i>Lavandula officinalis</i>)				
Чернозем предгорный на глинах	0,009	0,002	0,032	0,239
Чернозем предгорный на мергеле	0,036	0,054	0,016	0,512
Дерново-карбонатная почва	0,044	0,066	0,05	0,398
Шалфей мускатный (<i>Salvia sclarea</i> L.)				
Чернозем предгорный на глинах	0,006	0,014	0,012	0,123
Дерново-карбонатная почва	0,035	0,008	0,029	0,21
Пшеница мягкая (<i>Triticum Vulgare</i>)				
Чернозем предгорный на глинах	0,004	0,007	0,032	0,218
Чернозем предгорный на известняке	0,04	0,036	0,019	0,68
Лугово-черноземная почва на глинах	0,004	0,006	0,032	0,324
Луговая почва на глинах	0,005	0,005	0,024	0,277
Рожь (<i>Secale cereale</i>)				
Чернозем предгорный на известняке	0,032	0,032	0,032	0,693
Дерново-карбонатная почва	0,029	0,031	0,063	0,096
Ячмень обыкновенный (<i>Hordeum vulgare</i>)				
Чернозем предгорный на суглинке	0,007	0,023	0,007	0,005
Чернозем предгорный на глинах	0,005	0,014	0,006	0,237
Дерново-карбонатная почва	0,027	0,034	0,056	0,196
Луговая почва на глинах	0,01	0,004	0,028	0,279

Биогеохимические ряды интенсивности поглощения металлов растениями имеют следующий вид:

- для лаванды узколистной, произрастающей на черноземе предгорном развитом на глинах – $Zn_{(0,239)}$ – $Pb_{(0,32)}$ – $Cu_{(0,009)}$ – $Ni_{(0,002)}$; произрастающей на черноземе предгорном развитом на мергеле – $Zn_{(0,512)}$ – $Ni_{(0,054)}$ – $Cu_{(0,036)}$ – $Pb_{(0,016)}$; произрастающей на дерново-карбонатной почве – $Zn_{(0,512)}$ – $Ni_{(0,054)}$ – $Pb_{(0,016)}$ – $Cu_{(0,036)}$;
- для шалфея мускатного, произрастающего на черноземе предгорном развитом на глинах – $Zn_{(0,123)}$ – $Ni_{(0,014)}$ – $Pb_{(0,012)}$ – $Cu_{(0,006)}$; произрастающего на дерново-карбонатной почве – $Zn_{(0,21)}$ – $Cu_{(0,035)}$ – $Pb_{(0,029)}$ – $Ni_{(0,008)}$;
- для пшеницы мягкой, произрастающей на черноземе предгорном развитом на глинах – $Zn_{(0,218)}$ – $Pb_{(0,032)}$ – $Ni_{(0,007)}$ – $Cu_{(0,004)}$; произрастающей на черноземе предгорном развитом на известняке – $Zn_{(0,68)}$ – $Cu_{(0,04)}$ – $Ni_{(0,036)}$ – $Pb_{(0,019)}$; произрастающей на лугово-

черноземной почве развитой на глинистых отложениях – $Zn_{(0,324)} - Pb_{(0,032)} - Ni_{(0,006)} - Cu_{(0,004)}$; произрастающей на луговой почве развитой на иловатых глинах – $Zn_{(0,277)} - Pb_{(0,024)} - Ni_{(0,005)} - Cu_{(0,005)}$;

- для ржи, произрастающей на черноземе предгорном развитом на известняке – $Zn_{(0,693)} - Pb_{(0,032)} - Ni_{(0,032)} - Cu_{(0,032)}$; произрастающей на дерново-карбонатной почве – $Zn_{(0,096)} - Pb_{(0,063)} - Ni_{(0,031)} - Cu_{(0,029)}$;

- для ячменя обыкновенного, произрастающего на черноземе предгорном развитом на суглинистых отложениях – $Ni_{(0,023)} - Pb_{(0,007)} - Cu_{(0,007)} - Zn_{(0,005)}$; произрастающего на черноземе предгорном развитом на глинах – $Zn_{(0,237)} - Ni_{(0,014)} - Pb_{(0,006)} - Cu_{(0,005)}$; произрастающего на дерново-карбонатной почве – $Zn_{(0,196)} - Pb_{(0,056)} - Ni_{(0,034)} - Cu_{(0,027)}$; произрастающего на луговой почве развитой на иловатых глинах – $Zn_{(0,279)} - Pb_{(0,028)} - Cu_{(0,01)} - Ni_{(0,004)}$.

Сопоставив ряды для подстилающих пород, почв и растительности, можно увидеть кардинальные различия, что обуславливается возможностью поступления ТМ в каждый из анализируемых компонентов агроэкосистемы из сторонних источников (к примеру, из атмосферы оседая в виде аэрозольных частиц не только на почвах, но и на растениях, таким образом вовлекаясь в процессы жизнедеятельности).

Оценка уровня загрязнения почв ТМ в пределах агроэкосистем производилась с помощью интегрального показателя степени загрязнения почв (Z_c), результаты которого следующие: для разновидностей чернозема предгорного образованного на глинах $Z_c = 1,1$; для луговой заболоченной почвы, развитой на иловатых глинах $Z_c = 1,33$. Оба показателя свидетельствуют о допустимой категории загрязнения почв оказывающей наименьшее влияние на живые организмы (в т.ч. здоровье человека). Для всех остальных приведенных в работе типов почв рассчитать показатель Z_c не представляется возможным и не имеет смысла ввиду содержания металлов в рассеянном виде.

Выводы

В ходе проведенных исследований установлено отсутствие территорий, загрязненных тяжелыми металлами. Уровень интегрального показателя загрязнения почв для разновидностей чернозема предгорного и луговой заболоченной почвы находится в пределах допустимой категории загрязнения, для остальных почв и вовсе не определяется. На основании результатов данного показателя также можно судить об отсутствии видимого негативного воздействия на организм человека.

Установленные концентрации большинства тяжелых металлов не превышают кларковых величин, исключение составляют черноземы предгорные и луговые почвы, развитые на глинах, что обуславливается несколько повышенными концентрациями металлов в почвообразующей породе и возможностью поступления элементов из окружающей среды. Так, поступление в данные почвы свинца, меди и цинка возможно за счет близкого, а в некоторых случаях пограничного положения с исследуемыми сельхозугодиями дорог общего пользования. В то же время, все фоновые превышения находятся согласно ПДК/ОДК в пределах допустимых уровней концентраций и не представляют опасности.

Рассчитанные коэффициенты аккумуляции в системах «подстилающая порода – почва» и «почва – агрокультура» наглядно отражают процесс миграции микроэлементов из системы в систему. Так, из исходных концентраций металлов, находящихся в породе, некоторая часть элементов мигрирует вверх по почвенному профилю, где претерпевает преобразования, в ходе которых одна часть закрепляется в почве, а другая переходит в растения обеспечивая их процесс жизнедеятельности. Не стоит также исключать возможный процесс выноса химических элементов за пределы почвенного профиля и переход в грунтовые воды.

Список литературы

1. Алексеев Ю.В. Тяжелые металлы в агроландшафте. Санкт-Петербург: Изд-во ПИЯФ РАН, 2008. 216 с.
2. Виноградов А.П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных пород земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571.
3. Гигиенические нормативы ГН 2.1.7.020-94 «Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) тяжелых металлов и мышьяка в почвах с различными физико-химическими свойствами (валовое содержание, мг/кг)». М., 1994.
4. ГОСТ 17.4.4.02-2017 «Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа». М.: Стандартинформ, 2018. 9 с.
5. Драган Н.А. Почвенные ресурсы Крыма. Симферополь: Изд-во «ДОЛЯ», 2004. 209 с.
6. Методические указания МУ 2.1.7.730-99 «Гигиеническая оценка качества почв населенных мест». М.: Минздрав России, 1999. 20 с.
7. Перельман А.И. Геохимия ландшафта. М.: Высшая школа, 1975. 342 с.
8. Ярошевский А.А. Кларки геосфер // Справочник по геохимическим поискам полезных ископаемых. М.: Недра, 1990. С. 7–14.

PECULIARITIES OF MIGRATION OF HEAVY METALS IN AGROECOSYSTEMS OF THE EASTERN PART OF THE FRENCH OF CRIMEAN MOUNTAINS

Dubas V.V., Aleksashkin I.V.

*V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russian Federation,
e-mail: aligor@rambler.com*

This work is aimed at assessing the ecological state of agrocenoses in the context of establishing the degree of contamination with heavy metals and identifying the features of their biogeochemical migration to various environments. To achieve this goal, the following were carried out: field work, including sampling of material of various genesis (rocks, soils and vegetative parts of agricultural crops), as well as desk work, including laboratory analyzes, manifested in the conduct of qualitative and quantitative elemental chemical analysis, in carrying out, based on the obtained data, calculations of clark values and concentration, accumulation and / or scattering coefficients, biophilicity, the integral pollution index of the territory and construction tions on this basis of geochemical spectra. As the project area of the planned studies, farmland located within the Rusakovsky rural settlement, Belogorsky district was used.

Key words: agroecosystems, soils, heavy metals, clarks, biogeochemical migration.

Дубас Виктория Викторовна Обучающаяся кафедры геоэкологии, факультета географии, геоэкологии и туризма, Таврическая академия, ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского», e-mail: victoriadubas.VD@gmail.com

Алексашкин Игорь Владимирович Кандидат химических наук, доцент кафедры геоэкологии, факультета географии, геоэкологии и туризма, Таврическая академия, ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского»; e-mail: aligor@rambler.ru

Поступила в редакцию 17.12.2019 г.

**Ассоциация по сохранению и восстановлению редких и исчезающих животных
«ЖИВАЯ ПРИРОДА СТЕПИ»**

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр
«ИНСТИТУТ БИОЛОГИИ ЮЖНЫХ МОРЕЙ имени А.О. КОВАЛЕВСКОГО РАН»
«КАРАДАГСКАЯ НАУЧНАЯ СТАНЦИЯ им. Т.И.ВЯЗЕМСКОГО –
ПРИРОДНЫЙ ЗАПОВЕДНИК РАН»**

ТРУДЫ КАРАДАГСКОЙ НАУЧНОЙ СТАНЦИИ им. Т.И. ВЯЗЕМСКОГО – ПРИРОДНОГО ЗАПОВЕДНИКА РАН

Основан в мае 2016 г.

**Основатель журнала –
ФГБУН «Карадагская научная станция им. Т.И.Вяземского –
природный заповедник РАН»**

Научное издание

**Свидетельство о регистрации средства массовой информации
Сер. ПИ № ФС77-76870 от 11 октября 2019 г.**

Утверждено к печати научно-техническим советом Карадагской научной станция им. Т.И.Вяземского – природного заповедника РАН – филиалом Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН» (протокол № 1 от 10 июля 2020 г.)

Главный редактор: Р.В. Горбунов, канд. геогр. наук
Заместитель главного редактора: В.И. Мальцев, канд. биол. наук
Технические редакторы: Т.Ю. Горбунова, Л.В. Знаменская

Формат 60x84/8. Усл. печ. л. 11,63. Тираж 100 экз. Заказ № 09А/11.

Отпечатано с оригинал-макета в типографии «ИТ «АРИАЛ»
295015, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Севастопольская, 31-а/2,
тел.: +7 978 71 72 901, e-mail: it.arial@yandex.ru, www.arial.3652.ru