

УДК 594.124:574:546.249(262.5)

Indication of Ecological Condition of the Black Sea Mussels and Their Habitat Using Natural Radionuclide Polonium-210

Galina E. Lazorenko* and Anna V. Pirkova

*A.O. Kovalevsky Institute of Marine Biological Research RAS
2 Nakhimov, Sevastopol, 299011, Russia*

Received 22.11.2016, received in revised form 26.12.2016, accepted 21.01.2017

Accumulation of polonium-210 by the Black Sea mussels in Sevastopol marine region and the Karadag Bay (the eastern part of the coast of the Crimea) depends on the mass of their soft tissue, sex, stage of gonad development and the conditions of their habitats. This allows us to consider this radionuclide as one of the most informative natural indicators of an ecological state of the shellfish populations and environment.

*Keywords: bioindication, ^{210}Po , *Mytilus galloprovincialis*, environmental conditions, the Black Sea.*

Citation: Lazorenko G.E., Pirkova A.V. Indication of ecological condition of the Black sea mussels and their habitat using natural radionuclide polonium-210. J. Sib. Fed. Univ. Biol., 2017, 10(1), 59-73. DOI: 10.17516/1997-1389-0008.

© Siberian Federal University. All rights reserved

* Corresponding author E-mail address: g.e.lazorenko@gmail.com

Индикация экологического состояния черноморских мидий и среды их обитания с использованием природного радионуклида полония-210

Г.Е. Лазоренко, А.В. Пиркова

*Институт морских биологических исследований
имени А.О. Ковалевского РАН
Россия, 299011, Севастополь, пр. Нахимова, 2*

Изучено аккумулярование полония-210 черноморскими мидиями в Севастопольском морском районе и Карадагской бухте (восточная часть побережья Крыма). Оно зависит от массы мягких тканей, половой принадлежности, стадии развития гонад животных и условий их обитания, что позволяет рассматривать этот радионуклид в качестве одного из наиболее информативных природных индикаторов экологического состояния моллюсков и среды.

*Ключевые слова: индикация, ^{210}Po , *Mytilus galloprovincialis*, окружающая среда, экологическое состояние, Черное море.*

Введение

Внимание к изучению поведения в морских экосистемах ^{210}Po обусловлено его химическими свойствами (поливалентный тяжелый металл) и физическими характеристиками (альфа-излучатель с энергией частиц 5,305 МэВ и периодом полураспада 138,4 сут). Этот радионуклид входит в состав природного радиоактивного ряда ^{238}U , завершая его распад. На поверхность морей и океанов ^{210}Po попадает, в основном, из атмосферы, в которой он образуется вследствие распада части цепочки ^{222}Rn - ^{210}Pb - ^{210}Bi из ряда ^{238}U . К его дополнительным источникам относятся жидкие отходы производств, связанных с добычей и переработкой руд, содержащие уран, торий, редкоземельные элементы и фосфорные соединения (Вахтер, 1996). В морской воде ^{210}Po ассоциируется с органическим взвешенным и растворенным веществом (Cherry, Shannon, 1974; Ritchie, Shimield, 1991; Wildgust et al.,

1998; Tolmarchyov et al., 2002). Этот радионуклид включен в группу основных природных трассеров биогеохимических процессов в морях и океанах (Cochran, Masqué, 2003; Rutgers Van Der Loeff, Geibert, 2008). В тела гидробионтов ^{210}Po поступает только пищевым путем. М. Heyraud и R.D. Cherry (1979) сделали важное заключение: “С точки зрения морской биологии ^{210}Po служит природным трассером трофической цепи”. Мидии входят в группу гидробионтов с наиболее высокими уровнями аккумулярования этого радионуклида (Cherry, Shannon, 1974; Aarkrog et al., 1997; Carvalho et al., 2010, 2011). Установлено, что 80 % ^{210}Po , определяемого в голубой мидии *Mytilus edulis*, ассоциировано с протеинами – с замещением в них более 80 % серы (Wildgust et al., 1999). Под влиянием антропогенного загрязнения среды содержание ^{210}Po в мидиях изменяется (Germain et al., 1992; Swift et al., 1995; Carvalho et al., 2010,

2011). Результаты собственных исследований черноморских мидий (Лазоренко и др., 2002, 2005; Lazorenko, Polikarpov, 2002; Egorov et al., 2006; Lazorenko et al., 2009, 2010) позволили нам установить зависимость уровней аккумуляции ими ^{210}Po от экологических условий среды. Цель настоящей работы состояла в оценке возможности использования природного ^{210}Po в индикации экологического состояния черноморских мидий при разной экологической нагрузке.

Материалы и методы

Объектом нашего исследования были мидии *Mytilus galloprovincialis* (Lamarck, 1819). В Черном море этот моллюск встречается на глубинах от уреза воды до границ сероводородной зоны, однако массовые скопления формирует на глубине 0-10 м (скальная форма) и до 80 м (иловая форма) (Цихон-Луканина, 1987). В спектр питания черноморских мидий входят фитопланктон, детрит и растворенное органическое вещество, а их соотношение зависит от возраста и места обитания животных (Цихон-Луканина, 1982). Исследованы мидии из разных бухт – Севастопольской (район Коррозионной станции), Мартыновой, Стрелецкой, Казачьей и в устьевой зоне реки Бельбек. Мидии скальной формы были отобраны в бухтах Севасто-

польской и Стрелецкой, а иловой формы – в устьевой зоне р. Бельбек. В Казачьей и Мартыновой бухтах пробы были взяты с искусственных коллекторов. Скальные мидии были отобраны также в Карадагской бухте (у Золотых ворот) (рис. 1).

Выбор районов отбора проб обусловлен разным уровнем и типом их загрязнения. Интенсивное судоходство, стоянки судов и сбросы жидких отходов разной природы, включая городские бытовые и ливневые стоки, формируют загрязнение Севастопольской бухты (Овсяный и др., 2003; Иванов и др., 2006). Акватория б. Мартыновой – одна из наиболее загрязненных, что связано с функционирующим в ней аварийным сбросом муниципальных жидких отходов, количество которых возрастает в летний период (Куфтаркова и др., 2008). Устьевая зона р. Бельбек – открытая часть моря с интенсивным перемешиванием вод, что способствует ее очищению от муниципальных и сельскохозяйственных жидких стоков, поступающих вместе с речной водой. Стрелецкая бухта по уровням загрязнения занимает между ними промежуточное положение (Egorov et al., 2006). Казачья бухта относится к условно чистой акватории (Малахова и др., 2003; Терещенко и др., 2014). Карадагская бухта определяется как один из наиболее чистых прибрежных районов Крыма по



Рис. 1. Карты-схемы мест отбора мидий в Севастопольском морском районе и Карадагской бухте

радиоактивным и химическим показателям (Egorov et al., 2006).

Поверхность раковин мидий очищали от обрастаний, сортировали по размерным группам и извлекали мягкие ткани для определения пола, стадии репродуктивного цикла и содержания в них природного радионуклида ^{210}Po . Для изучения половой структуры и репродуктивного цикла мидий величина выборки составляла не менее 50 особей. Стадии зрелости гонад определяли на гистологических препаратах или на мазке гонады. Для этого гонаду надрезали при помощи скальпеля в средней части мантийного лепестка и просматривали мазок под микроскопом. Принадлежность к разным стадиям устанавливали по комплексу характерных признаков, по которым в мидиях выделяют шесть стадий репродуктивного цикла (Пиркова, 1994; Холодов и др., 2010). После определения пола и стадии репродуктивного цикла образцы мягких тканей мидий *M. galloprovincialis* использовали для радиохимического определения в них природного радионуклида ^{210}Po .

Радиохимический анализ ^{210}Po в мидиях проводили в соответствии с основной методикой (Методические рекомендации..., 1980) и методическими разработками (Chen et al., 1998). Для оценки химического выхода использовали искусственный изотоп ^{208}Po (AEA Technology, Великобритания) с периодом полураспада 2,898 г и энергией альфа-частиц 5,114 МэВ. Спонтанное осаждение обоих изотопов (^{208}Po и ^{210}Po) на диски из серебряной фольги осуществлялось в термостате при температуре 85 °С в течение 3,5 ч, а их измерение – на альфа-спектрометре ОСТЕТЕ РС фирмы EG&G ORTEC (США). Величина химического выхода составляла 85-95 %. Концентрацию ^{210}Po в мидиях рассчитывали в Бк/кг сырой массы мягких тканей. Для каждой размерной группы животных результат пред-

ставлен средней арифметической величиной при среднеквадратичном отклонении σ , не превышавшем 10 %, и вероятности нахождения этого значения в указанном интервале, равном 0,68.

Результаты

Диапазоны размеров мидий, отобранных одновременно в разных акваториях, различались между собой, составляя 2,0-8,0 см для проб из б. Севастопольской; 2,0-6,7 см – из б. Казачьей; 1,5-4,5 см – из б. Мартыновой; 2,3-7,0 см – из б. Стрелецкой; 3,3-8,0 см – из б. Карадагской и 4,8-8,0 см – из устьевой зоны р. Бельбек.

Результаты первых определений концентрации ^{210}Po в мидиях из севастопольских бухт, Карадагской бухты и устья р. Бельбек (рис. 2-4) свидетельствовали о неоднородности их распределения и зависимости от длины раковин (возраста) моллюсков как из разных мест отбора, так и в пределах каждого из них.

Диапазоны концентрации ^{210}Po в мидиях из разных районов исследования существенно отличались между собой (рис. 2-4). Их максимальные величины (Бк/кг сырой массы) уменьшались в ряду: б. Карадагская (48,8) > б. Казачья (37,5) > устье р. Бельбек (26,8) > б. Стрелецкая (19,2) > б. Севастопольская (18,7) > б. Мартынова (13,5). Следовательно, их величины в мягких тканях мидий из Мартыновой бухты были почти в 1,4, 2, 2,8 и 3,6 раза меньше, чем из бухт Севастопольской и Стрелецкой, устья р. Бельбек, бухт Казачьей и Карадагской.

Причинами, обуславливающими разные уровни аккумуляции ^{210}Po мидиями Черного моря в исследованных акваториях, могут быть экологическое состояние животных и среды их обитания. Сравнение зависимостей концентрации ^{210}Po в мидиях, отобранных в

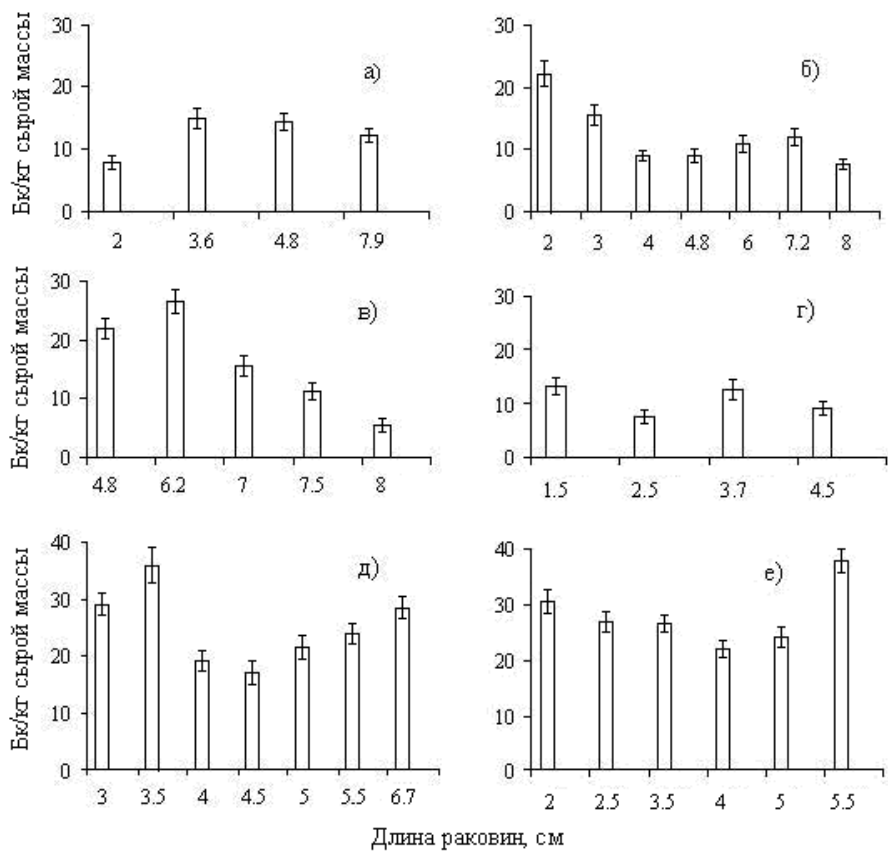


Рис. 2. Распределение концентрации ^{210}Po в мягких тканях *M. galloprovincialis* в зависимости от длины их раковин. Отбор мидий проводили в 2001 г. в б. Севастопольской (а – июнь и б – ноябрь); устье р. Бельбек (в – июнь); б. Мартыновой (г – июнь), б. Казачьей (д – апрель, е – июнь) (Лазоренко и др., 2002)

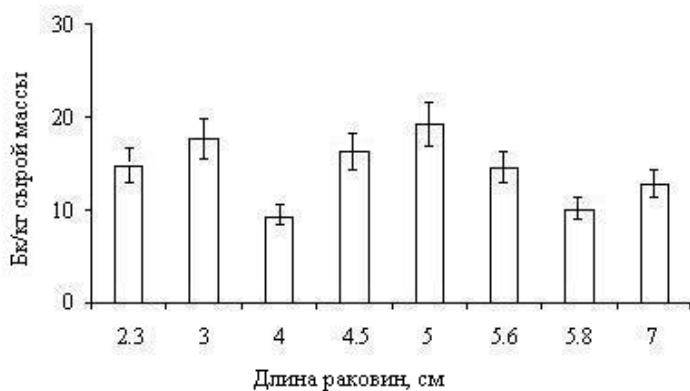


Рис. 3. Распределение концентрации ^{210}Po в мягких тканях мидий из б. Стрелецкой в зависимости от длины их раковин (июнь 2001 г.)

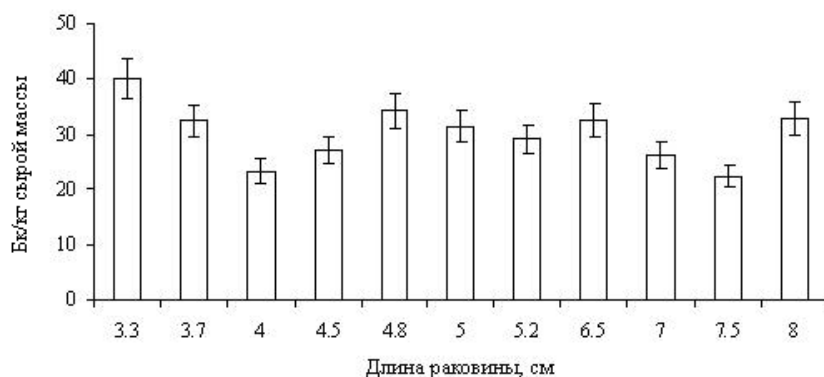


Рис. 4. Распределение концентраций ^{210}Po в мягких тканях мидий из б. Карадагской (Золотые ворота) в зависимости от длины их раковин (июнь 2001 г.)

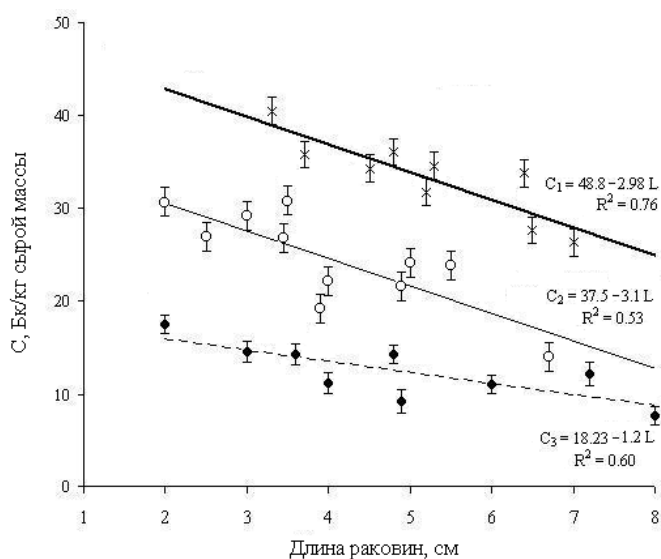


Рис. 5. Зависимости концентрации ^{210}Po в мягких тканях мидий из бухт Карадагской (C₁), Казачьей (C₂) и Севастопольской (C₃) от длины их раковин (L)

трех севастопольских бухтах и Карадагской бухте, от длины их раковины приведено на рис. 5.

Для оценки влияния экологических условий среды на аккумуляцию ^{210}Po мидиями в 2010 г. были взяты пробы в двух разных точках б. Стрелецкой. Станция 1 расположена на выходе из бухты (координаты 44°35'17"N, 33°38'16"E), а реперная станция 2 – в ее кутовой части (координаты 44°35'37"N, 33°28'17"E).

Результаты определения ^{210}Po в исследованных мидиях представлены на рис. 6.

Полученные зависимости (рис. 6) отражают влияние на уровни аккумуляции ^{210}Po мидиями экологического состояния среды, формируемого химическими поллютантами, гидролого-гидрохимическими, гидрофизическими и биоседиментационными процессами, происходящими в локальных участках Стрелецкой бухты. При близких величинах до-

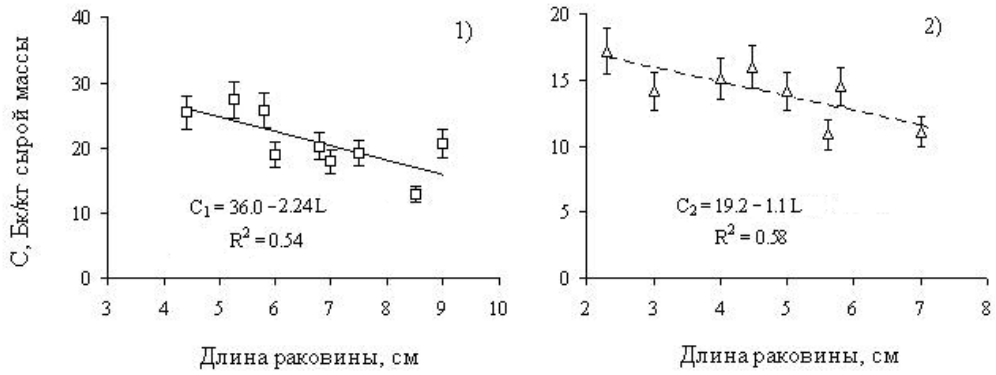


Рис. 6. Зависимость концентрации ^{210}Po в мягких тканях мидий из Стрелецкой бухты (С) от длины их раковин (L): 1 – станция 1; 2 – реперная станция 2

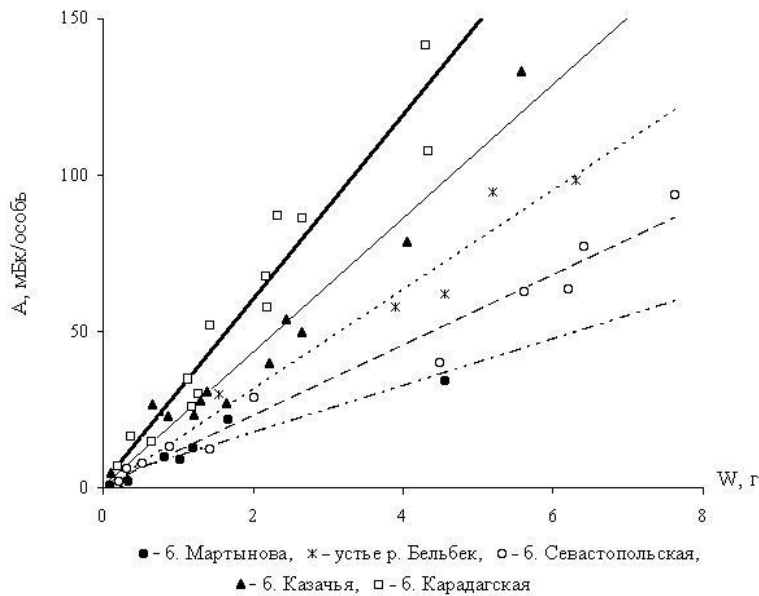


Рис. 7. Зависимость активности ^{210}Po (A) в мягких тканях особи от их сырой массы W

стоверности аппроксимации ($R^2 = 0,54$ и $0,58$) коэффициенты в уравнениях, описывающих зависимости концентраций ^{210}Po в мидиях от длины раковин, были почти в 2 раза выше для моллюсков, обитающих в месте отбора, приближенном к открытой части моря, чем в кутовой части бухты.

Из представленных выше данных следует, что концентрации ^{210}Po в мягких тканях мидий уменьшаются с увеличением длины

их раковин (возраста). Подобные закономерности получены F.P. Carvalho с соавторами (2010, 2011). Ранее нами было установлено, что при проведении сравнительных оценок экологического состояния мидий и среды их обитания наиболее показательными являются зависимости содержания (активности) ^{210}Po в мягких тканях особи от их массы (Лазоренко и др., 2002, 2005). На рис. 7 приведены такие зависимости для мидий из трех Севасто-

польских бухт, устьевой зоны р. Бельбек и б. Карадагской.

Для всех пяти групп исследованных моллюсков эти зависимости имели линейный характер и описывались уравнением 1:

$$A = a + bW, \quad (1)$$

где A – активность ^{210}Po в мягких тканях одного животного (мБк/особь); W – сырая масса мягких тканей одной особи в граммах; “ a ” и “ b ” – константы, различные для каждой группы моллюсков (Лазоренко и др., 2002, 2005).

Коэффициент “ a ” имеет размерность в мБк и определяет активность (содержание) ^{210}Po , поступающего в необменный фонд моллюска и не включаемого в процессы, связанные с изменением его массы. Коэффициент “ b ”, имеющий размерность мБк/г, определяет наклон кривой относительно оси ординат и соответствует приросту активности ^{210}Po в животном при увеличении массы его мягких тканей на единицу (в г). С учетом значений для коэффициентов “ a ” и “ b ” уравнения имели следующий вид:

$$A_1 = 30W \text{ (б. Карадагская)}, \quad (2)$$

$$A_2 = 0,7 + 21,4W \text{ (б. Казачья)}, \quad (3)$$

$$A_3 = 3,2 + 15,2W \text{ (устье р. Бельбек)}, \quad (4)$$

$$A_4 = 0,7 + 11,2W \text{ (б. Севастопольская)}, \quad (5)$$

$$A_5 = 3,0 + 7,5W \text{ (б. Мартынова)}. \quad (6)$$

На наш взгляд, значения коэффициентов “ a ” и “ b ” в уравнениях 2-6 позволяют оценивать состояние мидий в разных экологических условиях. Их сравнение для разных мест обитания может свидетельствовать о том, что

возможность *M. galloprovincialis* аккумулировать ^{210}Po ограничивается менее благоприятными условиями среды и экологическим состоянием моллюсков.

Обсуждение

Анализ выявленных взаимосвязей уровня аккумуляции ^{210}Po мидиями Черного моря с их размерными и массовыми показателями дает возможность заключить, что этот радионуклид может рассматриваться как природный индикатор состояния моллюсков и среды их обитания (Лазоренко и др., 2002, 2005; Lazorenko, Polikarpov, 2002; Egorov et al., 2006; Lazorenko et al., 2009, 2010). Подобные закономерности получены также для *M. galloprovincialis*, исследованных на протяжении нескольких сезонов (Carvalho et al., 2010, 2011).

Разными авторами предлагаются различные подходы для объяснения и интерпретации результатов (Germain et al., 1992; Swift et al., 1995; Wildgust et al., 1998; Ryan et al., 1999; Carvalho et al., 2010, 2011). В частности, установлено, что гипоксия и гипертермия в морской среде способствуют снижению способности моллюсков старшего возраста по сравнению с младшими возрастными группами восстанавливать уровни потребления кислорода после их возвращения к естественным условиям обитания, поэтому нужно учитывать эти факторы окружающей среды при их исследовании (Hole et al., 1995). F.P. Carvalho с соавторами (2010) установили, что максимальные активности ^{210}Po в пробах *M. galloprovincialis* определялись зимой, а минимальные – летом. Ими было выдвинуто предположение, что активность ^{210}Po в мягких тканях мидий в течение года остается на одном и том же уровне, а ее флуктуации могут быть обусловлены изменениями массы мягких тканей и зависеть от сезонных изменений в них

содержания липофильных и липофобных компонентов.

^{210}Po как химический аналог серы ассоциирован с белковыми компонентами мидий, а условия их обитания влияют на изменение в животных количества белка и, соответственно, содержание этого радионуклида в их мягких тканях (Wildgust et al., 1999). Установлено, что нефтепродукты, фенольные соединения и тиоловые яды в среде блокируют сульфгидрильные группы белков мидий и изменяют ритм периодической активности створок, что приводит к недостатку кислорода и пищи, необходимых для жизнедеятельности моллюсков (Слатина, 1989), и сопровождается уменьшением количества белков в этих гидробионтах (Таниева, Шапиро, 1987). Загрязнение среды бытовыми стоками вызывает сдвиг начала размножения черноморских мидий, замедляет рост массы тела и изменяет морфометрию их раковин (Шадрин, Лежнев, 1990). Высокая зараженность мидий паразитами в местах сброса бытовых отходов вызывает нарушение гаметогенеза, кастрацию мидий и ослабление смыкания створок (Щепкина, 1990).

На наш взгляд, суммарный отклик мидий на присутствие в среде загрязнителей разной природы и происхождения следует оценивать по величинам концентраций и активностей ^{210}Po в этих гидробионтах с учетом стадий их репродуктивного цикла. У мидий в течение года происходят значительные изменения массы мягких тканей, сопровождающиеся перераспределением трат ассимилированной этими животными энергии на соматический и генеративный рост и изменением количественных соотношений биохимических составляющих, в первую очередь аминокислот и белков (Финенко и др., 1990). В течение года массовый нерест у черноморских мидий происходит два, иногда три раза (Пиркова, 1994).

При нересте потеря массы мягких тканей мидий самая большая, она выше у особей старших возрастов, так как с увеличением размера / общей массы особи в ней увеличивается количество белка (Финенко и др., 1990). При одноразовом нересте черноморских мидий в течение года колебания массы их мягких тканей может достигать 11-29 % (Финенко и др., 1990). При нересте вместе с половыми продуктами, состоящими, в основном, из белков, с которыми ассоциирован ^{210}Po , этот радионуклид, скорее всего, выводится из мидий. При исследовании мидий важно учитывать, чтобы в пробах число особей, гонады которых находятся на одних и тех же стадиях развития, было достаточным для каждой из размерных групп для получения статистически значимых результатов. Для оценки экологического состояния мидий из разных морских районов с использованием ^{210}Po следует выявить среди них наименее загрязненную по химическим и радиозэкологическим показателям акваторию и провести определение этого радионуклида в тех животных, гонады которых находятся в стадиях посленерестовой перестройки (б) и относительного покоя (1). В Севастопольском морском районе таким критериям соответствует б. Казачья. Нами установлено, что независимо от длины раковин мидий, гонады которых находились в стадиях 1 и 6, концентрация ^{210}Po в мягких тканях этих гидробионтов составляла в среднем 21,4 Бк/кг сырой массы. Так как в указанный период в гонадах животных отсутствовали половые продукты, их вклад в аккумуляцию ^{210}Po исключался. Отклонение от этой величины может быть обусловлено разными причинами, основные из которых переход гонад мидий к стадиям начала гаметогенеза (2), активного гаметогенеза (3), преднерестовой (4) и нереста (5), а также состояние животных в местах их обитания. Концентрация ^{210}Po , равная 21,4 Бк/кг

сырой массы, может служить одним из основных сравнительных показателей нормального экологического состояния мидий, обитающих в прибрежной зоне Черного моря.

Для расширения возможностей интерпретации результатов при исследовании аккумуляционной способности мидий в отношении ^{210}Po сравнивали его концентрации в

животных из б. Стрелецкой и б. Карадагской с учетом частоты индивидуальной встречаемости моллюсков разного возраста, половой принадлежности и стадии репродуктивного цикла (рис. 8, 9).

Необходимо также учитывать, что плодovitость мидий зависит от места их обитания, при этом в различных районах Черного

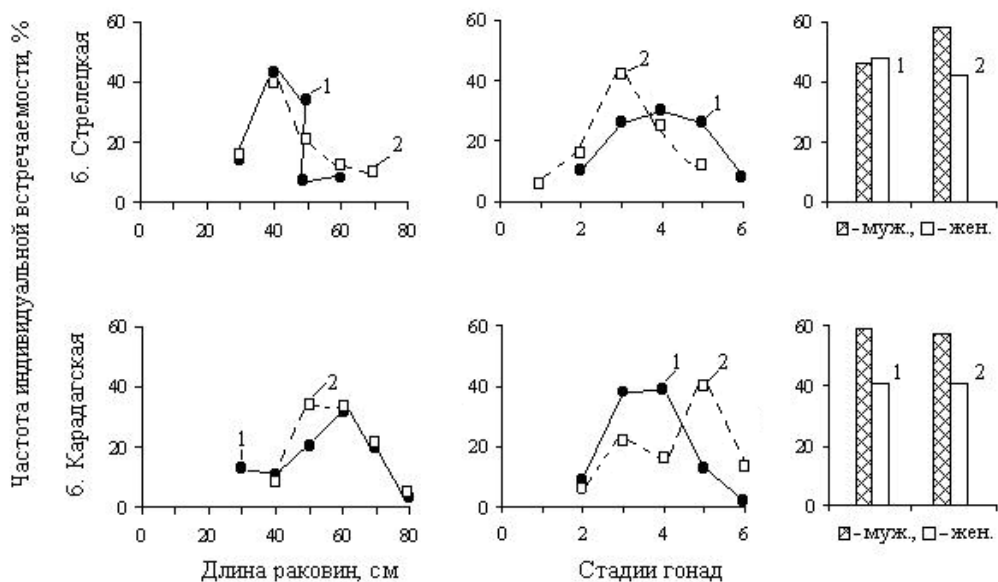


Рис. 8. Частота индивидуальной встречаемости мидий с разной длиной раковин и стадиями репродуктивного цикла и половая структура в двух произвольных выборках, отобранных в бухтах Стрелецкой и Карадагской

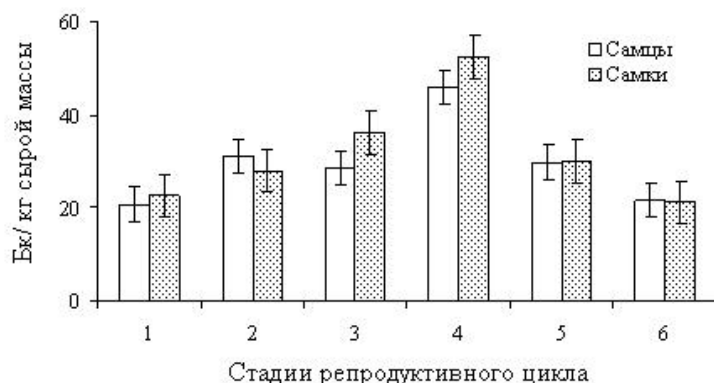


Рис. 9. Зависимость концентраций ^{210}Po в мидиях из Карадагской бухты от их половой принадлежности и стадий репродуктивного цикла

моря сроки нереста мидий могут не совпадать, что связано с различающимися экологическими условиями (Холодов и др., 2010). Массовый нерест мидий в Черном море повторяется два раза в год: весной и осенью, но так как репродуктивный цикл продолжается круглый год, в пробах этих гидробионтов в любой сезон обнаруживаются особи в стадии нереста. Массовый нерест мидий скального биотопа в различных районах моря начинается весной при повышении температуры до 8,0 °С, а осенью – при снижении до 18–15,5 °С. При неблагоприятных температурных условиях происходит задержка сроков созревания и нереста. Известно, что гаметогенез у мидий *M. galloprovincialis* замедляется при температуре выше 20,5 °С, а рост ооцитов прекращается при температуре ниже 3,5 °С. Обилие пищи способствует развитию гамет (половых клеток), а при ее недостатке наблюдается подавление гаметогенеза, хотя его полной остановки не происходит. Экологические факторы, изменяющиеся на протяжении полового цикла, воспринимаются как сигналы к нересту только особями со зрелыми гонадами (Холодов и др., 2010).

Изменения концентраций ^{210}Po в мидиях могут быть обусловлены условиями среды, прежде всего соленостью или температурой (Hole et al., 1995), видом загрязнений (Germain et al., 1992; Swift et al., 1995; Ryan et al., 1999; Carvalho et al., 2010, 2011) и такими биологическими параметрами, как стадии репродуктивного цикла. Так как ^{210}Po ассоциируется, в основном, с белками и аминокислотами (Cherry, Shannon, 1974; Wildgust et al., 1999), изменения его концентраций в мягких тканях мидий в течение репродуктивного цикла опосредованно отражают роль стадий развития

гонад в формировании пула этого природного радионуклида в моллюсках.

Заключение

Для оценки состояния мидий *M. galloprovincialis* в разных условиях их обитания с использованием ^{210}Po предложен не применявшийся ранее подход, а именно определение роли гонад и стадий их развития в формировании уровней накопления этого природного радионуклида в моллюсках. К обязательным биологическим показателям мидий при исследовании их аккумулярующих свойств в отношении ^{210}Po следует причислять длину раковин, массу мягких тканей и стадии репродуктивного цикла. Из результатов определения ^{210}Po в мидиях из разных акваторий Севастопольского морского района и юго-восточной части Крыма вытекает, что экологическое состояние среды в бухтах Карадагской и Казачьей наиболее благоприятно для жизнедеятельности черноморских мидий. Показано, что ^{210}Po проявляет свои индикаторные свойства при исследовании состояния моллюсков и среды их обитания.

Благодарности

Авторы выражают искреннюю благодарность и признательность всем участникам отбора проб черноморских мидий во время полевых экспедиционных исследований, прежде всего сотрудникам ИМБИ им. А.О. Ковалевского РАН и Карадагского биосферного заповедника вед. науч. сотр., к.б.н. В.В. Трусевичу, ст. науч. сотр., к.б.н. Ю.В. Смирновой, вед. науч. сотр., к.б.н. Н.А. Болтачевой, ст. науч. сотр., к.б.н. А.Я. Столбову, науч. сотр. В.Н. Поповичеву, вед. инж. Д.В. Евтушенко и вед. инж. И.Н. Мосейченко.

Список литературы

Иванов В.А., Овсяный Е.И., Репетин Л.Н., Игнатъева О.Г. (2006) *Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты и его изменения под воздействием климатических и антропогенных факторов*. Севастополь, МГИ НАН Украины, 90 с. [Ivanov V.A., Ovsyaniy E.I., Repetin L.N., Ignatieva O.G. (2006) *Hydrological and hydrochemical regime of Sevastopol Bay and its changes under the influence of climatic and anthropogenic factors*. Sevastopol, Marine Hydrophysical Institute National Academy of Science, 90 p. (in Russian)]

Куфтаркова Е.А., Родионова Н.Ю., Губанов В.И., Бобко Н.И. (2008) Гидрохимическая характеристика отдельных бухт Севастопольского взморья. *Труды ЮГНИРО*, 46: 110-117 [Kuftarkova E.A., Rodionova N.Yu., Gubanov V.I., Bobko N.I. (2008) Hydrochemical characteristics of several bays of Sevastopol coast. *Proceedings of YugNIRO* [Trudy YugNIRO], 46: 110-117 (in Russian)]

Лазоренко Г.Е., Пиркова А.В., Болтачева Н.А., Столбов А.Я. (2002) Полоний как природный радиоиндикатор экологического состояния черноморских мидий *M. galloprovincialis*. *Доклады НАНУ*, 10: 187-192 [Lazorenko G.E., Pirkova A.V., Boltacheva N.A., Stolbov A.Ya. (2002) Polonium as a natural radioindicator of the ecological state of the Black Sea mussels *M. galloprovincialis*. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine* [Doklady NANU], 10: 187-192 (in Russian)]

Лазоренко Г.Е., Поликарпов Г.Г., Смирнова Ю.В., Трусевич В.В. (2005) Гидроэкологическая значимость сравнительных исследований аккумуляции природного радионуклида ^{210}Po в черноморских мидиях из Карадгской и Севастопольских бухт. *Доклады НАНУ*, 9: 203-209 [Lazorenko G.E., Polikarpov G.G., Smirnova Yu.V., Trusevich V.V. (2005) Hydroecological importance of comparative studies of accumulation of natural radionuclide ^{210}Po in the Black Sea mussels from the Karadag and Sevastopol bays. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine* [Doklady NANU], 9: 203-209 (in Russian)]

Малахова Л.В., Костова С.К., Плотыцина О.В. (2003) Химическое загрязнение компонентов экосистемы Казачьей бухты (Черное море). *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*, 9: 112-116 [Malakhova L.V., Kostova S.K., Plotitsyna O.V. (2003) Chemical contamination of ecosystem components in the Kazachya Bay (the Black Sea). *Ecological safety of coastal and shelf zones and complex use of shelf resources* [Ecolgicheskaya bezopasnost pribrezhnoy i shefovoi zon i kompleksnoey ispozovanie ikh resursov], 9: 112-116 (in Russian)]

Методические рекомендации по санитарному контролю за содержанием радиоактивных веществ в объектах окружающей среды (1980) Марей А.Н., Зыкова А.С. (ред.) М., Наука, 336 с. [Guidelines on sanitary control for the content of radioactive substances in the objects of environment (1980) Marey A.N., Zyкова A.S. (eds.) Moscow, Nauka, 336 p. (in Russian)]

Овсяный Е.И., Романов А.С., Игнатъева О.Г. (2003) Распределение тяжелых металлов в поверхностном слое донных осадков Севастопольской бухты (Черное море). *Морской экологический журнал*, 2 (2): 85-93 [Ovsyaniy E.I., Romanov A.S., Ignat'eva O.G. (2003) Distribution of heavy metals in the surface layer of bottom sediments in the Sevastopol Bay (Black Sea). *Marine Ecological Journal* [Morskoi Ecologicheskyy Zhurnal], 2 (2): 85-93 (in Russian)]

Пиркова А.В. (1994) *Размножение мидии *Mytilus galloprovincialis* Lam. и элементы биотехнологии ее культивирования*. Автореф. дисс. ... канд. биол. наук: 03.00.17. Севастополь,

24 с. [Pirkova A.V. (1994) *Reproduction of mussel Mytilus galloprovincialis Lam. and elements of its biotechnology and cultivation. Abstract of PhD thesis in Biology: 03.00.17.* Sevastopol, 24 p. (in Russian)]

Слатина Л.Н. (1989) Влияние токсикантов на ритм периодической активности створок черноморских мидий. *Гидробиологический журнал*. Депонировано в ВИНТИ 8.12.89 г. № 8743. В89. 14 с. [Slatina L.N. (1989) The impact of toxicants on the rhythm of periodic flapping activity of Black Sea mussels. *Hydrobiological journal*. Deposited in VINITI 8.12.89, № 8743. V89. 14 p. (in Russian)]

Таниева А.И., Шапиро А.З. (1987) Морфофизиолого-биохимические изменения у черноморских мидий в условиях токсичности среды. *Гидробиологические исследования на Украине в XI пятилетке: Тезисы докладов на 5-й конференции Украинского филиала Всесоюзного гидробиологического общества*. Киев, с. 228-229 [Tanieva A.I., Shapiro A.Z. (1987) Morfo-physiological and biochemical changes in the Black Sea mussels in a toxic environment. *Hydrobiological research in the Ukraine in the eleventh five-year plan: Abstracts of the 5th Conference of the Ukrainian branch of the All-Union Hydrobiological Society*. Kiev, p. 228-229 (in Russian)]

Терещенко Н.Н., Лазоренко Г.Е., Мирзоева Н.Ю., Егоров В.Н., Плотицына О.В. (2014) Радиоэкологическое состояние бухты Казачья (Черное море) в отношении токсических металлов Hg, ^{90}Sr , $^{238,239,240}\text{Pu}$ и ^{210}Po . *Морской экологический журнал*, 13 (3): 59-74 [Tereshchenko N.N., Lazorenko G.E., Mirzoeva N.Yu., Egorov V.N., Plotitsyna O.V. (2014) Radio-ecological state of the Kazachia Bay (the Black Sea) in respect of toxic metals Hg, ^{90}Sr , $^{238,239,240}\text{Pu}$ and ^{210}Po . *Marine Ecological Journal [Morskoi Ecologicheskyy Zhurnal]*, 13 (3): 59-74 (in Russian)]

Финенко Г.А., Романова З.А., Аболмасова Г.И. (1990) Экологическая энергетика черноморской мидии. *Биоэнергетика гидробионтов*. Шульман Г.Е., Финенко Г.А. (ред.) Киев, Наукова думка, с. 32-72 [Finenko G.A., Romanova Z.A., Abolmasova G.I. (1990) Ecological energetics of the Black Sea mussels. *Bioenergetics of aquatic organisms*. Schulman G.E., Finenko G.A. (eds.) Kiev, Naukova dumka, p. 32-72 (in Russian)]

Холодов В.И., Пиркова А.В., Ладыгина Л.В. (2010) *Выращивание мидий и устриц в Черном море*. Севастополь, ИнБЮМ, 424 с. [Kholodov V.I., Pirkova A.V., Ladygina L.V. (2010) *Cultivation of mussels and oysters in the Black Sea*. Sevastopol, IBSS, 424 p. (in Russian)]

Цихон-Луканина Е.А. (1982) Пищевые спектры донных моллюсков. *Океанология*, 22 (6): 1016-1020 [Tsikhon-Lukanina E.A. (1982) Food spectra of benthic molluscs. *Oceanology [Oceanologia]*, 22 (6): 1016-1020 (in Russian)]

Цихон-Луканина Е.А. (1987) *Трофология мидий*. М., Наука, 176 с. [Tsikhon-Lukanina E.A. (1987) *Trophology of mussels*. Moscow, Nauka, 176 p. (in Russian)]

Шадрин Н.В., Лежнев И.В. (1990) Изменение популяции *M. galloprovincialis* под влиянием сточных вод. *Биоэнергетика гидробионтов*. Шульман Г.Е., Финенко Г.А. (ред.) Киев, Наукова думка, с. 78-83 [Shadrin N.V., Lezhnyov I.V. (1990) Changes in the *M. galloprovincialis* population under the influence of wastewater. *Bioenergetics of hydrobionts*. Schulman G.E., Finenko G.A. (eds.) Kiev, Naukova dumka, p. 78-83 (in Russian)]

Щепкина А.М. (1990) Влияние зараженности гельминтами на уровень энергетических запасов в теле черноморских мидий. *Биоэнергетика гидробионтов*. Шульман Г.Е., Финенко Г.А. (ред.) Киев, Наук. думка, с. 72-78 [Shchepkina A.M. (1990) Influence of infestation by helminths

at the level of energy reserves in the body of the Black Sea mussels. *Bioenergetics of hydrobionts*. Schulman G.E., Finenko G.A. (eds.) Kiev, Naukova dumka, p. 72-78 (in Russian)]

Aarkrog A., Baxter M.S., Bettencourt A.O., Bojanowski R., Bologna A., Charmasson S., Cunha I., Delfanti R., Duran E., Holm E., Jeffree R., Livingston H.D., Mahapanyawong S., Nies H., Osvath I., Pingyn Li, Povinec P.P., Sanchez A., Smith J.N., Swift D. (1997) A comparison of doses from ^{137}Cs and ^{210}Po in marine food: A major international study. *Journal of Environmental Radioactivity*, 34 (1): 69-90

Baxter M.S. (1996) Technologically enhanced radioactivity: an overview. *Journal of Environmental Radioactivity*, 32 (1-2): 3-17

Carvalho F.P., Oliveira J.M., Alberto G., Vives i Batlle J. (2010) Allometric relationships of ^{210}Po and ^{210}Pb in mussels and their application to environmental monitoring. *Marine Pollution Bulletin*, 60 (10): 1734-1742

Carvalho F.P., Oliveira J.M., Alberto G. (2011) Factors affecting ^{210}Po and ^{210}Pb activity concentrations in mussels and implications for environmental bio-monitoring programmes. *Journal of Environmental Radioactivity*, 102 (2): 128-137

Chen Q., Dalgaard H., Nielsen S.P., Aarkrog A. (1998) *Determination of ^{210}Po and ^{210}Pb in mussel, fish, sediment, petroleum*. Roskilde, Denmark, RISØ National Laboratory, 10 p.

Cherry R.D., Shannon L.V. (1974) The alpha radioactivity of marine organisms. *Atomic Energy Review*, 12 (1): 9-45

Cochran J.K., Masqué P. (2003) Short-lived U/Th series radionuclides in the ocean: Tracers for scavenging rates, export fluxes and particle dynamics. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 52 (1): 461-492

Egorov V.N., Lazorenko G.E., Mirzoyeva N.Yu., Stokozov N.A., Kostova S.K., Malakhova L.V., Pirkova A.V., Arkhipova S.I., Korkishko N.F., Popovichev V.N., Plotitsyna O.V., Migal L.V. (2006) Content ^{137}Cs , ^{40}K , ^{90}Sr , ^{210}Po radionuclides and some chemical pollutants in the Black Sea mussels *Mytilus galloprovincialis*. *Marine Ecological Journal* [Morskoi Ecologicheskyy Zhurnal], 5 (3): 70-78

Germain P., Leclerc G., Simon S. (1992) Distribution of ^{210}Po in *Mytilus edulis* and *Fucus vesiculosus* along the channel coast of France: influence of industrial releases in the Seine river and estuary. *Radiation Protection Dosimetry*, 45 (1-4): 257-260

Heyraud M., Cherry R.D. (1979) Polonium-210 and lead-210 in marine food chains. *Marine Biology*, 52 (3): 227-236

Hole L.M., Moor M.N., Bellamy D. (1995) Age-related cellular and physiological reactions to hypoxia and hyperthermia in marine mussels. *Marine Ecology Progress Series*, 122: 173-178

Lazorenko G.E., Polikarpov G.G. (2002) ^{210}Po in the Black Sea hydrobionts. *The radioecology-ecotoxicology of continental and estuarine environments: RADIOPROTECTION. Proc. Intern. Congress ECORAD-2001, Aix-en-Provence (France), 3-7 September 2001. Volume II.* p. 821-826

Lazorenko G.E., Polikarpov G.G., Osvath I. (2009) ^{210}Po accumulation by components of the Black Sea ecosystem. *Radioprotection*, 44 (5): 981-986

Lazorenko G.E., Polikarpov G.G., Pirkova A.V., Osvath I. (2010) Naturally occurring radionuclide ^{210}Po in the Black Sea mollusks. *Marine Ecological Journal* [Morskoi Ecologicheskyy Zhurnal], 9 (3): 43-48

Ritchie C.D., Shimield G.B. (1991) The use of $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ disequilibria in the study of the fate of marine particulate matter. *Radionuclides in the study of marine processes*. Kershaw P.J., Woodhead D.S. (eds.) London, Elsevier Applied Science, p. 142-153

Rutgers van der Loeff M.M., Geibert W. (2008) U- and Th-series nuclides as tracers of particle dynamics, scavenging and biogeochemical cycles in the oceans. *UeTh Series Nuclides in Aquatic Systems*. Krishnaswami S., Cochran J.K. (eds.) Amsterdam, Elsevier, p. 227-268

Ryan T.P., Dowdall A.M., McGarry A.T., Pollard D., Cunningham J.D. (1999) ^{210}Po in *Mytilus edulis* in the Irish marine environment. *Journal of Environmental Radioactivity*, 43 (3): 325-342

Swift D.J., Smith D.L., Allington D.L., Winpenny K. (1995) A laboratory and field study of ^{210}Po depuration by edible winkles (*Littorina littorea* L.) from the Cambrian coast (north-eastern Irish Sea). *Journal of Environmental Radioactivity*, 26 (2): 119-133

Tolmachyov S.Yu., Momoshima N., Maeda Y. (2002) Role of suspended particulate matter and colloids in ^{210}Po behavior on coastal seawaters. *Radioactivity in the Environment: International Conference*. Monaco, p. 481-484

Wildgust M.A., McDonald P., White K.N. (1998) Temporal changes of ^{210}Po in temperate coastal waters. *Science of the Total Environment*, 214 (1): 1-10

Wildgust M.A., McDonald P., White K.N., Bowsher C.G. (1999) Polonium-210, a protein sulphur analogue. *Marine Biology*, 133: 683-689