

УДК [551.464.679:594](262.81)

ЕСТЕСТВЕННЫЕ РАДИОНУКЛИДЫ ^{238}U И ^{232}Th В РАКОВИНАХ МОЛЛЮСКОВ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

© 2026 г. М. В. Хлопкова¹, Н. И. Рабазанов^{1,2}, Т. А. Асварова¹

¹Прикаспийский институт биологических ресурсов Дагестанского федерального исследовательского центра РАН, Махачкала, Российская Федерация

²Дагестанский государственный университет, Махачкала, Российская Федерация

E-mail: hlopkovam@mail.ru

Поступила в редакцию 13.03.2025; после доработки 17.11.2025;
принята к публикации 06.08.2026.

Исследовано накопление радионуклидов моллюсками Каспийского моря в условиях естественной и антропогенной динамики среды. Цель работы заключалась в изучении особенностей концентрирования ^{238}U и ^{232}Th и в оценке аккумулирующей способности по коэффициентам накопления (C_f) двустворчатых моллюсков Cardiidae Среднего и Северного Каспия. Пробы отобраны в 2012–2016 гг. В раковинах определено содержание урана и тория радиохимическим методом спектрофотометрически с арсеназо III на спектрофотометре Spekol (^{238}U — при $\lambda = 670$ нм; ^{232}Th — при $\lambda = 665$ нм) с последовательным хроматографическим выделением U и Th из раствора с помощью анионита ЭДЭ-10П. Установлена положительная корреляция урана с C_{org} и CaCO_3 . Выявлено, что отношение U/C_{org} для двустворчатых моллюсков характеризуется значениями от 7×10^{-5} до 45×10^{-5} . Показано, что на аккумуляцию ^{238}U в раковинах в процессе роста моллюсков влияет ряд биотических факторов. Первый — видоспецифичность. Так, моллюски дагестанского побережья в возрасте 6–7 лет располагаются по значениям удельной активности (A_c) ^{238}U в своих раковинах в следующем порядке: *Didacna protracta novocaspia* > *D. protracta protracta* > *Monodacna caspia* > *D. trigonoides* (53,0; 45,4; 34,0 и 8,82 Бк·кг^{−1} соответственно). Моллюски Северного Каспия располагаются в следующем порядке: *D. protracta novocaspia* > *D. protracta protracta* > *D. protracta submedia* (31,5; 22,3 и 7,56 Бк·кг^{−1}). Второй биотический фактор — возраст: у молодых моллюсков аккумуляция урана в 2 раза выше, чем у взрослых особей. Третий — наличие арагонитовой структуры раковин. Отмечено опосредованное влияние абиотических факторов — выхода гидротермальных вод по тектоническим разломам на дне Каспия при повышении сейсмоактивности. В целом рост содержания естественных радионуклидов в водах Каспийского моря является следствием аридизации. На аккумуляцию тория в раковинах моллюсков в большой степени влияют его наличие в грунте и выход пластовых вод при нефтедобыче. Определено, что для проанализированных моллюсков характерны следующие порядки величин C_f : $n \times 10^1$ для ^{238}U и $n \times 10^3$ для ^{232}Th . При таких значениях гидробионты интенсифицируют биогенное накопление урана и тория из морской воды, что способствует самоочищению вод Каспийского моря от радиоизотопов. Выявлены региональные особенности в аккумулирующей способности моллюсков Каспийского моря. Так, в раковинах взрослых особей среднее значение C_f для ^{238}U составило 77, а для ^{232}Th — 1870. Отмечено повышенное накопление естественных радионуклидов в районе Дербента в раковинах *D. protracta novocaspia*: ^{238}U — до уровня ($53,0 \pm 0,7$) Бк·кг^{−1} при $C_f = 140$; ^{232}Th — до уровня ($11,0 \pm 0,09$) Бк·кг^{−1} при $C_f = 3857$. Полученные нами значения A_c для ^{238}U (29 Бк·кг^{−1} в раковинах *Didacna* и *Monodacna*) приближены к усредненным величинам для настоящего времени. C_f урана в раковинах в 1,4 раза превышает значения, зарегистрированные в 1975 г. Вычисленные значения

A_c для ^{232}Th в раковинах моллюсков составляли $5,3 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$; это в 8 раз ниже величин, полученных ранее для побережья Азербайджана (для района нефтегазовых месторождений Северного Каспия), усреднённых современных данных и ПДК тория.

Ключевые слова: двустворчатые моллюски, раковины, естественные радионуклиды, ^{238}U , ^{232}Th , аккумуляция, Каспийское море

Угрозы экологической безопасности Прикаспийского региона связаны с колебаниями уровня Каспийского моря, высокой сейсмической и геодинамической активностью [Мацапулин и др., 2008], а также с загрязнением при нефтедобыче не только углеводородами, но и природными радиоизотопами, выносимыми в высоких концентрациях с пластовыми водами на поверхность [Айтеков, 2017]. В связи с увеличением антропогенной нагрузки (интенсификация разработки нефтегазовых месторождений, процессы застройки побережья на территориях, которые освободились из-за продолжающегося падения уровня Каспия, и расширение к 2030 г. Махачкалинского торгового порта как ветви транскаспийского транспортного коридора «Север — Юг») необходимо знать уровень загрязнения окружающей среды и биоты, в частности уровень загрязнения радионуклидами. В современном мире уран и торий являются важными стратегическими элементами: они находят широкое применение в высоких и зелёных технологиях, а также в производстве электроэнергии. Именно поэтому их мониторинг в морской среде — первостепенная задача.

Подвижность урана в экосистеме зависит от окислительно-восстановительных условий и комплексобразования с органическими веществами. В водах морей и океанов уран находится в форме устойчивых комплексных анионов $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2-}$ и $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{4-}$, торий — в форме комплекса $[\text{Th}(\text{CO}_3)_5]^{6+}$, легко сорбируемого глинистыми минералами. Для химического состава воды Каспийского моря характерно содержание большого количества сульфатов CaSO_4 и MgSO_4 (30,5 %), хлоридов NaCl , KCl и MgCl_2 (63,36 %), карбоната CaCO_3 (1,24 % от общего содержания солей); значение pH превышает 8 [Батурин, 1975; Неручев, 2007; Оглоблин, 1975].

В живых организмах концентрируются рассеянные в биосфере химические элементы, в частности радиоактивные. В. И. Вернадский [1965] отмечал: «...накопление урана органическим веществом имеет огромное значение в геохимии этого элемента. Ибо все другие известные нам процессы способствуют его существованию в дисперсной форме». В разных группах бентосных организмов накопление ^{238}U отличается: U у хищников аккумулируется в меньшей степени, чем у их жертв, питающихся растительной пищей [Koide et al., 1982; Tan et al., 2023]. Некоторые радионуклиды, такие как радий (^{226}Ra), стронций (^{90}Sr) и уран (^{238}U), поглощаются вместе с другими минералами (например, с кальцием) и избирательно накапливаются в раковинах двустворчатых моллюсков [Almazán Torres et al., 2025; Patel et al., 2023; Sun et al., 2021].

Миграции U и Th в породах, почвах и растениях аридных экосистем Прикаспийского региона достаточно исследованы [Тяжёлые естественные радионуклиды, 1990; Salikhov et al., 2017]. Между тем сведения о накоплении этих радионуклидов морскими организмами Каспийского моря практически отсутствуют, поэтому мы изучили содержание U и Th в морских двустворчатых моллюсках. Эти моллюски играют важную роль в процессах перераспределения и биоаккумуляции естественных радионуклидов в экосистемах; они являются индикаторами радионуклидного загрязнения водоёмов [Паньков, 1994]. Скелетные элементы гидробионтов традиционно используются в качестве простого и надёжного инструмента для определения удельной активности радионуклидов при мониторинге окружающей среды [Koide et al., 1982].

Аккумуляция радионуклидов моллюсками в экосистеме Каспийского моря в условиях естественной (изменения в водном балансе водоёма вследствие аридизации и повышение сейсмической активности) и антропогенной динамики среды (нефтегазодобыча и сопряжённый выход U и Th с пластовыми водами) изучена слабо, что и определяет актуальность представленной работы.

Цель исследования — выявить особенности аккумуляции и определить коэффициенты биологического накопления (concentration factor, C_f) урана и тория для характеристики аккумулирующей способности гидробионтов Среднего и Северного Каспия (на примере некоторых современных моллюсков *Bivalvia: Cardiidae*).

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Материал собран по разрезам Среднего Каспия на 20 станциях дагестанской части побережья на маломоторном судне «Казанка» в июне — сентябре 2012–2016 гг. в ходе ежегодных гидробиологических исследований с использованием дночерпателя Петерсена (площадь охвата 0,025 м²). Живые особи видов *Monodacna caspia* (Eichwald, 1829), *Didacna protracta protracta* (Andrusov, 1910), *Didacna protracta submedia* (Andrusov, 1910) и *Didacna protracta novocaspia* (Andrusov, 1910) отобраны с глубины 25–50 м. Моллюски *Didacna trigonoides* (Pallas, 1771) в возрасте от 2 до 7 лет собраны при помощи бентосного сачка и вручную на глубине 0,2–0,8 м с песчаного грунта в кутовой части Сулакского залива (43°33′1513″N, 47°50′6353″E).

В работе также использованы коллекции живых моллюсков (дата сбора 15.06.2012) из района Северного Каспия — *D. protracta novocaspia* и *D. protracta protracta* в возрасте до 7 лет.

Всего обработали 40 проб, более 700 раковин. Раковины тщательно очищали от обрастаний, удаляли мягкие ткани. Каждую пробу промывали, полностью удаляя налипшие частицы донных отложений и обрастаний. Камеральную обработку и идентификацию моллюсков проводили в лаборатории гидробиологии Прикаспийского института биологических ресурсов ДФИЦ РАН по определителю [Логвиненко, Старобогатов, 1968]. Возраст моллюсков устанавливали по кольцам роста на поверхности раковин [Золотарёв, 1989].

Радиохимическим методом определяли валовое содержание урана и тория в образцах раковин (без предварительного озоления при температуре +500 °C) и в воде [Попов, Поникарова, 1981]. Использовали методики, в которых учитывают высокое содержание кальция в пробах раковин моллюсков, а также их структуру. Так, проводили последовательную экстракцию радионуклидов из раковин, принимая во внимание, что кальций может влиять на распределение урана и тория кислоторастворимой формы. Это связано с тем, что раковины двустворчатых моллюсков состоят из двух слоёв — из наружного органического слоя (периостракума) и из основной части, образованной CaCO₃, с небольшим содержанием органических веществ.

При проведении исследований учитывали, что раковины *Didacna* и *Monodacna* имеют арагонитовую структуру кристаллической решётки, сформированной карбонатом кальция, которая образует с радионуклидами устойчивые соединения, тем самым влияя на накопление элемента. В связи с этим методика включала предварительную обработку образцов раковин в 8–12 н HCl, последовательное хроматографическое выделение ²³⁸U и ²³²Th из одного и того же раствора с помощью анионита ЭДЭ-10П, восстановление UO₂²⁺ до U⁴⁺ цинком, колориметрирование 4 н раствора HCl комплекса ²³⁸U и ²³²Th с арсеназо III на спектрофотометре Spekol при $\lambda = 670$ нм и $\lambda = 665$ нм соответственно и количественное соосаждение тория оксалатом кальция из оставшегося фильтрата после выделения урана. Анализ ²³⁸U и ²³²Th проводили в раковинах моллюсков в двух-трёх повторностях, ошибка количественного определения радионуклидов составляла 3–5 %. Содержание органического вещества в образцах установлено по Тюрину [Аринушкина, 1970]. Для определения карбонатов использован кальциметр ТУ 25-11-1106-75. Статистическая обработка данных проведена в программе Statistica 10 при уровне значимости $p < 0,05$.

Удельную активность (activity concentration, A_c , Бк·кг⁻¹) исследуемых радионуклидов в пробах моллюсков рассчитывали по следующим параметрам: отношение активности радионуклида к 1 мг·кг⁻¹ U — 12,6 Бк·кг⁻¹ и к 1 мг·кг⁻¹ Th — 4,07 Бк·кг⁻¹.

Коэффициент накопления (C_f) урана и тория определяли по формуле:

$$C_f = 1000 \times C_m / C_w ,$$

где C_m — концентрация радионуклида в раковине, $\text{мг} \cdot \text{кг}^{-1}$ сухой массы;

C_w — концентрация радионуклида в воде, $\text{мкг} \cdot \text{л}^{-1}$.

Минеральный состав раковин изучали рентгеноструктурным методом. Подготовленные в лаборатории образцы растирали в ступке до размера 2 мкм. Исследования проводили в Институте геологии ДФИЦ РАН. Выполнено 40 определений. Дифрактометрические кривые снимали на установке ДРОН-2.0 при монохроматическом излучении. В качестве стандарта для кальцита использовали исландский шпат, для арагонита — современный коралл. Следы вторичного кальцита в некоторых образцах свидетельствуют о нарушении сохранности первичного минерального и вещественного состава полностью арагонитовых раковин *Cardiidae* [Попов, 1977].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследования моллюсков родов *Didacna* и *Monodacna* (*Cardiidae*) Среднего и Северного Каспия выявили видоспецифичность накопления U и Th в раковинах в зависимости от стадии развития. Прижизненная аккумуляция ^{238}U обуславливает тесную связь между ураном и C_{org} . Установлена положительная корреляция урана с C_{org} и CaCO_3 . Выявлено, что отношение U/C_{org} для каспийских двустворчатых моллюсков составляет от 7×10^{-5} до 45×10^{-5} . По величинам A_c урана в раковинах моллюски дагестанского побережья в возрасте 6–7 лет располагаются в убывающем ряду следующим образом: *D. protracta novocaspia* > *D. protracta protracta* > *M. caspia* > *D. trigonoides* [(53,0 ± 0,7), (45,4 ± 0,7), (34,0 ± 0,17) и (8,82 ± 0,11) Бк·кг⁻¹ соответственно]. У *D. trigonoides*, обитающего в песчаном грунте кутовой части Сулакского залива на глубине 0,8 м, накопление радионуклидов ниже, чем у других представителей *Didacna* (табл. 1).

По содержанию ^{238}U в раковинах моллюски Северного Каспия располагаются в убывающем ряду следующим образом: *D. protracta novocaspia* > *D. protracta protracta* > *D. protracta submedia* [(31,5 ± 0,5), (22,3 ± 0,1) и (7,56 ± 0,07) Бк·кг⁻¹ соответственно] (см. табл. 1). Отметим, что все моллюски возраста 7 лет собраны на илисто-песчаном грунте на глубине 25 м из одного биотопа. Таким образом, прослеживается видоспецифичность в особенностях накопления урана — несколько повышенная A_c у *D. protracta novocaspia*, обитающего как в Северном, так и Среднем Каспии (на глубинах от 25 до 50 м) по сравнению с A_c у других видов. У взрослых особей *D. protracta* в Среднем Каспии удельная активность урана выше в 2,4 раза, чем у этих же моллюсков в Северном Каспии. У молодых особей содержание U выше из-за повышенной скорости их роста; C_f урана у них в 2 раз выше, чем у взрослых моллюсков. С возрастом замедляется рост раковин и, следовательно, уменьшается скорость накопления радионуклидов.

Для тория не выявлено изменения накопления в зависимости от индивидуального возраста моллюсков. В карбонатах отношение Th/U постоянно (кларковое число равно 3,7), а в биологических объектах отличается. В раковинах моллюсков Среднего и Северного Каспия значение варьировало в пределах 0,14–1,25 (табл. 1). Отношения U/CaCO_3 у моллюсков — от 2×10^{-7} до 31×10^{-7} . Уран аккумулируется в минеральном веществе раковин и в заключённом в них органическом веществе.

Определены корреляционные зависимости между накоплением ^{238}U в раковинах двустворчатых моллюсков в возрасте 7 лет (Y) и отношениями U/C_{org} (X_1) и U/CaCO_3 (X_2). Они выражаются уравнениями множественной регрессии.

Для Северного Каспия:

- $Y = 1,2 + 3,29X_1 + 0,74X_2$ ($R^2 = 0,98$) для *Didacna protracta protracta*;
- $Y = 2,74 + 18,2X_1 - 7,11X_2$ ($R^2 = 0,98$) для *Didacna protracta novocaspia*.

Для Среднего Каспия:

- $Y = 3,14 + 5,77X_1 - 0,01X_2$ ($R^2 = 0,91$) для *Didacna protracta protracta*;
- $Y = 2,2 + 5X_1 - 5X_2$ ($R^2 = 0,95$) для *Didacna protracta novocaspia*.

В этих уравнениях Y — $n \times 10^{-4} \%$ ^{238}U . R^2 — коэффициент детерминации.

Из уравнений видно, что фактор U/C_{org} (X_1) оказывает большее влияние на накопление U (Y), чем фактор U/CaCO_3 (X_2). Статистическая значимость проверена с помощью коэффициента детерминации. Установлено, что 91–98 % общей вариабельности Y объясняется изменением отношений U/C_{org} . Корреляционный анализ показал, что накопление ^{238}U в раковинах моллюсков Северного и Среднего Каспия положительно коррелирует со значениями C_{org} и CaCO_3 .

Таблица 1. Содержание естественных радионуклидов ^{238}U и ^{232}Th в раковинах двустворчатых моллюсков Каспийского моря

Table 1. The content of natural radionuclides ^{238}U and ^{232}Th in the shells of bivalves of the Caspian Sea

Вид моллюска, возраст раковины	Локация, грунт, глубина	²³⁸ U	²³² Th	C _f		Th/U	U/C _{org} , <i>n</i> × 10 ⁻⁵
				²³⁸ U	²³² Th		
Дагестанское побережье Среднего Каспия							
<i>Didacna trigonoides</i> , 3 года (раковина молодой особи)	Северная часть Среднего Каспия, Сулакский залив, песчаный, 0,8 м	<u>17,6 ± 0,16</u> 1,4 ± 0,04	<u>1,55 ± 0,05</u> 0,38 ± 0,01	47	543	0,27	21,5
<i>Didacna trigonoides</i> , 7 лет (раковина взрослой особи)		<u>8,82 ± 0,11</u> 0,7 ± 0,03	<u>1,63 ± 0,04</u> 0,4 ± 0,02	23	571	0,57	16,0
<i>Monodacna caspia</i> , 6 лет	Центральный район, песчаный, 23 м	<u>34,0 ± 0,17</u> 2,7 ± 0,02	<u>2,44 ± 0,03</u> 0,6 ± 0,01	90	857	0,20	15,0
<i>Didacna protracta</i> <i>protracta</i> , 7 лет	Южный район, илисто-песчаный, 50 м	<u>45,4 ± 0,7</u> 3,6 ± 0,1	<u>4,07 ± 0,06</u> 1,0 ± 0,03	120	1429	0,27	45,0
<i>Didacna protracta</i> <i>novocaspia</i> , 7 лет	Район Дербента, илисто-песчаный, 50 м	<u>53,0 ± 0,7</u> 4,2 ± 0,06	<u>11,0 ± 0,09</u> 2,7 ± 0,08	140	3857	0,64	35,0
Северный Каспий							
<i>Didacna protracta</i> <i>protracta</i> , 3 года	Песчано-илистый, 25 м	<u>59,2 ± 0,9</u> 4,7 ± 0,06	<u>2,6 ± 0,05</u> 0,64 ± 0,01	156	900	0,14	42,7
<i>Didacna protracta</i> <i>protracta</i> , 7 лет		<u>22,3 ± 0,1</u> 1,77 ± 0,05	<u>3,9 ± 0,06</u> 0,97 ± 0,02	60	1390	0,55	18,4
<i>Didacna protracta</i> <i>novocaspia</i> , 7 лет		<u>31,5 ± 0,5</u> 2,5 ± 0,04	<u>12,7 ± 0,21</u> 3,13 ± 0,05	83	4471	1,25	22,7
<i>Didacna protracta</i> <i>submedia</i> , 3 года		<u>12,6 ± 0,22</u> 1,0 ± 0,04	<u>2,03 ± 0,01</u> 0,5 ± 0,01	33	714	0,50	12,8
<i>Didacna protracta</i> <i>submedia</i> , 7 лет		<u>7,56 ± 0,07</u> 0,6 ± 0,02	<u>1,55 ± 0,08</u> 0,38 ± 0,01	20	542	0,63	7,1
В среднем для взрослых особей		<u>29,0 ± 0,36</u> 2,3 ± 0,05	<u>5,3 ± 0,07</u> 1,3 ± 0,03	77	1870	0,56	23,6

Примечание: в числителе — A_c , удельная активность радиоизотопов ^{238}U и ^{232}Th ($\text{Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$); в знаменателе — концентрация U и Th ($n \times 10^{-4} \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$) (среднее $\pm$ среднеквадратическое отклонение). C_f — коэффициент накопления.

Note: the numerator is A_c , the activity concentration of radionuclides ^{238}U and ^{232}Th ($\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$); the denominator is the concentration of U and Th ($n \times 10^{-4} \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) (mean $\pm$ SD). C_f is the concentration factor.

ОБСУЖДЕНИЕ

Двустворчатых моллюсков можно использовать для радиационного мониторинга Каспийского моря. Накопление урана в этих гидробионтах зависит от особенностей кристаллической решётки вида. Представители *Didacna* и *Monodacna* имеют арагонитовую структуру всех слоёв раковины [Попов, 1977]. На её наружном органическом слое происходит адсорбция соединений U, а также замещение катионов Ca^{2+} ионами U^{4+} в раковинном арагоните и кальците [Неручев, 2007]. При условии сохранения кристаллической арагонитовой составляющей раковины накопление радионуклида, вероятно, показывает его аккумуляцию при жизни моллюска. ^{238}U встраивается в арагонитовую структуру в процессе роста раковин, образуя с кальцием прочные соединения.

На глубинах илистые и илисто-песчаные грунты содержат больше урана, чем на песчаном мелководье, и моллюски его аккумулируют интенсивнее. Скорость накопления в раковинах зависит от поступления органического вещества с ^{238}U из илистых осадков. Нами показано, что отношение $\text{U}/\text{C}_{\text{org}}$ для моллюсков *Didacna* составляет от 7×10^{-5} до 45×10^{-5} (см. табл. 1). В работе [Оглоблин, 1975] указано отношение $\text{U}/\text{C}_{\text{org}}$ для этих моллюсков от $15,4 \times 10^{-5}$ до $18,5 \times 10^{-5}$. Существенные значения $\text{U}/\text{C}_{\text{org}}$, от 40×10^{-5} до 70×10^{-5} , в осадках Каспия обусловлены повышенной концентрацией U в воде [Батулин, 1975]. При разложении органического вещества и уменьшении концентрации C_{org} отношение $\text{U}/\text{C}_{\text{org}}$ возрастает. Прижизненное накопление U обуславливает тесную связь между U и C_{org} [Кузнецов, 1976; Patel et al., 2023].

В настоящее время продолжает развиваться биогеохимическое направление, у истоков которого стоял В. И. Вернадский. Оно основано на изучении перераспределения радионуклидов из водной среды в результате их поглощения гидробионтами. Полученные нами данные согласуются с ключевыми положениями о прижизненном, биогеохимическом накоплении урана моллюсками в водной среде и находят подтверждение в современных исследованиях российских и зарубежных учёных (табл. 2, 3) [Вернадский, 1965; Егоров, 2019; Неручев, 2007; Оглоблин, 1975; Оглоблин, Халифа-заде, 1974; Поликарпов, Егоров, 1986; Almazán Torres et al., 2025; Patel et al., 2023; Sun et al., 2021; Tan et al., 2023].

Таблица 2. Средняя удельная активность (A_c , Бк·кг $^{-1}$) и коэффициент биологического накопления (C_f) ^{238}U и ^{232}Th в раковинах двустворчатых моллюсков Каспийского моря и других водоёмов

Table 2. Mean activity concentration (A_c , Bq·kg $^{-1}$) and concentration factor (C_f) of ^{238}U and ^{232}Th in shells of bivalves in the Caspian Sea and other water bodies

Источники	Водоём	A _c		C _f	
		²³⁸ U	²³² Th	²³⁸ U	²³² Th
Наши данные	Каспийское море	29,0	5,3	77	1870
Синтюрина, Бигалиев, 2009		–	44,0	–	–
		4,2	43,8	55	15000
Оглоблин, 1975	Чёрное море	–	–	120	18000
	Средиземное море	–	–	–	19000
	Балтийское море	0,65	–	33	23000
	Японское море	0,63	–	24	8000
	Индийский океан	4,4	–	130	21000
Воротницкая, 1965	Озеро Иссык-Куль	39,7	–	100	–
Батурин, 1975	Моря	3,8	–	36	–
Blanchard et al., 1967 Tatsumoto, Goldberg, 1959	Индийский океан	0,35	0,004	–	–
	Атлантический океан	0,86	0,02	–	–
	Тихий океан	20,4	0,15	–	–
Данные за 1990–2025 гг.	Моря и океаны	30,0	44,0	80	1000
ПДК		120	45	–	–

Моллюски, являясь фильтраторами, способствуют очищению воды от коллоидов, на поверхности которых концентрируются значительные количества радионуклидов [Паньков, 1994]. В результате происходит усиление потока U и Th по трофическим цепям, а также накопление радионуклидов обитателями моря до уровней, существенно превышающих уровни в воде. Наиболее репрезентативным показателем концентрирования химических веществ гидробионтами является впервые предложенный В. И. Вернадским коэффициент накопления (C_f), равный отношению концентраций радиоактивного элемента в морских организмах и водной среде [Вернадский, 1965; Егоров, 2019].

Расчёт значений C_f для U и Th позволил дать характеристику уровня их накопления в раковинах моллюсков (см. табл. 1, 2). Выполненная оценка аккумулирующей способности моллюсков в отношении U и Th по C_f показала, во сколько раз концентрация вещества выше в раковинах моллюсков, чем в воде.

Линейная зависимость между накоплением U организмами и его концентрацией в воде соответствует известному положению, согласно которому C_f определяется видовой принадлежностью организмов и остаётся постоянным в широком диапазоне изменения содержания радионуклидов в воде, благодаря чему и происходит накопление U в организмах. Полученные C_f для урана и тория в целом согласуются с обобщёнными значениями, приведёнными для моллюсков в разных источниках (табл. 2), однако нами отмечены региональные особенности в аккумулирующей способности моллюсков в отношении U и Th (табл. 1). Результаты исследований показали различие в способности аккумулировать уран в 4 раза у представителей рода *Didacna* из одного биотопа Северного Каспия, которое можно объяснить специфичностью накопления радионуклидов даже на уровне видов. Установленные нами средние значения A_c для урана в раковинах *Didacna* и *Monodacna*, $29 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$, приближены к усреднённым величинам, составляющим $30 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$ [Тяжёлые естественные радионуклиды, 1990], и в 4,1 раза ниже ПДК для раковин моллюсков. Выявлено повышенное накопление U и Th в раковинах *D. protracta novocaspia* в районе Дербента — до уровней $(53,0 \pm 0,7)$ и $(11,0 \pm 0,09) \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$ соответственно при $C_f = 140$ и $C_f = 3857$.

Согласно нашим данным, C_f для ^{238}U в раковинах взрослых моллюсков составляет 77. Величина коэффициента приближена к усреднённому значению, равному 80, и в 1,4 раза выше значений для моллюсков с азербайджанского побережья Среднего Каспия [Оглоблин, 1975]. Также она в 2 раза выше усреднённых значений по морским моллюскам [Батулин, 1975] и в 1,3 раза ниже значений для озера Иссык-Куль, известного максимальным фоном и повышенным накоплением урана в биоте [Воротницкая, 1965] (см. табл. 2).

По нашим данным, моллюски накопили в 8 раз меньше тория, чем по сведениям К. Ф. Оглоблина [1975], — $5,3 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$ vs. $43,8 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$. Установленное нами значение в 8,5 раза ниже ПДК. C_f для ^{232}Th , составляющий 1870, в 1,9 раза выше усреднённой величины (табл. 2). У *D. protracta novocaspia* зарегистрирован самый высокий C_f для тория (табл. 1). Th аккумулируется интенсивней U, хотя в воде его концентрация ниже. Это связано с тем, что моллюски накапливают ^{232}Th через пищу, фильтруя из воды фитопланктон. Состав грунта не влияет на аккумуляцию тория в раковинах [Бигалиев, Кожахметова, 2020; Duong et al., 2023].

Концентрирующая способность живого вещества, как и сорбирующая способность косного, является одним из самых значимых факторов биогеохимического механизма самоочищения вод. Именно поэтому исследователи используют C_f не только при характеристике радиоэкологических процессов, но и при анализе интенсивности биогеохимических циклов загрязняющих веществ в морской среде [Егоров, 2019; Поликарпов, Егоров, 1986]. Моллюски демонстрируют повышенную способность аккумулировать Th, что указывает на их ключевую роль в процессах миграции и концентрации этого элемента. Биологической особенностью этих гидробионтов является активное накопление тория и, соответственно, повышенное (в 10 и 100 раз) содержание по сравнению с концентрацией Th в воде.

Концентрации естественных изотопов ^{238}U и ^{232}Th в раковинах моллюсков варьируют в широких пределах из-за различий в фоновых уровнях содержания этих радионуклидов в воде и грунте. Содержание природного урана в воде Мирового океана составляет $0,07 \text{ Бк}\cdot\text{кг}^{-1}$, коэффициент водной миграции урана — 3,1. Повышенная концентрация U выявлена во внутренних и замкнутых водоёмах, а также в регионах с дефицитом атмосферных осадков, например в Каспийском море (от 3×10^{-6} до $10 \times 10^{-6} \text{ г}\cdot\text{л}^{-1}$). A_c урана в воде Среднего Каспия — от 0,38 до $1,26 \text{ Бк}\cdot\text{кг}^{-1}$. В целом на содержание U в Каспийском море существенно влияет засушливый климат: при увеличении степени аридизации в Прикаспии происходит испарительное концентрирование урана в водоёмах [Батулин, 1975; Радиогидрогеологические исследования, 1988].

По [Adams et al., 1959], биогенные карбонатные породы содержат $(2,2 \pm 0,1) \times 10^{-4} \%$ ^{238}U и $(1,7 \pm 0,7) \times 10^{-4} \%$ ^{232}Th . Эти значения соответствуют нашими данным по моллюскам (см. табл. 1).

В табл. 3 приведены усреднённые величины A_c ^{238}U и ^{232}Th в разных средах с 1960-х гг. до наших дней.

Таблица 3. Удельная активность (A_c , $\text{Бк}\cdot\text{кг}^{-1}$) ^{238}U и ^{232}Th в воде и донных осадках, ПДК

Table 3. Activity concentration (A_c , $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$) of ^{238}U and ^{232}Th in water and bottom sediments, and MPC

Вода / донные осадки	A_c	
	^{238}U	^{232}Th
Вода Мирового океана ^{1,2}	0,07	2×10^{-5}
Морская вода ^{2,3}	0,40	2×10^{-5}
Вода Каспийского моря (1975 г.) ⁴	0,82	3×10^{-3}
Вода Каспийского моря казахстанского побережья (2012 г.) ⁵	5,70	3×10^{-3}
Вода Каспийского моря дагестанского побережья (2012–2016 гг.) ⁶	0,40	3×10^{-3}
ПДК в морской воде (по данным Всемирной организации здравоохранения) ⁷	3,80	0,56
Реки европейской части России ⁸	0,90	$2,2 \times 10^{-4}$
Реки Дагестана ⁸	< 2,4	< 0,05
Подземные воды европейской части России ⁸	60,0	0,90
Карбонаты ⁹	26,0	7,70
Биогенные карбонаты ¹⁰	27,7	6,9
Океанические донные осадки ^{1,2,3}	26,5	20,0
Морские донные осадки (1970–1982 гг.) ^{2,3}	24,0	5,6
Морские донные осадки (2010–2025 гг.) ^{2,9}	33,0	52,0
Донные органические осадки Среднего Каспия (1975 г.) ⁴	180,0	16,6
Донные осадки Среднего Каспия (2012 г.) ⁵	48,0	21,6
Органические осадки Каспийского моря (2012 г.) ⁵	116,0	44,5
Органические осадки Чёрного моря ⁴	97,8	–
Органические осадки Балтийского моря ⁴	151,0	–
ПДК в донных осадках	290,0	80,0

Примечание: ¹ — [Попов и др., 1979; Титаева, 1992; Bowen, 1979]; ² — [Порядок расчёта, 2019; Tatsumoto, Goldberg, 1959]; ³ — [Фесенко, Емлютина, 2020; Patel et al., 2023]; ⁴ — [Батулин, 1975]; ⁵ — [Доманов и др., 2012]; ⁶ — наши данные; ⁷ — [Canadian Water Quality, 2011]; ⁸ — [Бутаев и др., 2006]; ⁹ — [Тяжёлые естественные радионуклиды, 1990]; ¹⁰ — [Adams et al., 1959]; ¹¹ — [СанПиН 2.6.1.2523-09, 2009].

Note: ¹, [Popov et al., 1979; Titaeva, 1992; Bowen, 1979]; ², [Poryadok rascheta, 2019; Tatsumoto, Goldberg, 1959]; ³, [Fesenko, Emlutina, 2020; Patel et al., 2023]; ⁴, [Baturin, 1975]; ⁵, [Domanov et al., 2012]; ⁶, our data; ⁷, [Canadian Water Quality, 2011]; ⁸, [Butaev et al., 2006]; ⁹, [Tyazhelye estestvennye, 1990]; ¹⁰, [Adams et al., 1959]; ¹¹, [SanPiN 2.6.1.2523-09, 2009].

По данным ряда исследователей, в последние годы в донных отложениях океанов удельная активность ^{238}U составляла около $26,5 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$. Это связано со способностью урана концентрироваться в известковых раковинах морских организмов и, соответственно, со значительным его переносом на дно [Титаева, 1992; Фесенко, Емлютина, 2020; Patel et al., 2023; Sun et al., 2021]. Как следует из отчёта Организации Объединённых Наций по окружающей среде Caspian Environmental Programme, вода и донные осадки в Каспийском море «содержат уран в количестве, в 5–7 раз превышающем его концентрацию в других морях (на это указывал ещё Г. Н. Батурин [1975]. — Прим. авт.), в основном благодаря комплексной миграции природных радиоактивных нуклидов». Согласно современным данным, уровень радиоактивного фона донных осадков в районе казахстанского побережья Среднего Каспия превышает на некоторых станциях допустимый безопасный уровень дозовой нагрузки в 3–4 раза. Однако там эти величины в 100–300 раз меньше, чем в зонах активной нефтедобычи. Содержание U в осадках коррелирует с содержанием органических веществ. В Каспийском море концентрация урана колеблется в пределах от 300×10^{-7} до $600 \times 10^{-7} \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$, или от 3,8 до $7,6 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$ (табл. 3), в зависимости от места и глубины взятия проб [Доманов и др., 2012].

Отметим, что ПДК урана для морских вод в России не установлена. В настоящее время утверждены и введены в действие нормативы, оговаривающие ПДК токсикантов в водах водных объектов, но не разработаны нормативы для морских вод и донных отложений водоёмов [Карыгина, Попова, 2017]. Контрольный уровень содержания U в донных отложениях морских водных объектов, обеспечивающий радиационную и химическую безопасность водной биоты, рекомендуется принять равным $290 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$ [СанПиН 2.6.1.2523-09, 2009]. Для морских водных объектов контрольное содержание тория в донных отложениях установлено на уровне $80 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$ (см. табл. 3) [Тяжёлые естественные радионуклиды, 1990].

В морской воде содержится мало тория — $0,00002 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$. Из-за склонности к адсорбции на взвешенных частицах и коллоидах радионуклиды Th имеют ограниченную миграционную способность (коэффициент водной миграции тория составляет 0,07) и быстро осаждаются из водной толщи на дно. Th в морских осадках имеет главным образом биогенное происхождение. Его содержание в океанических осадках колеблется в пределах $0,7\text{--}64 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$, при этом наиболее вероятное значение — $20 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$ (табл. 3) [Титаева, 1992]. Основным путём накопления в моллюсках большинства радионуклидов, в том числе тория, является трофический. У представителей бентоса в условиях загрязнения удельная активность ^{232}Th составляет от 12 до $120 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$ [Бигалиев, Кожамметова, 2020; Синтюрина, Бигалиев, 2009; Patel et al., 2023].

Поступление урана в воды Мирового океана в результате добычи углеводородов вдвое превышает его поступление при выветривании пород [Егоров, 2019; Bowen, 1979]. Общая минерализация и содержание радиоизотопов вод глубоких горизонтов увеличиваются с глубиной перфорации при нефтедобыче [Айтеков, 2017; Газалиев и др., 2012]. Морские акватории и донные осадки вблизи буровых платформ являются районами потенциального накопления естественных радионуклидов. Так, радиоактивность осадков в местах нефтедобычи на шельфе Луизианы в 800 раз превышает фоновые значения [Доманов и др., 2012]. Для пластовых вод в зоне водно-нефтяного контакта характерна высокая концентрация ^{232}Th и низкая концентрация ^{238}U . В частности, в районе нефтегазовых месторождений Северного Каспия содержание ^{232}Th у пресноводных *Unio pictorum* составило $43 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$, а у *Dreissena polymorpha* — $45 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$ (при ПДК $45 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$, см. табл. 2) [Бигалиев, Кожамметова, 2020].

Из современных публикаций следует, что ^{232}Th сопутствует загрязнению окружающей среды в горнодобывающих зонах. Для тория примером значений, превышающих среднемировые [до $(103 \pm 5,2) \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$], служат удельные активности, выявленные в отложениях дельты Красной реки Северного Вьетнама, где вдоль её русла расположено множество горнодобывающих промышленных зон и магматических интрузивных образований, содержащих

радионуклиды [Duong et al., 2023; Patel et al., 2023; Sun et al., 2021]. В грунтовых водах радионуклиды могут накапливаться из-за реакции между водой и горными породами, а в пластовых водах — из-за загрязнения, связанного с добычей углеводородного сырья. Уран мигрирует в составе пластовых вод, но его содержание в них ниже, чем в гидротермальных водах.

В воды Каспия U и Th поступают из глубинных источников нефтегазоносных площадей, а также с гидротермальными растворами, вулканогенными продуктами и обломочным материалом горных пород в стоках рек (табл. 3) [Айтеков, 2017; Газалиев и др., 2012; Мацапулин и др., 2008]. Ещё одной причиной повышенного накопления урана в морской воде и, как следствие, в моллюсках может служить сейсмоактивность в акватории Каспия. Так, только с января 2000 г. по август 2025 г. в море произошли землетрясения магнитудой от 3,1 до 6,0, очаги которых залегали на глубине от 12 до 68 км. Землетрясения сопровождаются «приоткрыванием» разломно-трещинных систем и декомпенсацией, и резкий сброс под давлением способствует миграции ^{238}U . В процессе этого из глубинных источников высвобождаются гидротермальные воды, насыщенные различными элементами и солями радионуклидов.

Резюмируя сказанное, отметим: $C_f = 77$ для ^{238}U в раковинах моллюсков (в 1,4 раза выше, чем по данным исследований 1975 г.) связан, вероятно, с повышением сейсмоактивности в акватории Каспийского моря в последние годы. Такая гипотеза согласуется с положениями теории С. Г. Неручева [2007] относительно накопления урана: «...высокая сейсмическая активность и интенсивная вулканическая деятельность являются причиной повышенного накопления урана в воде и, как следствие этого, в биоте». Вынос U из глубинных источников фиксируется в местах проявления гидротермальной деятельности. В период сейсмоактивности из тектонических разломов со дна моря на поверхность выносятся с гидротермальными растворами естественные радиоизотопы (преимущественно ^{238}U). В то же время, судя по $C_f = 1870$ для ^{232}Th в раковинах моллюсков (в 8 раз ниже, чем по данным проведённых ранее исследований), привнос естественных изотопов тория с пластовыми водами при нефтедобыче в Каспийском море не столь существенен, как привнос естественных изотопов урана.

Таким образом, выявляемая в ходе мониторинговых исследований повышенная аккумуляция тория в раковинах моллюсков может служить индикатором влияния нефтедобычи на экосистему, а повышенное накопление урана может быть следствием сейсмоактивности вблизи разломов на определённых участках дна Каспийского моря. Результаты нашей работы и итоги анализа опубликованных рядом исследователей данных о накоплении ^{238}U и ^{232}Th показали, что аккумуляция этих естественных радионуклидов изменяется в широких пределах, что отражает их концентрации в окружающей среде. Необходимо изучение переноса урана и тория по пищевым цепям с учётом выявленных закономерностей при анализе последствий радиоактивного загрязнения морской воды. Очевидно, что для оценки экологической обстановки в Каспийском море требуется регулярный мониторинг уровня радионуклидов в разных видах гидробионтов.

Выводы. На аккумуляцию ^{238}U в раковинах двустворчатых моллюсков Каспийского моря влияет ряд биотических факторов. Первый фактор — видоспецифичность. Моллюски дагестанского побережья в возрасте 6–7 лет располагаются по значениям удельной активности (A_c) в раковинах в следующем порядке: *Didacna protracta novocaspia* > *D. protracta protracta* > *Monodacna caspia* > *D. trigonoides*. Моллюски Северного Каспия располагаются в следующем порядке: *D. protracta novocaspia* > *D. protracta protracta* > *D. protracta submedia*. Вторым биотическим фактором — наличие арагонитовой структуры раковин, образующей с ^{238}U устойчивые соединения. Третий — возраст: у молодых моллюсков аккумуляция урана вдвое выше, чем у взрослых особей, из-за интенсивного роста и большего содержания органических веществ. Установлена положительная корреляция концентрации урана с C_{org} и CaCO_3 . Выявлено, что отношение U/C_{org} для моллюсков составляет от 7×10^{-5} до 45×10^{-5} .

Определено, что для моллюсков Каспийского моря характерны следующие порядки величин коэффициента накопления (C_f): для ^{238}U — $n \times 10^1$, для ^{232}Th — $n \times 10^3$. При таких значениях изученные виды интенсифицируют биогенное накопление урана и тория из морской воды, что способствует самоочищению вод от радиоизотопов, а также их миграции по пищевой цепи. Зарегистрированы региональные особенности в аккумулирующей способности моллюсков дагестанского побережья Каспийского моря. В раковинах взрослых особей среднее значение C_f для ^{238}U составляет 77, для ^{232}Th — 1870. Выявлено повышенное накопление урана и тория в раковинах *D. protracta novocaspia* в районе Дербента. Полученные значения A_c для ^{238}U в раковинах близки к средним современным величинам. На аккумуляцию тория в моллюсках в большой степени влияет поступление его по пищевой цепи, а также содержание в грунте и выход пластовых вод при нефтедобыче.

Установлено, что A_c для ^{232}Th в раковинах моллюсков составляет $5,3 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$, а привнос естественных изотопов тория с пластовыми водами при нефтедобыче в Каспийском море не столь существенен. Эти значения ниже в 8 раз, чем величины, полученные ранее для побережья Азербайджана и для района нефтегазовых месторождений Северного Каспия.

Повышение содержания ^{238}U в воде обусловлено как климатическим влиянием (аридизацией, испарительным концентрированием урана в замкнутом водоёме, а также повышением сейсмоактивности с выходом урана с гидротермальными водами по тектоническим разломам на дне моря), так и антропогенным прессом (интенсификацией добычи углеводородов и активным развитием горнодобывающей промышленности, сопряжённым с загрязнением радиоизотопами). Эти факторы в комплексе могут быть причиной повышенной аккумуляции урана и тория в раковинах двустворчатых моллюсков. Полученные данные по C_f и содержанию ^{238}U и ^{232}Th в раковинах моллюсков можно использовать в экологическом мониторинге Каспийского региона.

Работа выполнена в рамках государственного задания Прикаспийского института биологических ресурсов ДФИЦ РАН «Структура популяций промысловых видов рыб и состояние их кормовой базы в прибрежной зоне дагестанского побережья Каспийского моря» (№ гос. регистрации 122032200284-2).

Благодарность. Авторы выражают искреннюю благодарность академику РАЕН, д. г. н. А. Л. Чепалыге за предоставленные коллекции моллюсков Северного Каспия и главному редактору журнала «Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле» А. К. Худoley — за ценные замечания при подготовке работы к публикации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Айतेков М.-П. Б. Об условиях сохранения экологического равновесия на газонефтяных месторождениях // *Аридные экосистемы*. 2017. Т. 23, № 2 (71). С. 42–46. [Aytekov M.-P. B. On the conditions of maintaining the ecological balance on gas and oil fields. *Aridnye ekosistemy*, 2017, vol. 23, no. 2 (71), pp. 42–46. (in Russ.)]. <https://elibrary.ru/yrnqnv>
2. Аринушкина Е. В. *Руководство по химическому анализу почв* : 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Изд-во Московского университета, 1970. 487 с. [Arinushkina E. V. *Rukovodstvo po khimicheskomy analizu pochv* : 2-e izd., pererab. i dop. Moscow : Izd-vo Moskovskoko universiteta, 1970, 487 p. (in Russ.)]
3. Батурин Г. Н. *Уран в современном морском осадкообразовании*. Москва : Атомиздат, 1975. 152 с. [Baturin G. N. *Uran v sovremennom morskoy osadkoobrazovanii*. Moscow : Atomizdat, 1975, 152 p. (in Russ.)]
4. Бигалиев А. Б., Кожакметова А. Н. Загрязнение нефтью и сопутствующими тяжёлыми металлами, радионуклидами и накопление в организме гидробионтов казахстанской зоны Каспия // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2020. Т. 331, № 12. С. 60–66. [Bigaliev A. B., Kozhakhmetova A. N. Oil pollution and associated heavy metals, radionuclides in the body of hydrobionts of the Kazakhstan zone of the Caspian Sea. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2020,

- vol. 331, no. 12, pp. 60–66. (in Russ.)). <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/12/2939>
5. Бутаев А. М., Абдулаева А. С., Гурьев М. А. Радиоактивность природных вод и искусственные радионуклиды в объектах биосферы Дагестана // *Вестник Дагестанского научного центра РАН*. 2006. № 24. С. 62–69. [Butaev A. M., Abdulaeva A. S., Guruev M. A. Radioaktivnost' prirodnikh vod i iskusstvennye radionuklidy v ob"ektakh biosfery Dagestana. *Vestnik Dagestanskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2006, no. 24, pp. 62–69. (in Russ.)]. <https://elibrary.ru/shjatl>
 6. Вернадский В. И. *Химическое строение биосферы Земли и её окружения*. Москва : Наука, 1965. 374 с. [Vernadsky V. I. *Khimicheskoe stroenie biosfery Zemli i ee okruzheniya*. Moscow : Nauka, 1965, 374 p. (in Russ.)]
 7. Воротницкая И. Е. *Биогенная миграция урана в озере Иссык-Куль* : автореф. дис. ... канд. биол. наук / Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова. Москва, 1965. 17 с. [Vorotnitskaya I. E. *Biogennaya migratsiya urana v ozere Issyk-Kul'* : avtoref. dis. ... kand. biol. nauk / Moskovskii gosudarstvennyi universitet imeni M. V. Lomonosova. Moscow, 1965, 17 p. (in Russ.)]
 8. Газалиев И. М., Идрисов И. А., Бабаев М. Р., Ахмедов А. М. Естественная радиоактивная аномалия нефтегазоносной площади Дузлак (Дагестан) // *Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа* : материалы II Всероссийской конференции, 08–10 ноября 2012 г., Грозный. Грозный : Академия наук Чеченской Республики, 2012. С. 299–301. [Gazaliev I. M., Idrisov I. A., Babaev M. R., Akhmedov A. M. Estestvennaya radioaktivnaya anomalija neftegazonosnoi ploshchadi Duzlak (Dagestan). In: *Sovremennye problemy geologii, geofiziki i geoekologii Severnogo Kavkaza* : materialy II Vserossiiskoi konferentsii, 08–10 noyabrya 2012 g., Grozny. Grozny : Akademiya nauk Chechenskoï Respubliki, 2012, pp. 299–301. (in Russ.)]
 9. Доманов М. М., Доманова Е. Г., Верховская З. И. Радиоэкологические аспекты освоения морских нефтеносных регионов (нежелательные спутники прогресса) : [презентация] // *Международный форум «Каспийский диалог – 2012»*, 2-е заседание, Москва, 26–27 апреля 2012 г. [Москва, 2012]. [Domanov M. M., Domanova E. G., Verkhovskaya Z. I. Radioekologicheskie aspekty osvoeniya morskikh neftenosnykh regionov (nezhelatel'nye sputniki progressa) : [presentation]. In: *Mezhdunarodnyi forum "Kaspiiskii dialog – 2012"*, 2-e zasedanie, Moskva, 26–27 aprelya 2012 g. [Moscow, 2012]. (in Russ.)]. URL: http://www.caspiansovet.ru/Prezentacii/energiya_kaspiya_energiya_mira_1_zasedanie/vtoroe_zasedanie.php [accessed: 10.02.2025].
 10. Егоров В. Н. *Теория радиоизотопного и химического гомеостаза морских экосистем*. Севастополь : ФИЦ ИнБЮМ, 2019. 356 с. [Egorov V. N. *Theory of Radioisotope and Chemical Homeostasis of Marine Ecosystems*. Sevastopol : IBSS, 2019, 356 p. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.21072/978-5-6042938-5-0>
 11. Золотарёв В. Н. *Склерохронология морских двустворчатых моллюсков* / АН УССР, Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского. Киев : Наукова думка, 1989. 112 с. [Zolotarev V. N. *Sklerokhronologiya morskikh dvustvorchatykh mollyuskov* / AN USSR, Institut biologii yuzhnykh morei imeni A. O. Kovalevskogo. Kyiv : Naukova dumka, 1989, 112 p. (in Russ.)]
 12. Карыгина Н. В., Попова О. В. Средние характерные концентрации токсикантов в донных отложениях дельты Волги и Северного Каспия // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство*. 2017. № 4. С. 29–36. [Karygina N. V., Popova O. V. Average characteristic concentrations of toxicants in bottom sediments of the Volga delta and northern part of the Caspian Sea. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Rybnoe khozyaistvo*, 2017, no. 4, pp. 29–36. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2017-4-29-36>
 13. Кузнецов Ю. В. *Радиохронология океана*. Москва : Атомиздат, 1976. 280 с. [Kuznetsov Yu. V. *Radiokhronologiya okeana*. Moscow : Atomizdat, 1976, 280 p. (in Russ.)]
 14. Логвиненко Б. М., Старобогатов Я. И. Тип Моллюски. Mollusca // *Атлас беспозвоночных Каспийского моря*. Москва : Пищевая промышленность, 1968. С. 308–385. [Logvinenko B. M., Starobogatov Ya. I. Tip Mollyuski. Mollusca. In: *Atlas bespozvonochnykh Kaspiiskogo morya*. Moscow : Pishchevaya promyshlennost', 1968,

- pp. 308–385. (in Russ.)). <https://elibrary.ru/ypvidj>
15. Мацапулин В. У., Юсупов А. Р., Черкашин В. И. Позднекайнозойский вулканизм северной окраины орогена Восточного Кавказа (Дагестан) // *Вестник Дагестанского научного центра РАН*. 2008. № 32. С. 12–20. [Matsapulin V. U., Yusupov A. R., Cherkashin V. I. Late-Cainozoic volcanism in the north area of Eastern Caucasus orogen (Daghestan). *Vestnik Dagestanskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2008, no. 32, pp. 12–20. (in Russ.)). <https://elibrary.ru/ktzsnt>
 16. Неручев С. Г. *Уран и жизнь в истории Земли*. 2-е изд., испр. и доп. Санкт-Петербург : ВНИГРИ, 2007. 326 с. [Neruchev S. G. *Uran i zhizn' v istorii Zemli*. 2-e izd., ispr. i dop. Saint Petersburg : VNIGRI, 2007, 326 p. (in Russ.)]
 17. Оглоблин К. Ф. *Закономерности и распространение урана и тория в раковинах современных и ископаемых моллюсков* : автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук : 04.00.09 / Константин Фёдорович Оглоблин ; Азербайджанский университет имени С. М. Кирова. Баку, 1975. 26 с. [Ogloblin K. F. *Zakonomernosti i rasprostranenie urana i toriya v rakovinakh sovremennykh i iskopaemykh mollyuskov* : avtoref. dis. ... kand. geol.-min. nauk : 04.00.09 / Konstantin Fedorovich Ogloblin ; Azerbaidzhanskii universitet imeni S. M. Kirova. Baku, 1975, 26 p. (in Russ.)]
 18. Оглоблин К. Ф., Халифа-заде Ч. М. Распространение урана в раковинах современных и ископаемых моллюсков // *Геохимия*. 1974. № 2. С. 315–320. [Ogloblin K. F., Khalifa-zade Ch. M. *Rasprostranenie urana v rakovinakh sovremennykh i iskopaemykh mollyuskov*. *Geokhimiya*, 1974, no. 2, pp. 315–320. (in Russ.)]
 19. Паньков И. В. Накопление долгоживущих радионуклидов моллюсками рода *Dreissena* в условиях днепровских водохранилищ // *Гидробиологический журнал*. 1994. Т. 30, № 2. С. 93–96. [Pan'kov I. V. Accumulation of long-living radionuclides in molluscs of genus *Dreissena* in conditions of Dnieprovian water reservoirs. *Gidrobiologicheskii zhurnal*, 1994, vol. 30, no. 2, pp. 93–96. (in Russ.)]
 20. Поликарпов Г. Г., Егоров В. Н. *Морская динамическая радиохимическая экология*. Москва : Энергоатомиздат, 1986. 176 с. [Polikarpov G. G., Egorov V. N. *Morskaya dinamicheskaya radiokhemoekologiya*. Moscow : Energoatomizdat, 1986, 176 p. (in Russ.)]. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/7683>
 21. Попов Д. К., Поникарова Т. М. *Методические рекомендации по определению валового урана и тория в породах, почвах и золе растений*. Ленинград : Институт радиационной гигиены и санитарии, 1981. 15 с. [Popov D. K., Ponikarova T. M. *Metodicheskie rekomendatsii po opredeleniyu valovogo urana i toriya v porodakh, pochvakh i zole rastenii*. Leningrad : Institut radiatsionnoi gigieny i sanitarii, 1981, 15 p. (in Russ.)]
 22. Попов Н. И., Фёдоров К. Н., Орлов В. М. *Морская вода : справочное руководство : (состав, термические характеристики, химические равновесия, физические свойства)* / под ред. А. С. Мони́на. Москва : Наука, 1979. 327 с. [Popov N. I., Fedorov K. N., Orlov V. M. *Morskaya voda : spravochnoe rukovodstvo : (sostav, termicheskie kharakteristiki, khimicheskie ravnovesiya, fizicheskie svoistva)* / A. S. Monin (Ed.). Moscow : Nauka, 1979, 327 p. (in Russ.)]
 23. Попов С. В. *Микроструктура раковин и систематика кардиид*. Москва : Наука, 1977. 124 с. (Труды Палеонтологического института ; т. 153). [Popov S. V. *The Shell Structure and System of the Cardiids*. Moscow : Nauka, 1977, 124 p. (Trudy Paleontologicheskogo instituta ; vol. 153). (in Russ.)]
 24. *Порядок расчёта контрольных уровней содержания радионуклидов в донных отложениях морских водных объектов : рекомендации* Р 52.18.873-2018 / Росгидромет. Обнинск : ФГБУ «НПО «Тайфун», 2019. 29 с. [Poryadok rascheta kontrol'nykh urovnei soderzhaniya radionuklidov v donnykh otlozheniyakh morskikh vodnykh ob"ektov : rekomendatsii R 52.18.873-2018 / Rosgidromet. Obninsk : FGBU "NPO "Taifun", 2019, 29 p. (in Russ.)]
 25. *Радиогидрогеологические исследования при прогнозировании и поисках урановых месторождений, связанных с зонами пластового окисления* / Е. В. Анкудинов, А. Г. Арье, А. М. Боголюбов и др. Ленинград : Недра, 1988. 168 с. [Radiogidrogeologicheskie issledovaniya pri prognozirovanii i poiskakh uranovykh mestorozhdenii, svyazannykh s zonami plastovogo okisleniya / E. V. Ankudinov, A. G. Ar'e, A. M. Bogolyubov, et al. Leningrad : Nedra, 1988, 168 p. (in Russ.)]
 26. СанПиН 2.6.1.2523-09. *Нормы радиационной*

- безопасности (НРБ-99/2009). Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 07.09.2009 № 47. Нормативный документ. Москва, 2009. [SanPiN 2.6.1.2523-09. *Normy radiatsionnoi bezopasnosti* (NRB-99/2009). Utverzhdeny postanovleniem Glavnogo gosudarstvennogo vracha RF ot 07.09.2009 no. 47. Normativnyi dokument. Moscow, 2009. (in Russ.)]
27. Синтюрина А. В., Бигалиев А. Б. Особенности аккумуляции радионуклидов гидробионтами и обитателями прибрежной зоны Северо-Каспийского региона // *Вестник Казахского национального университета. Серия экологическая*. 2009. Т. 24, № 1. С. 97–101. [Sintyurina A. V., Bigaliev A. B. Osobennosti akkumulyatsii radionuklidov gidrobiontami i obitatel'nyami pri-brezhnoi zony Severo-Kaspiiskogo regiona. *Vestnik Kazakhskogo natsional'nogo universiteta. Seriya ekologicheskaya*, 2009, vol. 24, no. 1, pp. 97–101. (in Russ.)]
28. Титаева Н. А. *Ядерная геохимия*. Москва : Изд-во МГУ, 1992. 272 с. [Titaeva N. A. *Yadernaya geokhimiya*. Moscow : Izd-vo MGU, 1992, 272 p. (in Russ.)]
29. *Тяжёлые естественные радионуклиды в биосфере: миграция и биологическое действие на популяции и биогеоценозы* / Р. М. Алексахин, Н. П. Архипов, Р. М. Бархударов и др. ; под ред. Р. М. Алексахина ; АН СССР. Коми научный центр Уральского отделения. Москва : Наука, 1990. 368 с. [Tyazhelye estestvennye radionuklidy v biosfere: migratsiya i biologicheskoe deistvie na populyatsii i biogeotsenozy / R. M. Aleksakhin, N. P. Arkhipov, R. M. Barkhudarov, et al. ; R. M. Aleksakhin (Ed.) ; AN SSSR, Komi nauchnyi tsentr Ural'skogo otdeleniya. Moscow : Nauka, 1990, 368 p. (in Russ.)]
30. Фесенко С. В., Емлютина Е. С. Концентрация тория в природных средах: обзор мировых данных // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2020. Т. 60, № 6. С. 647–660. [Fesenko S. V., Emlutina E. S. Thorium concentrations in the environment: A review of the world data. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya*, 2020, vol. 60, no. 6, pp. 647–660. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.31857/s0869803120050033>
31. Adams J. A. S., Osmond J. K., Rogers J. J. W. The geochemistry of thorium and uranium. *Physics and Chemistry of the Earth*, 1959, vol. 3, pp. 298–348. [https://doi.org/10.1016/0079-1946\(59\)90008-4](https://doi.org/10.1016/0079-1946(59)90008-4)
32. Almazán Torres M. G., Almazán Martínez M. S., Ordoñez Regil E., Ramírez Villalva A. Bioaccumulation of ^{238}U and $^{239+240}\text{Pu}$ in bivalve mollusks from different coastal areas of Mexico. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2025, vol. 334, iss. 2, pp. 1649–1659. <https://doi.org/10.1007/s10967-024-09922-8>
33. Blanchard R. L., Cheng M. H., Potratz H. A. Uranium and thorium series disequilibria in recent and fossil marine molluscan shells. *Journal of Geophysical Research*, 1967, vol. 72, iss. 18, pp. 4745–4757. <https://doi.org/10.1029/jz072i018p04745>
34. Bowen H. J. M. *Environmental Chemistry of the Elements*. London ; New York : Academic Press, 1979, 333 p.
35. *Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life. Uranium*. [Winnipeg] : Canadian Council of Ministers of the Environment, 2011, 9 p.
36. Duong V.-H., Duong D.-T., Bui L. V., Kim T. T., Bui H. M., Tran T. D., Phan T. T., Nguyen T.-D. Radiological hazard assessment of high-level natural radionuclides in surface sediments along Red River, Vietnam. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2023, vol. 85, iss. 3, pp. 302–313. <https://doi.org/10.1007/s00244-023-01003-3>
37. Koide M., Lee D. S., Goldberg E. D. Metal and transuranic records in mussel shells, byssal threads and tissues. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1982, vol. 15, iss. 6, pp. 679–695. [https://doi.org/10.1016/0272-7714\(82\)90079-8](https://doi.org/10.1016/0272-7714(82)90079-8)
38. Patel K. S., Sharma S., Maity J. P., Martín-Ramos P., Fiket Ž., Bhattacharya P., Zhu Y. Occurrence of uranium, thorium and rare earth elements in the environment: A review. *Frontiers in Environmental Science*, 2023, vol. 10, art. 1058053 (18 p.). <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1058053>
39. Salikhov S., Asvarova T., Gasanov G., Abdulayeva A., Hajiyev K., Bashirov R., Akhmedova Z., Gimbatova K., Aytemirov A., Magomedov N., Musaev M. Rate of migration of natural radionuclides in soil-plant cover of the North-Western Precaspian region. *Ponte*, 2017, vol. 73, iss. 6, pp. 75–90. <https://doi.org/10.21506/j.ponte.2017.6.5>
40. Sun J., Men W., Wang F., Wu J. Activity

- levels of ^{210}Po , ^{210}Pb and other radionuclides (^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{238}U , ^{226}Ra and ^{40}K) in marine organisms from coastal waters adjacent to Fuqing and Ningde nuclear power plants (China) and radiation dose assessment. *Frontiers in Marine Science. Section Marine Biogeochemistry*, 2021, vol. 8, art. 702124 (11 p.). <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.702124>
41. Tan K., Cai X., Tan K., Kwan K. Y. A review of natural and anthropogenic radionuclide pollution in marine bivalves. *Science of The Total Environment*, 2023, vol. 896, art. 165030 (13 p.). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165030>
42. Tatsumoto M., Goldberg F. Same aspect of the marine geochemistry of uranium. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1959, vol. 17, iss. 3–4, pp. 201–208. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(59\)90094-8](https://doi.org/10.1016/0016-7037(59)90094-8)

NATURAL RADIONUCLIDES ^{238}U AND ^{232}Th IN MOLLUSC SHELLS IN THE CASPIAN SEA

M. Khlopkova¹, N. Rabazanov^{1,2}, and T. Asvarova¹

¹Precaspian Institute of Biological Resources of the Dagestan Federal Research Centre of RAS, Makhachkala, Russian Federation

²Dagestan State University, Makhachkala, Russian Federation

E-mail: hlopkovam@mail.ru

The accumulation of radionuclides by Caspian molluscs under conditions of natural and anthropogenic-associated environmental dynamics was analyzed. The aim of the work was to study the features of ^{238}U and ^{232}Th concentration, and to assess the accumulation ability of Cardiidae bivalves in the Middle and Northern Caspian by determining the concentration factor (C_f). Sampling covered the period 2012 to 2016. The content of uranium and thorium in shells was assessed by the radiochemical method spectrophotometrically with arsenazo III on Spekol spectrophotometer (^{238}U , at $\lambda = 670$ nm; ^{232}Th , at $\lambda = 665$ nm), with sequential chromatographic separation of U and Th from a solution using EDE-10P anion-exchange resin. We revealed a positive correlation of uranium with C_{org} and CaCO_3 . For Caspian bivalves, values of the ratio U/C_{org} were found to range from 7×10^{-5} to 45×10^{-5} . As shown, ^{238}U accumulation in shells during the growth of molluscs is affected by biotic factors. The first one is species specificity. Thus, molluscs of the Dagestan coast aged 6–7 years are arranged according to the activity concentration (A_c) of ^{238}U in their shells in a decreasing series as follows: *Didacna protracta novocaspia* > *D. protracta protracta* > *Monodacna caspia* > *D. trigonoides* (53.0, 45.4, 34.0, and 8.82 Bq·kg⁻¹, respectively). Molluscs of the Northern Caspian Sea are arranged as follows: *D. protracta novocaspia* > *D. protracta protracta* > *D. protracta submedia* (31.5, 22.3, and 7.56 Bq·kg⁻¹). The second biotic factor is age: in juveniles, uranium accumulation is 2 times higher than in adult molluscs. The third factor is the presence of an aragonite shell structure. Also, we registered an indirect effect of abiotic factors: the release of hydrothermal waters along tectonic faults at the bottom of the Caspian Sea, with increased seismic activity. In general, a rise in natural radionuclides in the Caspian Sea is a consequence of the aridization. Thorium accumulation in mollusc shells is strongly affected by its occurrence in sediments and the release of formation waters during oil production. As revealed, Caspian bivalves are characterized by C_f values of the order of magnitude as follows: $n \times 10^1$ for ^{238}U and $n \times 10^3$ for ^{232}Th . At such levels, hydrobionts intensify the biogenic accumulation of uranium and thorium from seawater, and this contributes to the self-purification of the Caspian Sea waters from radioisotopes. Regional peculiarities in the accumulation ability of Caspian molluscs were revealed. Thus, in shells of adult individuals, the mean values of C_f were 77 for ^{238}U and 1,870 for ^{232}Th . In the Derbent area, increased accumulation of natural radionuclides was noted in *D. protracta novocaspia* shells: up to (53.0 ± 0.7) Bq·kg⁻¹ for ^{238}U with $C_f = 140$, and up to (11.0 ± 0.09) Bq·kg⁻¹ for ^{232}Th with $C_f = 3,857$. The obtained A_c value for ^{238}U (29 Bq·kg⁻¹ in *Didacna* and *Monodacna* shells) is close to the mean current values. C_f of uranium in shells is 1.4 times higher than the values recorded in 1975. In the shells of Caspian molluscs, the calculated A_c for ^{232}Th was 5.3 Bq·kg⁻¹; the value was 8 times lower than that registered on the coast of Azerbaijan (in the area of the oil and gas fields of the Northern Caspian Sea), the mean current value, and the maximum permissible concentration of thorium.

Keywords: bivalves, shells, natural radionuclides, ^{238}U , ^{232}Th , accumulation, Caspian Sea