

УДК 613.2.099:613.281:615.917'2/'9
https://doi.org/10.17816/MAJ34285

ПИЩЕВАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ДВУСТВОРЧАТЫХ МОЛЛЮСКОВ ЮЖНОГО ВЬЕТНАМА: ХЛОРООРГАНИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ И ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ КАК ФАКТОРЫ РИСКА ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ ЧЕЛОВЕКА

М.М. Донец¹, В.Ю. Цыганков¹, В.И. Кульшова¹, Ж. Элхури¹, М.Д. Боярова¹, А.Н. Гумовский¹, Ю.П. Гумовская¹, В.В. Богатов², Л.А. Прозорова², Е.Н. Чернова^{1,3}, Е.В. Лысенко³, К.К. Нго⁴

¹ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный федеральный университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Владивосток;

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии» Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток;

³ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Тихоокеанский институт географии» Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток;

⁴ Вьетнамская академия науки и технологии, Хошимин, Вьетнам

Для цитирования: Донец М.М., Цыганков В.Ю., Кульшова В.И., и др. Пищевая безопасность двустворчатых моллюсков Южного Вьетнама: хлороорганические соединения и тяжелые металлы как факторы риска для здоровья человека // Медицинский академический журнал. – 2020. – Т. 20. – № 2. – С. 45–58. <https://doi.org/10.17816/MAJ34285>

Поступила: 03.04.2020

Одобрена: 14.05.2020

Принята: 08.06.2020

Цель работы — исследование аккумуляции хлороорганических пестицидов, полихлорированных бифенилов и тяжелых металлов в мягких тканях промысловых двустворчатых моллюсков из континентальных водоемов Южного Вьетнама и оценка рисков для здоровья населения.

Материалы и методы. Проанализировано содержание хлороорганических пестицидов, полихлорированных бифенилов и тяжелых металлов у представителей четырех родов двустворчатых моллюсков из дельты реки Меконг — *Corbicula* sp., *Geloina* sp., *Ensidens* sp., *Scabies* sp. Органические поллютанты определяли с помощью газовой хромато-масс-спектрометрии, тяжелые металлы — атомно-абсорбционным методом в пламенном и беспламенном атомизаторах. Риски для здоровья оценивали путем расчета коэффициентов опасности (HQ) и потенциального риска развития рака (ILCR) в течение жизни.

Результаты. Для минимизации риска отравления максимальные уровни потребления *Corbicula* sp., *Geloina* sp., *Ensidens* sp. и *Scabies* sp. составили 83, 15, 1 и 6 шт/день соответственно. Риск развития онкологических заболеваний повышался при потреблении *Corbicula* sp., *Ensidens* sp. и *Geloina* sp. в количестве 2–12 шт/день.

Заключение. Определены максимальные уровни потребления четырех родов моллюсков, при которых отсутствует риск для здоровья населения Южного Вьетнама. Все рассчитанные риски ассоциированы с α -гексахлорциклогексаном, полихлорированными бифенилами, Mn и Fe. Оценка безопасности местных продуктов питания (в особенности — нетрадиционных для туристов) представляет актуальную задачу для обеспечения безопасности жизни и здоровья граждан России за рубежом.

Ключевые слова: тяжелые металлы; хлороорганические пестициды (ХОП); полихлорированные бифенилы (ПХБ); экологические риски; моллюски; Южный Вьетнам; дельта реки Меконг.

FOOD SAFETY OF BIVALVES FROM THE SOUTH VIETNAM: ORGANOCHLORINE COMPOUNDS AND HEAVY METALS AS RISK FACTORS FOR HUMAN HEALTH

M.M. Donets¹, V.Yu. Tsygankov¹, V.I. Kulshova¹, J. Elkhouri¹, M.D. Boyarova¹, A.N. Gumovskiy¹, Yu.P. Gumovskaya¹, V.V. Bogatov², L.A. Prozorova², E.N. Chernova^{1,3}, E.V. Lysenko³, X.Q. Ngo⁴

¹ Far Eastern Federal University, Vladivostok;

² Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity FEB RAS, Vladivostok;

³ Pacific Geographical Institute FEB RAS, Vladivostok;

⁴ Vietnam Academy of Science and Technology, Ho Chi Minh, Vietnam

For citation: Donets MM, Tsygankov VYu, Kulshova VI, et al. Food safety of bivalves from the South Vietnam: organochlorine compounds and heavy metals as risk factors for human health. *Medical Academic Journal*. 2020;20(2):45-58. <https://doi.org/10.17816/MAJ34285>

Received: April 3, 2020

Revised: May 14, 2020

Accepted: June 8, 2020

Список сокращений

ГХЦГ — гексахлорциклогексан; ДДД — дихлордифенилдихлорэтан; ДДЕ — дихлордифенилдихлорэтилен; ДДТ — дихлордифенилтрихлорэтан; ПХБ — полихлорированные бифенилы; СОЗ — стойкие органические загрязняющие вещества; ТМ — тяжелые металлы; ХОП — хлороорганические пестициды; ХОС — хлороорганические соединения; HQ (от англ. hazard quotient) — коэффициент опасности; ILCR (от англ. Incremental life-time cancer risk) — потенциальный риск развития рака в течение жизни.

The aim of the work is to study the accumulation of organochlorine pesticides, polychlorinated biphenyls and heavy metals in the soft tissues of commercial bivalves from continental reservoirs of the south Vietnam and to assess health risks for population.

Materials and methods. Four genera of bivalves from the Mekong Delta — *Corbicula sp.*, *Geloina sp.*, *Ensidens sp.*, *Scabies sp.* — were studied. Organic pollutants were determined by gas chromatography-mass spectrometry, heavy metals — by atomic absorption in flame and flameless atomizers. Health risks were assessed by determining the hazard quotient (HQ) and the incremental lifetime cancer risk (ILCR).

Results. To minimize the risk of poisoning when consuming *Corbicula sp.*, *Geloina sp.*, *Ensidens sp.* and *Scabies sp.* maximum consumption levels should be 83, 15, 1 and 6 pcs/day, respectively. The risk of developing cancer can be increased with the consumption of *Corbicula sp.*, *Ensidens sp.* and *Geloina sp.* in an amount of 2–12 pcs/day.

Conclusion. The maximum consumption levels of four bivalves genera were determined, at which there is no health risks for the population of South Vietnam. All risks are associated with α -HCH, PCBs, Mn and Fe. Safety assessment of local food (in particular, not traditional for tourists) is an urgent task to ensure the safety of life and health of Russian citizens abroad.

Keywords: heavy metals; OCPs; PCBs; environmental health risk assessment; mollusks; non-marine clams; Vietnam; Mekong Delta.

Введение

Тяжелые металлы (ТМ) и стойкие органические загрязняющие вещества (СОЗ) широко распространены в окружающей среде. Устойчивые к биодegradации, способные к биоаккумуляции и биомagnификации, эти соединения обладают высокой токсичностью и могут отрицательно влиять на репродуктивную, нервную и иммунную системы человека и приводить к онкологическим заболеваниям. Эти поллютанты встречаются повсеместно в окружающей среде, включая промысловые морские организмы [1]. На сегодняшний день СОЗ и ТМ считают суперэкоотоксикантами, которые могут представлять риск для здоровья человека [2].

Вьетнам — аграрно развитая страна, где с 1960-х годов широко применялись хлорорганические пестициды (ХОП) (ДДТ, гексахлорбензол, полихлоркамфен и др.) для защиты людей от переносчиков малярии, а сельскохозяйственной продукции — от вредителей [3]. С 1995 г. в стране запрещено использование этих соединений, в 2002 г. ратифицирована Стокгольмская конвенция, призывающая к выведению из оборота СОЗ. Однако, несмотря на запрет, эти ксенобиотики обнаруживают на территории Вьетнама, а в отдельных его районах их концентрации увеличиваются [4]. Кроме того, значительную роль в загрязнении СОЗ сыграл военный конфликт США с Вьетнамом конца XX в. В результате военных действий Америка применила около 90 тыс. т опасных химикатов, состоящих из дефолиантов и пестицидов. Кроме действующих веществ эти смеси содержали примеси диоксинов — наиболее токсичных представителей СОЗ [5, 6]. По данным Г.А. Софронова и соавт., обработке дефолиантами подверглось около 10 % территории Южного Вьетнама [7]. Тяжелые металлы в континентальных водных экосистемах Южного Вьетнама отражают

биогеохимические условия среды и указывают на невысокий уровень загрязнения металлами водных систем [8–10].

Помимо сельского хозяйства, на территории страны широко развита аквакультура, благодаря чему Вьетнам является одним из крупнейших экспортеров морепродуктов в мире [11]. Значительную долю рациона местного населения занимают продукты морского промысла, в частности моллюски [12]. Несмотря на изменение местной политики безопасности пищевых продуктов (1990), уровни ксенобиотиков в тканях морских организмов остаются высокими и могут влиять на здоровье людей [14].

Цель работы — исследование аккумуляции ХОП, полихлорированных бифенилов (ПХБ) и ТМ в мягких тканях промысловых двустворчатых моллюсков Южного Вьетнама и оценка экологических рисков для здоровья населения.

Материалы и методы

Моллюсков отбирали с апреля 2017 по март 2018 г. на центральных рынках крупных городов Южного Вьетнама (Ханой, Хошимин, Лонгсюен) и в популярных местах самостоятельного лова (оз. Биньтен, оз. Батай, р. Тьен, р. Балай). После отбора моллюсков выдерживали в воде с места сбора в течение 24 ч для очистки пищеварительной системы, разделяли по размерно-возрастным группам. Для анализа ХОП и ПХБ моллюсков замораживали при -20°C , для определения ТМ — высушивали при температуре 85°C до постоянной массы и транспортировали в лабораторию.

Хлорорганические соединения. Органические поллютанты выделяли в лаборатории экобиотехнологии Школы биомедицины ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет». Стойкие органические загрязняющие вещества

экстрагировали из гомогенатов мягких тканей индивидуальных особей, используя смесь *n*-гексана и ацетона, с последующим разрушением примесей концентрированной серной кислотой [15]. Затем разделяли полученный экстракт неполярными (для ПХБ) и полярными (для ХОП) растворителями на хроматографической колонке с сорбентом Florisil®. Для приготовления стандартных растворов ХОП и ПХБ использовали стандартные образцы (LGC Standards и AccuStandard) α -гексахлорциклогексан (α -ГХЦГ), β -ГХЦГ, γ -ГХЦГ, 4,4'-ДДТ, 2,4'-ДДТ, 4,4'-ДДД, 2,4'-ДДД, 4,4'-ДДЕ, 2,4'-ДДЕ и смесь конгенов ПХБ 28, 52, 155, 101, 118, 143, 153, 138, 180, 207 с установленными метрологическими характеристиками. Массовое содержание хлорорганических соединений в биоматериале определяли с помощью газового хромато-масс-спектрометра Shimadzu GC MS-QP 2010 Ultra (Япония), оснащенного автодозатором АОС-5000. Площади пиков измеряли в программе GCMS Postrun Analysis (Япония) [13].

Тяжелые металлы. Навески абсолютно сухих образцов минерализовали азотной кислотой (марки ОСЧ) в микроволновой печи MARS 5 (SEM Corporation, США). Концентрацию металлов определяли атомно-абсорбционным методом, используя прибор Shimadzu AA 6800 (Япония) в пламенном (Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Cd) и беспламенном (Pb) атомизаторах в ЦКП «Центр ландшафтной экодиагностики и ГИС-технологий» ФГБУН «Тихоокеанский институт географии» ДВО РАН. Точность измерения концентрации металлов контролировали с помощью анализа стандартных образцов (3–15 %), загрязнение реактивов — с помощью холостых проб. Концентрацию металлов в мкг/г сухой массы с помощью переводного коэффициента 5 выражали в мг/кг сырой массы [16].

С целью оценки *экологического риска для здоровья населения* от употребления моллюсков, загрязненных ХОП, ПХБ и ТМ, рассчитывали коэффициенты опасности (*HQ*) и потенциального риска развития рака в течение жизни (*ILCR*). *HQ* показывает возможность возникновения острого отравления в течение года, *ILCR* указывает на увеличение вероятности развития онкологических заболеваний от поступления поллютантов в организм человека в течение всей жизни. Для расчета применяли международные стандартные методики [17, 18].

Риск оценивали без учета поступления ТМ, ХОП и ПХБ через другие источники (вода, воздух, контакт с кожей), поскольку до 90 % поллютантов поступает в организм человека с пищей.

HQ рассчитывали по формуле [19]

$$HQ = \frac{EDI}{TDI},$$

где *EDI* — среднее употребление токсиканта с пищей, мг/кг в день; *TDI* — количество токсичного вещества (данные из [17, 18]), не вызывающее отравления у человека, мг/кг в день. При значении *HQ* > 0,2 существует потенциальный риск отравления [19].

Среднесуточное употребление (*EDI*) рассчитывали следующим образом [19]:

$$EDI = \frac{C_{food} \cdot IR_{food} \cdot AF_{GIT} \cdot D_d \cdot D_y}{BW \cdot 365 \cdot LE},$$

где C_{food} — концентрация токсиканта в пище, мг/кг; IR_{food} — среднее употребление контаминированной пищи, кг/день; AF_{GIT} — фактор адсорбции токсиканта в желудочно-кишечном тракте (принимается равным 1, если отсутствуют другие данные); D_d — количество дней, в которые происходит употребление загрязненной пищи (поскольку официальная информация об уровнях употребления моллюсков во Вьетнаме отсутствует, принято значение 5 раз в неделю согласно исследованию [12]; D_y — количество лет употребления загрязненной пищи (для расчета коэффициента опасности не учитывается и принимается равным 1, для расчета риска развития рака — 71 [20]); BW — средний вес тела человека, кг (по данным работы [21] — 57,7 кг); LE — средняя продолжительность жизни (принимается равной 76 годам [22]).

ILCR рассчитывали по формуле [19]

$$ILCR = SF_{oral} \cdot EDI,$$

где SF_{oral} — коэффициент, отражающий степень повышения риска развития рака при поглощении токсиканта *per os*, килограмм в день/мг. Если $ILCR > 1 \cdot 10^{-5}$, существует потенциальный риск развития рака [19].

Статистический анализ результатов осуществляли с помощью программного обеспечения IBM SPSS Statistics для Windows 10. Результаты представлены в виде диапазона концентраций (min–max) и среднего значения \pm стандартное отклонение (Mean \pm SD).

Результаты

Концентрации ТМ, ХОП и ПХБ в тканях двустворчатых моллюсков *Corbicula* sp., *Geloina* sp., *Ensidens* sp. и *Scabies* sp. представлены в табл. 1 и 2.

В моллюсках *Corbicula* sp. уровни ХОС (Σ ХОП + Σ ПХБ) варьировали в пределах 0,0011–0,6169 (0,0913 \pm 0,1258) мг/кг сырой массы.

Концентрации ХОП (Σ ДДТ + Σ ГЦХГ) и ПХБ (сумма исследованных конгенов) обнаружены в диапазонах от 0,0005 до 0,0199 (0,0859 \pm 0,1207) и от 0,0003 до 0,2535 (0,0075 \pm 0,0327) мг/кг сырой массы соответственно. Концентрации ГХЦГ (α + β + γ + δ -изомеры) составляли от 0,0003 до 0,5818 (0,0822 \pm 0,1195) мг/кг сырой массы; ДДТ (ДДТ + ДДД + ДДЕ) — от 0,0005 до 0,0199 (0,0060 \pm 0,0049) мг/кг сырой массы. Из метаболитов ДДТ преобладал 2,4-ДДЕ (обнаружен в 83,3 % образцов); 2,4-ДДД и 4,4-ДДЕ обнаружены в одной пробе — 0,0006 и 0,0013 мг/кг сырой массы соответственно. Из ПХБ конгенер 28 выявлен в 89,4 %, 52 — в 6,1 % образцов. ПХБ 143 обнаружен в 1 образце с концентрацией 0,0029 мг/кг сырой массы.

Среди исследованных элементов выявлены Pb, Cd, Mn, Fe, Ni, Cu и Zn с диапазонами концентраций 0,005–0,643, 0,05–0,607, 0,5–3073,4, 15,5–860,8, 0,006–2,791, 0,79–16,62 и 10,3–79,0 мг/кг сырой массы соответственно (см. табл. 1).

В моллюсках *Geloina* sp. концентрации ХОС варьировали от 0,0029 до 0,0160 (0,0088 \pm 0,0040) мг/кг сырой массы. Уровни ХОП и ПХБ находились в пределах 0,0029–0,0148 (0,0073 \pm 0,0031) и 0,0002–0,0069 (0,0016 \pm 0,0020) мг/кг сырой массы соответственно. Содержание ДДТ и ГХЦГ варьировало от 0,0013 до 0,0079 (0,0043 \pm 0,0020) и от 0,0001 до 0,0131 (0,0030 \pm 0,0037) мг/кг сырой массы соответственно. Из изомеров ГХЦГ γ -форма обнаружена в 100 % исследованных образцов, из метаболитов ДДТ выявлены только 2,4-ДДЕ (в 100 % образцов) и 4,4-ДДЕ (92,3 % образцов). Из ПХБ определены только конгенеры 28 и 52, присутствующие в 92,3 и 38,5 % образцов соответственно.

Концентрации тяжелых металлов находились в следующих диапазонах: Pb — 0,015–0,249; Cd — 0,06–0,60; Mn — 0,7–101,3; Fe — 52–861; Ni — 0,3–2,8; Cu — 1,1–3,3; Zn — 14,6–59,0 мг/кг сырой массы.

В моллюсках *Ensidens* sp. уровни ХОС варьировали от 0,0042 до 0,0450 (0,0227 \pm 0,0142) мг/кг сырой массы. Концентрации ХОП находились в диапазоне от 0,0026 до 0,0422 (0,0208 \pm 0,0141) мг/кг сырой массы, ПХБ — от 0,0007 до 0,0037 (0,0021 \pm 0,0011) мг/кг сырой массы. Уровни ГХЦГ и ДДТ составляли 0,0014–0,0353 (0,0168 \pm 0,0145) и 0,0004–0,0422 (0,0044 \pm 0,0044) мг/кг сырой массы соответственно. Из изомеров ГХЦГ β - и δ -формы выявлены в 100 % образцов, α - и γ - — в 72,7 и 90,9 % образцов. ДДТ и его метаболиты представлены только 2,4-ДДЕ (90,9 % образцов) и 4,4-ДДЕ (27,2 % образцов). Из ПХБ в образцах обнаружен только конгенер 28 (в 90,9 % проб).

Концентрации Pb, Cd, Mn, Fe, Ni, Cu и Zn варьировали от 0,005 до 0,063, от 0,1 до 0,2, от 665 до 3073, от 70 до 491, от 0,4 до 0,8, от 0,8 до 2,3 и от 23 до 79 мг/кг сырой массы соответственно.

В моллюсках *Scabies* sp. концентрации ХОС изменялись от 0,0020 до 0,0214 (0,0104 \pm 0,0076) мг/кг сырой массы. Уровни ХОП и ПХБ находились в диапазонах от 0,0004 до 0,0177 (0,0063 \pm 0,0071) и от 0,0012 до 0,0100 (0,0041 \pm 0,0035) мг/кг сырой массы соответственно. Концентрации ГХЦГ и ДДТ составляли 0,0004–0,0073 (0,0028 \pm 0,0029) и 0,0009–0,0104 (0,0043 \pm 0,0043) мг/кг сырой массы соответственно. Из изомеров ГХЦГ только γ -форма обнаружена в 100 % исследованных проб, β - и δ -ГХЦГ выявлены в 60 и 40 % образцов. Количество α -изомера было ниже пределов обнаружения. Из ДДТ и его метаболитов выявлены только 2,4-ДДЕ и 4,4-ДДЕ в 60 и 40 % образцов соответственно. Из ПХБ обнаружены конгенеры 28 и 52 в 100 и 40 % выборки.

Диапазоны концентраций металлов варьировали у Pb в пределах — 0,05–0,19, у Cd — 0,05–0,1, у Mn — 664,5–848,4, у Fe — 267,5–362,9, у Ni — 0,4–0,5, у Cu — 1,1–1,4 и у Zn — 13–17 мг/кг сырой массы.

Результаты расчета риска для здоровья населения Южного Вьетнама от употребления исследованных видов моллюсков представлены в табл. 3 и 4. В литературе нет официальных статистических данных о количестве употребляемых во Вьетнаме моллюсков. В связи с этим мы подбирали такой уровень потребления, при котором возникает возможность острого отравления ($HQ > 0,2$) или развития рака в течение жизни ($ILCR > 1 \cdot 10^{-5}$) при употреблении каждого вида гидробионтов. При этом в качестве наиболее опасного использовали токсикант, при минимальном потреблении которого возникает риск отравления или развития рака.

Таким образом, максимальные уровни потребления *Corbicula* sp. и *Ensidens* sp. установлены на уровне 50 и 127 г/день (или 83 и 91 шт/день) соответственно в связи с риском избыточного потребления α -ГХЦГ. Для моллюсков родов *Geloina* sp. и *Scabies* sp. аналогичные значения составили 260 и 510 г/день (или 84 и 1020 шт/день) в силу риска отравления от ПХБ. У *Corbicula* sp., *Geloina* sp. и *Ensidens* sp. риск развития рака связан с α -ГХЦГ (с самым высоким канцерогенным потенциалом 6,3), у *Scabies* sp. — с ПХБ. Допустимые уровни потребления этих моллюсков составили 1,43, 38,5 и 104,5 г/день соответственно, или 2, 12, 5 и 209 шт/день соответственно.

Максимальные уровни потребления мяса моллюсков *Corbicula* sp. установлены в связи

Таблица 1 / Table 1

Концентрации тяжелых металлов в тканях двусторчатых моллюсков Южного Вьетнама,
 мг/кг сырой массы, M ± SD
 Concentrations of heavy metals in bivalves from the southern Vietnam,
 mg/kg wet weight, M ± SD

Вид и число наблюдений	Средняя масса одной особи, г	Концентрация, мг/кг сырой массы						
		Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
<i>Corbicula</i> sp. (n = 66)	0,6 ± 0,5	3,6 ± 3,3	112,5 ± 107,5	0,42 ± 0,40	6,5 ± 2,8	16,4 ± 3,7	0,16 ± 0,08	0,09 ± 0,11
<i>Geloina</i> sp. (n = 13)	3,1 ± 1,9	15,8 ± 22,6	253,2 ± 220,1	1,2 ± 0,8	1,9 ± 0,7	26,9 ± 12,6	0,26 ± 0,14	0,07 ± 0,06
<i>Ensidens</i> sp. (n = 11)	1,4 ± 0,4	1731,1 ± 754,1	342,6 ± 146,8	0,57 ± 0,15	1,2 ± 0,5	45,6 ± 20,5	0,15 ± 0,04	0,04 ± 0,02
<i>Scabies</i> sp. (n = 5)	0,5 ± 0,1	777,0 ± 82,9	309,4 ± 42,4	0,43 ± 0,04	1,3 ± 0,1	15,0 ± 1,7	0,07 ± 0,02	0,09 ± 0,07
Нормативы Вьетнама*	—	—**	—	—	—	—	1,0	1,5

Примечание.

* по [23].

** не нормируется.

Таблица 2 / Table 2

Концентрации хлорорганических пестицидов и полихлорированных бифенилов в тканях двусторчатых моллюсков Южного Вьетнама*,
 мг/кг сырой массы, M ± SD
 Concentrations of organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in bivalves from the southern Vietnam,
 mg/kg wet weight, M ± SD

Объект исследования	α-ГХЦГ	β-ГХЦГ	γ-ГХЦГ	δ-ГХЦГ	2,4-ДДЕ	4,4-ДДЕ	ПХБ 28	ПХБ 52
<i>Corbicula</i> sp.	0,0962 ± 0,1143	0,0023 ± 0,0020	0,0066 ± 0,0114	0,0046 ± 0,0042	0,0059 ± 0,0049	—**	0,0041 ± 0,0086	0,0487 ± 0,0928
<i>Geloina</i> sp.	0,0036 ± 0,0045	0,0003 ± 0,0002	0,0007 ± 0,0005	0,0006 ± 0,0005	0,0034 ± 0,0016	0,0010 ± 0,0009	0,0014 ± 0,0017	<ПО
<i>Ensidens</i> sp.	0,0186 ± 0,0110	0,0009 ± 0,0007	0,0009 ± 0,0007	0,0016 ± 0,0012	0,0037 ± 0,0037	0,0023 ± 0,0007	0,0021 ± 0,0011	<ПО
<i>Scabies</i> sp.	<ПО***	0,0010 ± 0,0005	0,0009 ± 0,0005	0,0035 ± 0,0023	0,0021 ± 0,0015	0,0053 ± 0,0019	0,0038 ± 0,0031	<ПО

Примечание.

* В нормативных документах Вьетнама отсутствуют допустимые уровни исследуемых поллютантов для объектов аквакультуры.

** обнаружено в одном образце.

*** ниже пределов обнаружения.

Таблица 3 / Table 3

Коэффициенты *HQ* и *ILCR* в моллюсках, содержащих хлорорганические пестициды и полихлорированные бифенилы
HQ and *ILCR* coefficients in mollusks containing organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls

Токсикант	Суточное потребление, кг/день*	EDI для <i>HQ</i>	<i>HQ</i> **	EDI для <i>ILCR</i>	<i>ILCR</i> **
<i>Corbicula</i> sp.					
α -ГХЦГ	0,05 0,00143	$5,96 \cdot 10^{-5}$	0,20	$1,59 \cdot 10^{-6}$	$1,00 \cdot 10^{-5}$
β -ГХЦГ		$1,42 \cdot 10^{-6}$	0,005	$3,79 \cdot 10^{-8}$	$6,83 \cdot 10^{-8}$
γ -ГХЦГ		$4,09 \cdot 10^{-6}$	0,01	$1,09 \cdot 10^{-7}$	$1,42 \cdot 10^{-7}$
ДДЕ		$3,70 \cdot 10^{-6}$	0,01	$9,88 \cdot 10^{-8}$	$3,36 \cdot 10^{-8}$
ПХБ _{общ}		$4,35 \cdot 10^{-6}$	0,03	$1,16 \cdot 10^{-7}$	$2,32 \cdot 10^{-7}$
<i>Geloina</i> sp.					
α -ГХЦГ	1,27 0,038	$5,69 \cdot 10^{-5}$	0,19	$1,59 \cdot 10^{-6}$	$1,00 \cdot 10^{-5}$
β -ГХЦГ		$5,40 \cdot 10^{-6}$	0,02	$1,51 \cdot 10^{-7}$	$2,72 \cdot 10^{-7}$
γ -ГХЦГ		$1,14 \cdot 10^{-5}$	0,04	$3,18 \cdot 10^{-7}$	$4,13 \cdot 10^{-7}$
ДДЕ		$6,75 \cdot 10^{-5}$	0,14	$1,89 \cdot 10^{-6}$	$6,42 \cdot 10^{-7}$
ПХБ _{общ}		$2,59 \cdot 10^{-5}$	0,20	$7,25 \cdot 10^{-7}$	$1,45 \cdot 10^{-6}$
<i>Ensidens</i> sp.					
α -ГХЦГ	0,261 0,0074	$6,0 \cdot 10^{-5}$	0,20	$1,59 \cdot 10^{-6}$	$1,00 \cdot 10^{-5}$
β -ГХЦГ		$2,8 \cdot 10^{-6}$	0,01	$7,46 \cdot 10^{-8}$	$1,34 \cdot 10^{-7}$
γ -ГХЦГ		$3,0 \cdot 10^{-6}$	0,01	$7,87 \cdot 10^{-8}$	$1,02 \cdot 10^{-7}$
ДДЕ		$1,4 \cdot 10^{-5}$	0,03	$3,75 \cdot 10^{-7}$	$1,28 \cdot 10^{-7}$
ПХБ _{общ}		$7,0 \cdot 10^{-6}$	0,05	$1,84 \cdot 10^{-7}$	$3,68 \cdot 10^{-7}$
<i>Scabies</i> sp.					
β -ГХЦГ	0,505 0,1045	$5,97 \cdot 10^{-6}$	0,02	$1,15 \cdot 10^{-6}$	$2,08 \cdot 10^{-6}$
γ -ГХЦГ		$5,42 \cdot 10^{-6}$	0,02	$1,05 \cdot 10^{-6}$	$1,36 \cdot 10^{-6}$
ДДЕ		$2,67 \cdot 10^{-5}$	0,05	$5,15 \cdot 10^{-6}$	$1,75 \cdot 10^{-6}$
ПХБ _{общ}		$2,60 \cdot 10^{-5}$	0,20	$5,02 \cdot 10^{-7}$	$1,00 \cdot 10^{-5}$

Примечание.

* числитель — уровень потребления сырого мяса моллюсков для расчета *HQ*; знаменатель — для *ILCR*.

** выделенные числа указывают на наличие потенциально возможного риска.

Таблица 4 / Table 4

Коэффициент *HQ* в моллюсках, содержащих тяжелые металлы
HQ coefficient in mollusks containing heavy metals

Элемент	Потребление, кг/день	EDI для <i>HQ</i>	<i>HQ</i> *
<i>Corbicula</i> sp.			
Pb	0,08	$8,9 \cdot 10^{-5}$	0,02
Cd		$1,6 \cdot 10^{-4}$	0,20
Mn		$3,6 \cdot 10^{-3}$	0,03
Fe		$1,1 \cdot 10^{-1}$	0,16
Ni		$4,2 \cdot 10^{-4}$	0,02
Cu		$6,4 \cdot 10^{-3}$	0,16
Zn		$1,6 \cdot 10^{-2}$	0,05

Элемент	Потребление, кг/день	EDI для HQ	HQ*
<i>Geloina</i> sp.			
Pb	0,045	$3,9 \cdot 10^{-5}$	0,01
Cd		$1,4 \cdot 10^{-4}$	0,18
Mn		$8,8 \cdot 10^{-3}$	0,06
Fe		$1,4 \cdot 10^{-1}$	0,20
Ni		$6,7 \cdot 10^{-4}$	0,03
Cu		$1,1 \cdot 10^{-3}$	0,03
Zn		$1,5 \cdot 10^{-2}$	0,05
<i>Ensidens</i> sp.			
Pb	0,0013	$4,9 \cdot 10^{-7}$	0,0001
Cd		$2,4 \cdot 10^{-6}$	0,0030
Mn		$2,8 \cdot 10^{-2}$	0,2000
Fe		$5,5 \cdot 10^{-3}$	0,0079
Ni		$9,2 \cdot 10^{-6}$	0,0005
Cu		$1,9 \cdot 10^{-5}$	0,0005
Zn		$7,4 \cdot 10^{-4}$	0,0025
<i>Scabies</i> sp.			
Pb	0,0029	$3,2 \cdot 10^{-6}$	0,0009
Cd		$2,5 \cdot 10^{-6}$	0,0032
Mn		$2,8 \cdot 10^{-2}$	0,2000
Fe		$1,1 \cdot 10^{-2}$	0,0159
Ni		$1,5 \cdot 10^{-5}$	0,0008
Cu		$4,7 \cdot 10^{-5}$	0,0012
Zn		$5,4 \cdot 10^{-4}$	0,0018

Примечание. *выделенные числа указывают на наличие возможного риска.

с риском получить избыточную дозу кадмия — 80 г/день (133 шт/день). Риск получить избыток железа возможен при употреблении в пищу *Geloina* sp. — 45 г/день (15 шт/день), но нивелируется малой токсичностью элемента. Риск получить избыток марганца с употреблением в пищу *Ensidens* sp. и *Scabies* sp. возможен на уровне 1,3 и 2,9 г/день (1 и 6 шт/день) соответственно.

Обсуждение

Источники хлорорганических соединений и тяжелых металлов в Южном Вьетнаме. Тяжелые металлы попадают в экосистемы двумя путями — из природных и/или антропогенных источников. Среди этих веществ выделяют биофильные (Fe, Zn, Mn, Cu, Ni) и токсичные (Cd, Pb) элементы. Первые (эссенциальные) играют важную роль в метаболизме и жизнедеятельности многих организмов, но

в высоких концентрациях способны вызывать негативные последствия. Вторые (неэссенциальные) являются только токсикантами. В *Ensidens* sp. и *Scabies* sp. обнаружены значительные уровни марганца, в *Geloina* sp. — железа, в *Corbicula* sp. — кадмия, что может быть связано с биологическими особенностями этих моллюсков [10].

Известно, что моллюски способны накапливать определенные элементы в концентрациях, значительно превышающих таковые в среде [24], что создает опасность употребления этих организмов в пищу. Согласно Т.Т. Viet, отдельные районы дельты реки Меконг (где отобраны образцы) характеризуются высокими уровнями меди (0,007–0,122 мг/л), свинца (0,001–0,067 мг/л) и кадмия (0,001–0,021 мг/л), превышающими стандарты Вьетнама для пресной воды [9]. Данные других авторов указывают на существенное загрязнение дельты реки Меконг Mn и Fe, концентрации которых

превышают допустимые нормативы Вьетнама и Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) для питьевой воды в 1,5–100 раз [25]. Таким образом, высокие уровни аккумуляции тяжелых металлов в моллюсках могут быть связаны как с их биоконцентрационной способностью, так и с повышенным содержанием элементов в среде.

Опасные группы химических соединений, относящиеся к СОЗ, такие как ХОП и ПХБ, обнаруживают повсеместно. Их глобальное распространение обусловлено летучестью, растворимостью и концентрированием в липидах [27]. Наиболее широко ХОП применяют в странах с развитым сельским хозяйством, в особенности во многих странах Юго-Восточной Азии [28], в том числе в Социалистической Республике Вьетнам, где во время Второй Индокитайской войны было использовано около 77 млн л различных пестицидов [29], что в значительной степени определяет состояние окружающей среды на сегодняшний день. Во время войны американские военные использовали различные композиции пестицидов и дефолиантов, получивших название по цвету содержащей их тары (Оранжевый агент, Синий агент и др.). Чаще других применяли Оранжевый агент, в состав которого входили 2,4,5-трихлорфеноксиуксусная кислота и 2,4-дихлорфеноксиуксусная кислота [26]. Однако помимо этих смесей американские и австралийские военные активно использовали ДДТ и ГХЦГ как защитное средство от малярийных комаров, вшей и других вредителей. Эти химические вещества распыляли над военными базами с 1966 г. [30]. Согласно отчетам ВВС США для распространения ХОП самолеты совершали около 20 вылетов в месяц. Один вылет мог покрыть около 15 000 акров [6, 7, 29, 31].

Дельта реки Меконг — самый большой «рисовый» район Вьетнама. Фермерские хозяйства этого региона до сих пор используют пестициды, запрещенные или ограниченные к применению Министерством сельского хозяйства и развития сельских районов Вьетнама (МАРД) [32]. Таким образом, на загрязнение СОЗ в Южном Вьетнаме влияет не только использование пестицидов во время войны и бурное развитие сельского хозяйства, но и несоблюдение фермерами рекомендаций и запретов по применению этих опасных соединений.

На сегодняшний день на территории Вьетнама отсутствует серьезное загрязнение тяжелыми металлами. Однако для ХОП и ПХБ подобное заключение дать трудно, поскольку эти соединения не нормируются в водных биологических ресурсах этой страны. При этом обнаружение

ХОП в традиционной пище местного населения может в значительной степени сказываться на здоровье нынешнего и будущего поколений (как показали всемирно известные случаи отравления СОЗ — болезни Юшо и Ю-Ченг) [33].

Биологическое действие и риски от хлорорганических пестицидов и полихлорированных бифенилов. Дихлордифенилтрихлорэтан (ДДТ) — хлорорганический инсектицид, который широко применяли в сельском хозяйстве и несельскохозяйственном секторе во всем мире начиная с 1939 г. В 1972 г. использование ДДТ было запрещено во многих странах из-за его токсичности и потенциальной канцерогенности. На сегодняшний день известно, что к неблагоприятным последствиям попадания ДДТ в организм относят неврологические, репродуктивные, эндокринологические и другие расстройства. ДДТ и его метаболиты являются канцерогенами для печени человека и животных [34]. В исследованных нами моллюсках из ДДТ и его метаболитов обнаружены только 2,4- и 4,4-ДДЕ. При расчете максимально допустимого уровня потребления гидробионтов ни в одном случае риск не был ассоциирован с ДДТ и его метаболитами.

Гексахлорциклогексан является синтетическим химическим веществом, состоящим из восьми изомеров. Только четыре из них — α -, β -, γ - и δ -ГХЦГ — имеют коммерческое значение. Для обработки семян зерновых культур использовали γ -форму (линдан). Ее также применяют в низких концентрациях в качестве рецептурного лекарства для лечения чесотки и вшей. В литературе представлены данные о его потенциальной канцерогенности. ГХЦГ повышает вероятность развития неходжкинской лимфомы на 50 %. Получены данные о развитии рака печени у животных, подвергавшихся длительному воздействию различных изомеров. Существует достаточно много работ, в которых исследовали влияние ГХЦГ на возникновение онкологических заболеваний у людей, например рака груди, карциномы легких и др. [35].

Расчеты показали, что риск отравления потенциальными канцерогенами при употреблении в пищу четырех рассмотренных родов моллюсков в течение жизни в большинстве случаев ассоциирован с α -ГХЦГ. Учитывая продолжающееся медицинское использование этого вещества, применение в сельском хозяйстве и крайне высокие уровни в мягких тканях промысловых моллюсков из дельты Меконга, необходимо выяснить источники его поступления, ужесточить ограничения по применению этого пестицида и начать регулярный контроль состояния здоровья жителей дельты реки Меконг.

Полихлорированные бифенилы — это группа синтетических органических химикатов с доказанными токсическими свойствами. В окружающей среде отсутствуют природные источники ПХБ. Об опасности этих соединений для здоровья людей известно из случаев, когда пациенты подвергались воздействию токсикантов на рабочем месте, употребляли загрязненное рисовое масло (Япония — болезнь Юшо, Тайвань — болезнь Ю-Ченг), рыбу и продукты питания животного происхождения. Последствия для здоровья, связанные с воздействием ПХБ, включают влияние на печень, щитовидную железу, кожу и глаза, иммунную и нервную системы, снижение массы плода новорожденных и эмбриотоксичность. Канцерогенность ПХБ для людей исследована в ретроспективных работах, в которых убедительно доказано, что эти соединения являются канцерогенными, могут способствовать развитию рака печени, желчных путей, кишечника и кожи [33].

Высокие значения коэффициентов *HQ* и *ILCR* от ПХБ обнаружены только при употреблении моллюсков рода *Scabies*, популяции которых достаточно редки в дельте Меконга, поэтому в целом фактически отсутствует риск отравления ПХБ в связи с употреблением рассмотренных двустворчатых моллюсков для населения дельты.

Биологические эффекты и риски от тяжелых металлов. Свинец и кадмий — наиболее известные поллютанты окружающей среды и входят в перечень наиболее опасных контаминантов [36]. Из-за устойчивости и продолжительного использования этих элементов их концентрации увеличиваются, что повышает опасность для живых организмов, в том числе и для человека. Они поражают практически все органы человеческого тела, причем основными мишенями становятся нервная система, почки, печень, легкие, кости, гонады и мозг, где провоцируется серьезный окислительный стресс [37]. Краткосрочное воздействие способно снизить когнитивные функции, а длительная экспозиция провоцирует развитие анемии, серьезные повреждения почек и мозга и приводит к смерти [38]. Токсичность этих элементов по большей части основана на способности замещать кальций в различных метаболических реакциях [37, 38]. Несмотря на свою токсичность, риски для здоровья, связанные с употреблением в пищу моллюсков, загрязненных токсичными металлами в дельте Меконга, отсутствуют.

Тяжелые металлы, относящиеся к эссенциальным элементам (Mn, Fe, Cu, Zn, Ni), крайне важны для нормальной жизнедеятельности

любого организма. Они участвуют в формировании тканей, составляют кофакторы многих ферментов, поддерживают здоровье репродуктивной, нервной и иммунной систем и играют ключевую роль во многих фундаментальных биологических процессах — от переноса кислорода до синтеза ДНК [39–42]. Следует особо выделить протекторную функцию некоторых микроэлементов, обеспечивающих антиоксидантную защиту, синтез нейропептидов и иммунную функцию [41, 42]. Несмотря на важную физиологическую роль, избыточное потребление любых элементов может провоцировать развитие патологических процессов почти во всех системах организма. Токсические эффекты многих эссенциальных элементов исследованы не полностью [39].

Симптомы отравления могут быть невыраженными, но для них характерна прямая зависимость доза — эффект. К числу патологических процессов при интоксикации эссенциальными элементами относят неврологические расстройства (потерю координации и равновесия) [39], повреждения слизистой оболочки желудочно-кишечного тракта [43], ингибирование важнейших биохимических процессов [44], целевую токсичность на конкретные органы или их системы [45–47], внутриклеточные окислительные повреждения и выведение связанных элементов из организма. Последнее представляет крайне важное свойство, поскольку провоцирует увеличение экскреции металлотioneинов из организма, нарушая минеральный обмен [42, 48]. Некоторые элементы практически безвредны и оказывают свое токсическое действие только в сравнительно высоких дозах [49], попадание которых в организм рациональными способами невозможно. Как правило, отравление наблюдается при неконтролируемом использовании биологически активных добавок к пище или в результате потребления загрязненных элементов продуктов. Наиболее распространенными симптомами отравления такими веществами являются тошнота, рвота, колики, брюшные судороги и диарея [50].

В наибольших концентрациях Cd обнаружен в солоноватоводных и пресноводных моллюсках родов *Geloina* и *Corbicula*. Несмотря на более высокие уровни накопления этого элемента в моллюсках из рода *Geloina*, риск, ассоциированный с Cd, был выявлен для рода *Corbicula*, что, вероятнее всего, связано с их меньшими размерами и массой. Стоит отметить, что зарегистрированные уровни этого элемента не превышают вьетнамских нормативов по содержанию ТМ в пище (2,0 мг/кг сырой массы). Уровни накопления Pb были ниже

таковых для Cd в среднем на 40 %. Отсутствие превышений нормативов (1,5 мг/кг сырой массы) и низкие концентрации объясняют отсутствие риска отравления этим элементом по сравнению с другими металлами.

Наибольшие уровни аккумуляции Cu обнаружены в тканях солоноватоводных и пресноводных *Corbicula* sp. При этом рисков, связанных с поступлением Cu при употреблении моллюсков этого рода, не выявлено. Концентрации Zn в пищевых продуктах Вьетнама не нормируются. Зафиксированные уровни этого элемента были высокими относительно Cd, Pb, Cu и Ni, но не представляли опасности, поскольку Zn является одним из самых малотоксичных элементов. Концентрации Ni были выше таковых для Cd и Pb, но меньше, чем для остальных исследованных элементов. Ввиду столь малого накопления рисков отравления этим металлом не обнаружено.

Наибольшие среди всех исследованных элементов концентрации обнаружены для Fe и Mn. Как указано выше, воды дельты реки Меконг характеризуются серьезным загрязнением этими элементами, что и отражается на местных пресноводных и солоноватоводных организмах. Согласно результатам расчета риск отравления Fe потенциально возможен при употреблении крупных солоноватоводных моллюсков *Geloina* sp., но ввиду малой токсичности элемента отравление маловероятно. Высокие уровни Mn зарегистрированы в пресноводных двустворчатых моллюсках родов *Ensidens* и *Scabies*. Согласно расчетам для минимизации неблагоприятных последствия для здоровья, связанных с этим элементом, желательно полностью отказаться от употребления в пищу этих моллюсков.

В последнее время Вьетнам наращивает уровни экспорта водных биологических ресурсов в страны ближнего зарубежья, в связи с чем актуальна превентивная оценка пищевой безопасности объектов водного промысла для обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения. Кроме того, подобные исследования способствуют предотвращению экономических потерь, связанных с таковой утилизацией некачественной или опасной продукции. Другим важным обоснованием проведения подобного типа проверок является популяризация азиатского туристического направления среди граждан России, при этом Вьетнам занимает одну из ведущих позиций. Оценка безопасности местных продуктов питания (в особенности нетрадиционных для туристов) представляет актуальную задачу для обеспечения безопасности жизни и здоровья граждан России за рубежом.

Выводы

1. Определены уровни тяжелых металлов (Pb, Cd, Mn, Fe, Ni, Cu и Zn) и стойких органических загрязняющих веществ (ДДТ, ГХЦГ и ПХБ) в мягких тканях двустворчатых моллюсков четырех родов из пресноводной и осолоненной зоны дельты реки Меконг. Обнаруженные концентрации органических поллютантов указывают на необходимость создания нормативной документации для этих соединений.
2. Определены максимальные уровни потребления исследованных моллюсков, при которых отсутствует экологический риск для здоровья населения Южного Вьетнама. Риск отравления ассоциирован с α -ГХЦГ, ПХБ и Mn, а потенциальный риск развития рака в течение жизни также связан с α -ГХЦГ и ПХБ.

Дополнительная информация

Финансирование. Сбор образцов и определение тяжелых металлов выполнены при поддержке международной программы совместных проектов Дальневосточного отделения РАН и Вьетнамской академии науки и технологии в области фундаментальных исследований (руководители проекта — акад. В.В. Богатов и доктор К.К. Нго). Определение хлорорганических соединений проведено при поддержке Российского научного фонда (соглашение № 18-14-00120).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература

1. Tsygankov VY, Lukyanova ON, Boyarova MD, et al. Organochlorine pesticides in commercial Pacific salmon in the Russian Far Eastern seas: Food safety and human health risk assessment. *Mar Pollut Bull.* 2019;140:503-508. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.02.008>.
2. Huang H, Chen L, Wang S, et al. Electrochemical monitoring of persistent toxic substances using metal oxide and its composite nanomaterials: Design, preparation, and application. *Trends Analyt Chem.* 2019;119:115636. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2019.115636>.
3. Vietnam National Implementation Plan for Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants. Hanoi; 2006.
4. Wang W, Wang Y, Zhang R, et al. Seasonal characteristics and current sources of OCPs and PCBs and enantiomeric signatures of chiral OCPs in the atmosphere of Vietnam. *Sci Total Environ.* 2016;542(Pt A):777-786. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.129>.

5. Румак В.С., Умнова Н.В. Диоксины и безопасность биосистем: результаты натуральных исследований // Жизнь Земли. – 2018. – Т. 40. – № 3. – С. 308–323. [Roumak VS, Umnova NV. Dioxins and biosystems safety: Field research results. *Zhizn' Zemli*. 2018;40(3):308–323. (In Russ.)]
6. Софронов Г.А., Румак В.С., Умнова Н.В., и др. Возможные риски хронического воздействия малых доз диоксинов для здоровья населения: к методологии выявления токсических эффектов // Медицинский академический журнал. – 2016. – Т. 16. – № 3. – С. 7–18. [Sofronov GA, Roumak VS, Umnova, NV, et al. Chronicle exposure to low concentrations of dioxins and possible risks for human health: some aspects of toxic effects revealing. *Medical academic journal*. 2016;16(3):7-18. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.17816/MAJ1637-18>.
7. Софронов Г.А., Румак В.С., Лазаренко Д.Ю. Экотоксикокинетика и экотоксикодинамика токсичных химических веществ в условиях тропиков // Медицинский академический журнал. – 2010. – Т. 10. – № 4. – С. 183–190. [Sofronov GA, Roumak VS, Lazarenko DY. Ecotoxicokinetics and ecotoxicodynamics of toxic chemical substances in conditions of tropics // *Medical academic journal*. 2010;10(4):183-190. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.17816/MAJ104183-190>.
8. Tran TAM, Malarvannan G, Hoang TL, et al. Occurrence of organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in sediment and fish in Cau Hai lagoon of Central Vietnam: Human health risk assessment. *Mar Pollut Bull*. 2019;141:521-528. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.03.006>.
9. Viet TT. Distribution of Heavy Metals in Surface Water, Suspended Particulate Matter, Sediment and Clam (*Meretrix Lyrata*) from Downstream of Saigon-Dong Nai River, Vietnam. *Vietnam J Sci Technol*. 2018;54(2A):207. <https://doi.org/10.15625/2525-2518/54/2a/11932>.
10. Богатов В.В., Прозорова Л.А., Чернова Е.Н., и др. Аккумуляция тяжелых металлов в мягких тканях двустворчатых моллюсков (*Bivalvia*) из природных озер Восточного Сихотэ-Алиня (Россия) и дельты Меконга (Вьетнам) // Доклады Академии наук. – 2019. – Т. 484. – № 2. – С. 206–208. [Bogatov VV, Prozorova LA, Chernova EN, et al. Bioaccumulation of heavy metals in soft tissues of bivalve mollusks from natural lakes in the eastern Sikhote-Alin (Russia) and the Mekong Delta (Vietnam). *Dokl Akad Nauk*. 2019;484(2):206-208. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524842206-208>.
11. Huong N, Petlock B, Francic M. Vietnam Food Processing Ingredients (Global Agricultural Information Network No. VM7072). Hanoi: USDA Foreign Agricultural Service; 2017.
12. Kim SH, Hwang JY, Kim MK, et al. Dietary factors related to body weight in adult Vietnamese in the rural area of Haiphong, Vietnam: the Korean Genome and Epidemiology Study (KoGES). *Nutr Res Pract*. 2010;4(3):235-242. <https://doi.org/10.4162/nrp.2010.4.3.235>.
13. Tsygankov VY, Lukyanova ON, Boyarova MD. Organochlorine pesticide accumulation in seabirds and marine mammals from the Northwest Pacific. *Mar Pollut Bull*. 2018;128:208-213. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.01.027>.
14. Nguyen TAT, Jolly CM. Global value chain and food safety and quality standards of Vietnam pangasius exports. *Aquac Rep*. 2020;16:100256. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2019.100256>.
15. Tsygankov VY, Boyarova MD. Sample preparation method for the determination of organochlorine pesticides in aquatic organisms by gas chromatography. *Achievements in the Life Sciences*. 2015;9(1):65-68. <https://doi.org/10.1016/j.als.2015.05.010>.
16. Amiard JC, Amiard-Triquet C, Charbonnier L, et al. Bioaccessibility of essential and non-essential metals in commercial shellfish from Western Europe and Asia. *Food Chem Toxicol*. 2008;46(6):2010-2022. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2008.01.041>.
17. Canada.ca [Internet]. Federal Contaminated Site Risk Assessment in Canada, Part II: Health Canada Toxicological Reference Values (TRVs) and Chemical-Specific Factors, Version 2.0 [cited 2020 Jun 21]. Available from: <https://www.canada.ca/en/health-canada.html>.
18. Cfpub.epa.gov [Internet]. United States Environment Protection Agency (USEPA). IRIS Assessments [cited 2020 Jun 21]. Available from: https://cfpub.epa.gov/ncea/iris_drafts/AtoZ.cfm
19. Popstoolkit.com [Internet]. Persistent Organic Pollutants Toolkit [cited 2020 Jun 21]. Available from: <http://www.popstoolkit.com/>.
20. Tran TAM, Malarvannan G, Hoang TL, et al. Occurrence of organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in sediment and fish in Cau Hai lagoon of Central Vietnam: Human health risk assessment. *Mar Pollut Bull*. 2019;141:521-528. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.03.006>.
21. Walpole SC, Prieto-Merino D, Edwards P, et al. The weight of nations: an estimation of adult human biomass. *BMC Public Health*. 2012;12:439. <https://doi.org/10.1186/1471-2458-12-439>.
22. World Health Organization. ANNEX B Tables of health statistics by country, WHO region and globally. WHO; 2016.
23. Circular 50/2016/TT-BYT regulations on maximum residue levels of pesticide in food. Hanoi: Minister of Health (Vietnam); 2016.
24. Donets MM, Tsygankov VY. Trace elements in commercial marine organisms from the Russian part of the Northwest Pacific (2010–2018). *Environ Chem Lett*. 2019;17(4):1727-1740. <https://doi.org/10.1007/s10311-019-00907-8>.
25. Le Luu T. Remarks on the current quality of groundwater in Vietnam. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2017;26(2):1163-1169. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9631-z>.

26. Умнова Н.В., Румак В.С., Хоанг Ань Туэт, Софронов Г.А. Эколого-генетические проявления отдаленных медицинских последствий применения военных фитотоксикантов во Вьетнаме // Диоксины. Суперэко-токсиканты XXI века. Инф. вып. № 8. – М.: ВИНТИ, 2003. – С. 85–100. [Umnova NV, Roumak VS, Hoang An' Tuet, Sofronov GA. Ecological and genetic manifestations of the remote medical consequences of the use of military phytotoxicants in Vietnam. In: Dioxins. Superecotoxicants of XXI century. Inf. issue No. 8. Moscow: VINITI; 2003. P. 85-100. (In Russ.)]
27. Tsygankov VY. Organochlorine pesticides in marine ecosystems of the Far Eastern Seas of Russia (2000-2017). *Water Res.* 2019;161:43-53. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.05.103>.
28. Ali U, Syed JH, Malik RN, et al. Organochlorine pesticides (OCPs) in South Asian region: a review. *Sci Total Environ.* 2014;476-477:705-717. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.12.107>.
29. Collins CV. *Herbicide Operations in Southeast Asia: July 1961-June 1967*. San Francisco: Headquarters, Pacific Air Forces; 1967.
30. *The U.S. Military and the Herbicide Program in Vietnam, Veterans and Agent Orange: Health Effects of Herbicides Used in Vietnam*. Washington: National Academies Press (US); 1994.
31. Buckingham WA. *Operation Ranch Hand: The Air Force and Herbicides in Southeast Asia 1961-1971*. Washington: U.S. Air Force Office of Air Force History; 1982.
32. Toan PV. *Pesticide use and management in the Mekong delta and their residues in surface and drinking water*. [dissertation] Bonn: United Nations University in Bonn; 2011.
33. Faroon O, Olson JN. *Toxicological profile for Polychlorinated Biphenyls (PCBs)*. Atlanta: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service; 2000.
34. Faroon O, Ruiz P, Jones D, et al. *Toxicological profile for DDT, DDE, DDD (Draft for Public Comment)*. Atlanta: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service; 2019.
35. Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). *Toxicological profile for Hexachlorocyclohexane*. Atlanta: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service; 2005.
36. Forcella M, Lau P, Oldani M, et al. Neuronal specific and non-specific responses to cadmium possibly involved in neurodegeneration: A toxicogenomics study in a human neuronal cell model. *Neurotoxicology.* 2020;76:162-173. <https://doi.org/10.1016/j.neuro.2019.11.002>.
37. Polykretis P, Cencetti F, Donati C, et al. Cadmium effects on superoxide dismutase 1 in human cells revealed by NMR. *Redox Biol.* 2019;21:101102. <https://doi.org/10.1016/j.redox.2019.101102>.
38. Wani AL, Ara A, Usmani JA. Lead toxicity: a review. *Interdiscip Toxicol.* 2015;8(2):55-64. <https://doi.org/10.1515/intox-2015-0009>.
39. Röllin HB, Nogueira CMCA. Manganese: Environmental Pollution and Health Effects. In: *Encyclopedia of Environmental Health (Second Edition)*. Elsevier; 2019. P. 229-242. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.11530-1>.
40. Pietrangelo A. Iron and the liver. *Liver Int.* 2016;36 Suppl 1: 116-123. <https://doi.org/10.1111/liv.13020>.
41. Bonham M, O'Connor JM, Hannigan BM, Strain JJ. The immune system as a physiological indicator of marginal copper status? *Br J Nutr.* 2007;87(5):393-403. <https://doi.org/10.1079/bjn2002558>.
42. Uriu-Adams JY, Keen CL. Copper, oxidative stress, and human health. *Mol Aspects Med.* 2005;26(4-5):268-298. <https://doi.org/10.1016/j.mam.2005.07.015>.
43. Anderson AC. Iron poisoning in children. *Curr Opin Pediatr.* 1994;6(3):289-294. <https://doi.org/10.1097/00008480-199406000-00010>.
44. Robotham JL, Lietman PS. Acute iron poisoning. A review. *Am J Dis Child.* 1980;134(9):875-879. <https://doi.org/10.1001/archpedi.1980.02130210059016>.
45. Williams M, Todd GD, Roney N, et al. *Toxicological Profile for Manganese*. Atlanta: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service; 2012.
46. Rizvi A, Parveen S, Khan S, Naseem I. Nickel toxicology with reference to male molecular reproductive physiology. *Reprod Biol.* 2020;20(1):3-8. <https://doi.org/10.1016/j.repbio.2019.11.005>.
47. Das KK, Das SN, Dhundasi SA. Nickel, its adverse health effects & oxidative stress. *Indian J Med Res.* 2008;128(4):412-425.
48. Igic PG, Lee E, Harper W, Roach KW. Toxic effects associated with consumption of zinc. *Mayo Clin Proc.* 2002;77(7):713-716. <https://doi.org/10.4065/77.7.713>.
49. Plum LM, Rink L, Haase H. The essential toxin: impact of zinc on human health. *Int J Environ Res Public Health.* 2010;7(4):1342-1365. <https://doi.org/10.3390/ijerph7041342>.
50. Fosmire GJ. Zinc toxicity. *Am J Clin Nutr.* 1990;51(2): 225-227. <https://doi.org/10.1093/ajcn/51.2.225>.

Сведения об авторах / Information about the authors

Максим Михайлович Донец — лаборант-исследователь лаборатории эковиотехнологии, студент 4-го курса Департамента пищевых наук и технологий Школы биомедицины, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток. <https://orcid.org/0000-0002-2108-4448>. SPIN-код: 9023-6473. E-mail: maksim.donecz@mail.ru.

Maxim M. Donets — laboratory assistant at the Laboratory of Environmental Biotechnology, 4th year student of the Department of Food Sciences and Technologies of the School of Biomedicine, Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia. <https://orcid.org/0000-0002-2108-4448>. SPIN-code: 9023-6473. E-mail: maksim.donecz@mail.ru.

Василий Юрьевич Цыганков — канд. биол. наук, доцент, заведующий лабораторией экобиотехнологии Департамента пищевых наук и технологий Школы биомедицины, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток. <https://orcid.org/0000-0002-5095-7260>, SPIN-код: 5047-8410. E-mail: tsig_90@mail.ru.

Вероника Игоревна Кульшова — студентка 3-го курса Департамента пищевых наук и технологий Школы биомедицины, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток. <https://orcid.org/0000-0003-0745-8252>, SPIN-код: 7944-6020. E-mail: veronikakulshova@mail.ru.

Жозеф Элхури — студент 3-го курса Департамента фундаментальной медицины Школы биомедицины, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток. <https://orcid.org/0000-0003-0745-8252>, SPIN-код: 6953-4040. E-mail: khoury.joseph1998@gmail.com.

Мargarита Дмитриевна Боярова — канд. биол. наук, доцент Департамента пищевых наук и технологий Школы биомедицины, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток. <https://orcid.org/0000-0003-0496-7000>, SPIN-код: 8872-8933. E-mail: boyarova.m@mail.ru.

Александр Николаевич Гумовский — научный сотрудник лаборатории экобиотехнологии, инженер учебно-методического отдела Школы биомедицины, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток. <https://orcid.org/0000-0002-3414-2010>, SPIN-код: 4319-4728. E-mail: gumovskii.an@dvfu.ru.

Юлия Петровна Гумовская — канд. мед. наук, доцент Департамента фундаментальной медицины Школы биомедицины, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток. <https://orcid.org/0000-0002-5791-5493>, SPIN-код: 8381-4723. E-mail: nedobylskaya.yu@dvfu.ru.

Виктор Всеволодович Богатов — д-р биол. наук, академик РАН, главный научный сотрудник лаборатории пресноводной гидробиологии, Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, Владивосток. SPIN-код: 1475-6781. E-mail: vibogatov@mail.ru.

Лариса Аркадьевна Прозорова — канд. биол. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории пресноводной гидробиологии, Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, Владивосток. <https://orcid.org/0000-0003-2174-815X>, SPIN-код: 9054-2471. E-mail: lprozorova@mail.ru.

Елена Николаевна Чернова — канд. биол. наук, старший научный сотрудник лаборатории геохимии Тихоокеанского института географии ДВО РАН, доцент базовой кафедры химических и ресурсосберегающих технологий ШЕН ДВФУ, Владивосток. <https://orcid.org/0000-0003-4200-6278>, SPIN-код: 1026-1383. E-mail: elena@tigdvo.ru.

Евгения Васильевна Лысенко — канд. биол. наук, старший научный сотрудник лаборатории геохимии Тихоокеанского института географии ДВО РАН, Владивосток. <https://orcid.org/0000-0002-3192-9862>, SPIN-код: 7787-4592. E-mail: lysenko_tig@mail.ru.

Vasily Yu. Tsygankov — PhD, Associate Professor, Head of the Laboratory of Environmental Biotechnology, of the Department of Food Sciences and Technologies of the School of Biomedicine, Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia. <https://orcid.org/0000-0002-5095-7260>, SPIN-code: 5047-8410. E-mail: tsig_90@mail.ru.

Veronika I. Kulshova — 3rd year student of the Department of the Food Sciences and Technologies of the School of Biomedicine, Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia. <https://orcid.org/0000-0003-0745-8252>, SPIN-code: 7944-6020. E-mail: veronikakulshova@mail.ru.

Joseph Elkhoury — 3rd year student of the Department of Fundamental Medicine of the School of Biomedicine, Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia. <https://orcid.org/0000-0003-0745-8252>, SPIN-code: 6953-4040. e-mail: khoury.joseph1998@gmail.com.

Margarita D. Boyarova — PhD, Associate Professor, Department of the Food Sciences and Technologies of the School of Biomedicine, Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia. <https://orcid.org/0000-0003-0496-7000>, SPIN-code: 8872-8933. E-mail: boyarova.m@mail.ru.

Alexander N. Gumovsky — researcher of the Laboratory of Environmental Biotechnology, Engineer of the Training Department of the School of Biomedicine, Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia. <https://orcid.org/0000-0002-3414-2010>, SPIN-code: 4319-4728. E-mail: gumovskii.an@dvfu.ru.

Yulia P. Gumovskaya — PhD, Associate Professor of the Department of Fundamental Medicine of the School of Biomedicine, Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia. <https://orcid.org/0000-0002-5791-5493>, SPIN-code: 8381-4723. E-mail: nedobylskaya.yu@dvfu.ru.

Victor V. Bogatov — Academician of the Russian Academy of Sciences, D.Sc., principal investigator, Laboratory of Freshwater Hydrobiology, Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity FEB RAS, Vladivostok, Russia. SPIN-code: 1475-6781. E-mail: vibogatov@mail.ru.

Larisa A. Prozorova — PhD, leading researcher, Laboratory of Freshwater Hydrobiology, Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity FEB RAS, Vladivostok, Russia. <https://orcid.org/0000-0003-2174-815X>, SPIN-code: 9054-2471. E-mail: lprozorova@mail.ru.

Elena N. Chernova — PhD, senior researcher, Laboratory of Geochemistry, Pacific Geographical Institute, Associate Professor of the Basic Department of Chemical and Resource-Saving Technologies, School of Natural Sciences, Vladivostok, Russia. <https://orcid.org/0000-0003-4200-6278>, SPIN-code: 1026-1383. E-mail: elena@tigdvo.ru.

Eugenia V. Lysenko — PhD, researcher, Laboratory of Geochemistry, Pacific Geographical Institute, Vladivostok, Russia. <https://orcid.org/0000-0002-3192-9862>, SPIN-code: 7787-4592. E-mail: lysenko_tig@mail.ru.

Нго Куан Куанг — д-р наук, начальник отдела экологического менеджмента и технологии, Институт тропической биологии, Вьетнамская академия науки и технологии, Хошимин, Вьетнам; профессор, заведующий кафедрой, Университет науки и технологии, Вьетнамская академия науки и технологии, Ханой, Вьетнам. <https://orcid.org/0000-0003-2587-1999>. E-mail: ngoxuanq@gmail.com.

Ngo Xuan Quang — PhD, Head of Department, Institute of Tropical Biology, Vietnam Academy of Science and Technology, Ho Chi Minh City, Vietnam; Associate Professor of the Graduate University of Science and Technology, Vietnam Academy of Science and Technology, Ha Noi, Vietnam. <https://orcid.org/0000-0003-2587-1999>. E-mail: ngoxuanq@gmail.com.

✉ **Контактное лицо / Corresponding author**

Максим Михайлович Донец / Maxim M. Donets
E-mail: maksim.donecz@mail.ru