

Научная статья
УДК 574.2
<https://doi.org/10.24143/2073-5529-2022-4-22-28>
EDN KPDPTQ

Биогеохимический мониторинг содержания химических элементов Каспийского моря

Александр Николаевич Неваленный, Татьяна Сергеевна Ершова ,
Вячеслав Федорович Зайцев, Владимир Александрович Чаплыгин*

*Астраханский государственный технический университет,
Астрахань, Россия, ershova_ts@mail.ru**

Аннотация. Целью работы было проведение биогеохимического мониторинга содержания тяжелых металлов в экосистеме северо-западной части Каспийского моря. Объектами исследования были морская вода и донные отложения Каспийского моря, различные виды ракообразных, моллюсков, рыб, а также каспийский тюлень. В результате исследований были выявлены металлоконирующие организмы в Каспийском море, например гаммарусы (аккумуляторы цинка), креветки (меди), крабы (свинца и никеля), баянусы (ртути, свинца и кадмия); моллюски рода *Didacna* накапливают в основном цинк, кадмий и ртуть; митилястер – медь и кобальт; церастодерма – свинец; вобла – концентратор цинка и ртути, пуголовка – свинца и марганца, рыба-игла – меди, свинца и кадмия, килька – цинка и ртути. Выявлены особенности накопления металлов в гидробионтах: цинк, свинец и кадмий накапливаются преимущественно беспозвоночными животными; медь, кобальт и марганец в наибольшей степени накапливают представители класса *Crustacea*, никель – представители типа *Mollusca*; ртуть в наибольшей степени накапливается позвоночными животными. Выявлены закономерности в распределении концентраций химических элементов в органах и тканях гидробионтов, занимающих вершины трофических пирамид: цинк, медь и ртуть преимущественно накапливаются в печени; кобальт, никель, цинк, свинец и кадмий – в почках; свинец, кобальт и марганец – в жабрах; в мышечной ткани – ртуть. У *Phoca caspica* свинец накапливается в жировой ткани и легких, цинк, медь, кобальт, марганец, хром и ртуть – в печени, никель, свинец и кадмий – в почках. На основании рассчитанных коэффициентов накопления химических элементов отмечено, что ртуть и цинк способны накапливаться практически во всех звеньях трофической цепи; медь, кобальт, никель, кадмий и свинец накапливаются в основном беспозвоночными организмами; хром и марганец аккумулируются в большей степени в донных отложениях.

Ключевые слова: тяжелые металлы, биогеохимический мониторинг, Каспийское море, ракообразные, моллюски, рыбы, каспийский тюлень

Благодарности: работа выполнена в ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет» в рамках фундаментальных научных исследований по темам госзадания «Исследования накопления тяжелых металлов в промысловых видах рыб Каспийского моря» (№ АААА-А18-118031290038-6); «Исследование содержания тяжелых металлов в кормовой базе и промысловой ихтиофауне Каспийского моря» (№ АААА-А20-120032590074-3).

Для цитирования: Неваленный А. Н., Ершова Т. С., Зайцев В. Ф., Чаплыгин В. А. Биогеохимический мониторинг содержания химических элементов Каспийского моря // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2022. № 4. С. 22–28. <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2022-4-22-28>. EDN KPDPTQ.

Original article

Biogeochemical monitoring of composition of chemical elements in Caspian Sea

Aleksandr N. Nevalenny, Tatiana S. Ershova ,
Vyacheslav F. Zaitsev, Vladimir A. Chaplygin*

*Astrakhan State Technical University,
Astrakhan, Russia, ershova_ts@mail.ru**

Abstract. The aim of the research was to conduct biogeochemical monitoring of heavy metals composition in the ecosystem of the northwestern part of the Caspian Sea. The objects of the research were the water of the northwestern part of the Caspian Sea, bottom sediments, different types of crustaceans, mollusks, fish, as well as the Caspian seal. As a result of the research, metal concentrating aquatic organisms in the Caspian Sea were identified. Thus, gammarus accumulates Zn, shrimp – Cu, crab – Pb and Ni, balanus – Hg, Pb, Cd; mollusk *Didacna* accumulates mainly Zn, Cd, and Hg; mytilaster – Cu, Co; cerastoderma – Pb; vobla – Zn and Hg; benthophilus – Pb and Mn; needlefish – Cu, Pb, Cd, and sprat – Zn and Hg. Specific features of metal accumulation by hydrobionts have been found out: Zn, Pb and Cd are accumulated mainly by invertebrates; Cu, Co, Mn are accumulated to the greatest extent by representatives of *Crustacea*; Ni – by *Mollusca* species; Hg is accumulated to the greatest extent by vertebrates. There have been revealed the regularities in distribution of chemical elements concentrations in the organs and tissues of aquatic organisms occupying the tops of the trophic pyramids: Zn, Cu, Hg are predominantly accumulated in the liver, Co, Ni, Zn, Pb and Cd are accumulated in the kidneys, Pb, Co, Mn are accumulated in the gills, Hg – in muscle tissues. In *Phoca caspica* Pb accumulates in the adipose tissue and lungs, Hg, Cu, Zn, Mn, Cr, and Co – in the liver, and Pb, Cd and Ni – in the kidneys. Taking into account the calculated coefficients of chemical elements accumulation, it was inferred that Hg and Zn can accumulate in almost all links of the trophic chain; Cu, Co, Ni, Cd, Pb are accumulated mainly by invertebrates; Cr and Mn accumulate to a greater extent in bottom sediments.

Keywords: heavy metals, biogeochemical monitoring, Caspian Sea, crustaceans, mollusks, fish, Caspian seal

Acknowledgment: the research was carried out under FSBEI HE “Astrakhan State Technical University” within the framework of fundamental scientific research on the topics of the state assignment “Research of accumulating the heavy metals in commercial fish species of the Caspian Sea” (No. AAAA-A18-118031290038-6); “Studying the concentration of heavy metals in the food base and commercial ichthyofauna of the Caspian Sea” (No. AAAA-A20-120032590074-3).

For citation: Nevalenny A. N., Ershova T. S., Zaitsev V. F., Chaplygin V. A. Biogeochemical monitoring of composition of chemical elements in Caspian Sea. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing Industry.* 2022;4:22-28. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2022-4-22-28>. EDN KPDPTQ.

Введение

В современных экологических условиях оценка глобальных биосферных процессов, а также эволюции биогеохимических циклов в результате антропогенного изменения биосферы становится актуальной задачей [1–5]. Распространение химических элементов в составляющих экосистемы зависит, в первую очередь, от живых организмов, которые вовлекают их в трофический круговорот, способствуя их биодоступности [6, 7].

В современный период биогеохимическая оценка гидроэкосистем приобретает приоритетное направление в экологии.

Каспийское море выступает как особая биогеохимическая провинция с особым химическим составом морской среды и геохимическими барьерами в области смешения речных и морских вод [8, 9]. Актуальность работы заключается в исследовании закономерностей миграции химических элементов из абиотической среды в биотическую среду Каспийского моря.

Шельф Каспийского моря является центром активности крупнейших нефтяных компаний многих государств. Вследствие этого экосистема Каспийского моря испытывает высокую экологическую нагрузку, в том числе из-за загрязнения тяжелыми металлами, сопутствующими нефтедобыче (отходы бурения и нефтедобычи) [10, 11].

Морская вода и донные отложения – приоритетные источники химических элементов, в частности и тяжелых металлов, для водных организмов, поэтому концентрации химических элементов в организмах зависят от содержания этих элементов в их среде обитания [12, 13]. В связи с этим выявление гидробионтов – аккумуляторов тяжелых металлов позволяет использовать их в биогеохими-

ческом мониторинге Каспийского моря. Биогеохимический мониторинг уже применяется на фоновых территориях и территориях, подверженных антропогенному воздействию. Многие авторы – Г. А. Леонова [4]; Г. А. Леонова, В. А. Бычинский [14]; Г. А. Леонова, Г. А. Аношин, В. А. Бычинский [5]; Т. И. Моисеенко и др. [15], В. В. Ермаков, С. Ф. Тютиков [16] – указывают на возможность использования живых организмов, в частности гидробионтов, в качестве тест-объектов.

Целью данной работы являлось определение содержания химических элементов в различных компонентах экосистемы Каспийского моря.

Материалы и методы исследования

Объектами исследования служили морская вода, илистые, ракушечные и песчаные донные отложения Каспийского моря, а также гидробионты, занимающие вершины трофических пирамид в экосистеме Каспийского моря: осетры (*Acipenser persicus*, *Acipenser gueldenstaedtii*), сельди (*Alosa braschnikowi*, *Alosa kessleri kessleri*), каспийская нерпа *Phoca caspica* и некоторые объекты их питания: моллюски: моллюски рода *Didacna*, *Cerastoderma lamarcki*, *Mytilaster lineatus*; ракообразные: ракообразные рода *Gammarus*, *Balanus improvisus*, *Saduria entomon*, *Rhithropanopeus harrisi*, *Palaemon adspersus*; рыбы-бентофаги: *Neogobius fluviatilis*, *Neogobius caspius*, *Benthophilus macrocephalus*, *Rutilus rutilus caspicus*, рыбы-планктофаги: *Clupeonella caspia*, *Atherina mochon caspia*, *Syngnathus abaster caspius*.

Сбор материала осуществлялся в северо-западной части Каспийского моря с 2011 по 2020 гг. Количество точек отбора проб составляло 74. В этих точках отбора собрано 1 502 пробы воды, 1 648 проб донных отложений, 5 873 пробы биологических объектов.

Пробы органов каспийской нерпы взяты от погибших животных на Дагестанском побережье Каспийского моря.

Содержание химических элементов в объектах исследования определяли на базе Астраханского государственного технического университета, а в органах и тканях погибших тюленей – также и на базе Дагестанского государственного университета методом атомно-абсорбционной спектрометрии.

Результаты исследований

Геохимическая экология, основоположником которой считается В. В. Ковальский [12, 13], отражает связь между организмами и природно-техногенной средой. Эта связь представлена в виде биогенной миграции химических элементов в биогеохимической трофической цепи.

Согласно биогеохимическим принципам В. И. Вернадского [6], живые организмы выполняют определенные функции в биосфере. Так, например, средообразующая функция живых организмов состоит в формировании геохимических свойств среды обитания [17]. В то же время формирование геохимических свойств среды обитания обусловлено и абиотическими факторами. Главным источником химических элементов для гидробионтов является среда их обитания, а именно донные отложения и вода, поэтому элементный состав организмов отражает содержание этих химических элементов в окружающей среде [12].

Из результатов проведенных исследований следует, что в северо-западной части Каспийского моря содержание изученных химических элементов в воде не превышает предельно допустимых значений, утвержденных Приказом Минсельхоза России № 552 от 13 декабря 2016 г. [18]. По сравнению с 2014 г., по данным Е. В. Островской с соавторами [8], концентрация ртути увеличилась в 1,5 раза. Концентрации в морской воде Cu, Mn, Zn за последний период времени практически не изменились. В то же время содержание Ni, Pb, Cd снизилось в 3; 1,5; 2,3 раза соответственно. Отмечено, что концентрации исследованных химических элементов не превышают их кларки для морской воды, определенные А. П. Виноградовым [19]. В то же время концентрации ртути и никеля выше соответствующих кларковых значений примерно в 3 и 2 раза соответственно.

Накопление химических элементов в районе зоны смешения пресных и морских вод является результатом функционирования маргинального фильтра, естественного барьера на пути поступления материковых загрязнений [8]. Здесь происходит осаждение до 80–90 % взвешенных и 35–40 % растворенных форм металлов [19].

Донные отложения северной части Каспийского моря являются аккумуляторами Pb (9 мг/кг сухого вещества), Zn (11 мг/кг сухого вещества), Ni (15 мг/кг сухого вещества), Cr (14 мг/кг сухого

вещества) и Mn (98 мг/кг сухого вещества), а донные отложения средней части – Cd (0,8 мг/кг сухого вещества), Cu (12 мг/кг сухого вещества) и Hg (0,009 мг/кг сырого вещества). Выявленные различия в концентрациях кобальта в донных отложениях исследованных районов Каспийского моря статистически не значимы ($p > 0,05$). Известно, что основным фактором, влияющим на процесс адсорбции многих химических элементов донными отложениями северной части Каспийского моря, является градиент солености. Из-за речного стока соленость северо-западной части Каспийского моря составляет от 1–2 до 8 ‰, в то время как соленость Среднего Каспия – 10–12 ‰. В связи с этим площадь Северного Каспия является неким барьером, в котором происходит осаждение химических элементов, т. к., по мнению авторов [9, 20, 21], особенно четкое их убывание выявляется на самых ранних стадиях смешения вод ($S \leq 5$ ‰).

Илистые донные отложения Каспийского моря являются накопителями Mn (144 мг/кг сухого вещества), Zn (12,9 мг/кг сухого вещества), Ni (16 мг/кг сухого вещества), Cu (12 мг/кг сухого вещества), Pb (10,8 мг/кг сухого вещества), Cd (0,9 мг/кг сухого вещества), а ракушечные – Cr (15,7 мг/кг сухого вещества), Co (11 мг/кг сухого вещества), Hg (0,01 мг/кг сырого вещества) [22, 23].

Живые организмы, обладая определенным химическим составом, участвуют в миграции химических элементов, тем самым выполняя свою роль: рассеивают или концентрируют их в своем организме [17]. Химические элементы попадают в организм через биогеохимические пищевые цепи и выполняют в нем различные функции. При этом происходит их частичная трансформация в процессе обмена веществ, и в дальнейшем либо они аккумулируются тканями, либо выводятся с экскрементами [12, 24]. Таким образом, биохимическая функция живых организмов заключается в синтезе органических веществ, в который они вовлекают макро- и микроэлементы, концентрируя их или рассеивая [17]. Выявление гидробионтов – концентратов химических элементов позволяет использовать их в биогеохимическом мониторинге состояния экосистемы Каспийского моря.

Морская вода является основным источником микроэлементов для всех исследованных гидробионтов. В организм рыб химические элементы могут проникать осмотически – через жабры и кожу. Муцин слизи активно связывает тяжелые металлы, накапливая их на поверхности тела [15]. У рыб пищевой путь накопления химических элементов является основным. Кроме того, на основании рассчитанных коэффициентов накопления показано, что для изученных гидробионтов Каспийского моря донные отложения также являются источником химических элементов [25].

В таблице представлены организмы – концентраты химических элементов.

Организмы – концентраты химических элементов
Aquatic organisms - concentrators of chemical elements

Гидробионт	Химический элемент	Концентрация химических элементов, мг/кг сухого вещества
Ракообразные		
<i>Gammarus sp.</i>	Zn	103,9 ± 4,96
<i>Palaemon adspersus</i>	Cu	104,16 ± 5,84
<i>Rhithropanopeus harrisi</i>	Pb	40,77 ± 1,6
	Zn	79,92 ± 2,11
	Co	52 ± 4
	Mn	74 ± 21
<i>Balanus improvisus</i>	Pb	44 ± 1,5
Моллюски		
<i>Didacna sp.</i>	Ni	59,88 ± 10,12
	Cd	3 ± 0,2
<i>Mytilaster lineatus</i>	Pb	42 ± 2
<i>Cerastoderma lamarcki</i>	Pb	43,75 ± 2,35
Рыбы		
<i>Rutilus rutilus caspicus</i>	Zn	190,05 ± 8,13
<i>Syngnathus abaster caspius</i>	Cu	7,68 ± 1,1
	Pb	26,16 ± 4,05
	Co	33,99 ± 5,17
	Mn	36,7 ± 8,3
	Cd	0,9 ± 0,16
<i>Clupeonella caspia</i>	Zn	194,7 ± 4,25
	Hg	0,18 ± 0,001 мг/кг сырого вещества

Ранее Т. И. Моисеенко с соавторами [15] отмечала, что эссенциальные химические элементы имеют определенные особенности распределения в живом организме, которые зависят от совокупности экологических факторов. Большинство катионов металлов слабо всасывается в желудочно-кишечном тракте (ЖКТ). Однако, несмотря на низкую всасываемость ряда соединений металлов в ЖКТ животных, их высокое сродство к SH-, -S-S-, аминок группам и особенности циркуляции приводят к длительному пребыванию металлов в организме животных [24].

В результате исследования определены органы – аккумуляторы металлов, на которые также необходимо обращать внимание при биохимическом мониторинге морской экосистемы. Так, на примере рыб (русский осетр, персидский осетр, сельдь-черноспинка и долгинская сельдь) показано, что в печени преимущественно аккумулируются цинк, медь и ртуть, в почках – кобальт, никель, цинк, хром, свинец и кадмий, а в жабрах – свинец, кобальт и марганец, в мышечной ткани – ртуть. У каспийской нерпы свинец накапливается в жировой ткани и легких, цинк, медь, кобальт, марганец, хром и ртуть – в большей мере в печени, а свинец, кадмий, никель – в почках животных.

Отмечены видовые особенности в накоплении химических элементов в органах и тканях исследованных видов осетров. Видовая особенность персидского осетра, в отличие от русского, заключается в его способности к большему накоплению металлов (преимущественно цинка и ртути) в органах и тканях. Это связано, прежде всего, с его биологическими особенностями. Персидский осетр об-

ладает высоким темпом роста, условия его нагула несколько отличаются от русского. У обоих исследованных видов осетров значения концентраций ртути, марганца, меди в органах и тканях выше у самок ($p < 0,05$), а содержание цинка и кадмия выше у самцов ($p < 0,05$). С возрастом в жабрах увеличивается накопление меди и кобальта; в почках – кобальта; в печени – железа, цинка, кадмия и ртути у обоих видов рыб ($p < 0,05$).

У самок каспийской нерпы отмечены более высокие коэффициенты накопления некоторых химических элементов, чем у самцов. Например, самки исследованного животного, по сравнению с самцами, аккумулируют больше медь, кадмий и ртуть. В то же время выявленные половые различия в накоплении таких металлов, как Pb, Zn, Co, Ni, органами и тканями у нерпы не являются достоверными ($p > 0,05$). Отмечено, что с возрастом животного происходит повышение уровня накопления Zn, Cd, Hg, Cu, а значения концентраций Pb, Cr, Co снижается ($p < 0,05$).

Транспортная функция живых организмов связана с массопереносом вещества и биогенной миграцией химических элементов [17]. Коэффициенты накопления химических элементов представляют собой результат их биогеохимической миграции по уровням пищевых цепей.

Отмечено, что лучше всего по цепи питания исследованных видов осетров мигрируют цинк и ртуть. Для осетров рыбы-бентофаги являются источниками меди и никеля, рыбы-планктофаги – меди, а донные отложения – цинка, ртути и меди [25]. Поступление в организм осетров из кормовых организмов таких химических элементов, как марганец,

хром, кобальт, кадмий и свинец, несущественно. Марганец и хром аккумулируются преимущественно донными отложениями. Свинец, никель, кобальт и кадмий выше уровня беспозвоночных по трофической цепи не переходят.

Так же, как и у осетров, у сельдей отмечена миграция по пищевым звеньям цинка и ртути, причем для сельдевых видов рыб доля цинка, привносимая рыбами – объектами питания, мала. В связи с этим здесь его миграция практически не замечена. Отмечено, что как кормовые объекты рыбы-планктофаги и бентофаги для сельдевых рыб являются источником ртути, причем интенсивнее всего аккумулируют сельдевые рыбы этот металл из рыб-планктофагов. Переход свинца, кадмия и кобальта выше уровня беспозвоночных животных незначителен. Несмотря на то, что донные отложения не являются источником марганца для моллюсков, отмечен переход этого химического элемента в организм рыб-бентофагов.

Отмечена миграция ртути по всем звеньям трофической цепи каспийского тюленя. Так же, как и у осетровых и сельдевых рыб, миграция цинка относительно рыб не происходит, исключение составляют долгинская сельдь и сельдь-черноспинка, которые являются источником этого химического элемента в организме млекопитающего. Кадмий способен мигрировать в организм тюленя относительно всех объектов исследования. Свинец и никель выше уровня беспозвоночных животных не переходят. Медь, кобальт и хром поставляют в организм каспийского тюленя лишь исследованные позвоночные животные. Марганец достаточно сложно переходит по цепи питания млекопитающего: источником этого химического элемента для тюленя являются сельдь-черноспинка и долгинская сельдь.

Заключение

Полученные результаты исследования позволяют оценить способность гидробионтов Каспийского моря к накоплению в организме химических элементов и выявить организмы – концентраторы определенных металлов, в том числе и токсичных. Результаты исследования позволяют выявить особенности миграции химических элементов по трофическим цепям гидробионтов Каспийского моря.

На основании вышесказанного отмечено:

1. В донных отложениях северной части Каспийского моря происходит осаждение свинца, цинка,

никеля, хрома и марганца, а в средней части – кадмия, меди и ртути. Отмечено, что среди исследованных видов донных отложений аккумуляторами хрома, кобальта и ртути являлись ракушечные, а остальных изученных химических элементов (кадмий, свинец, никель, цинк, марганец и медь) – илистые донные отложения.

2. Выявлены организмы – концентраторы химических элементов в экосистеме Каспийского моря: гаммарусы являются аккумуляторами цинка, креветки – меди, а крабы – свинца, цинка, кобальта и марганца, баянусы – свинца; моллюски рода *Didacna* накапливают преимущественно никель и кадмий; митилястер и церастодерма – свинец; вобла является концентратором цинка; рыба-игла является аккумулятором меди, кобальта, марганца, свинца и кадмия, а килька – цинка и ртути.

3. Выявлены следующие особенности аккумуляции металлов в гидробионтах: цинк, свинец и кадмий накапливают преимущественно беспозвоночные животные; медь, кобальт и марганец в наибольшей степени аккумулируют представители класса *Crustacea*; никель концентрируется в представителях типа *Mollusca*; ртуть в наибольшей степени аккумулируется исследованными позвоночными животными; цинк и кадмий способны накапливаться с возрастом у исследованных видов рыб.

4. Выявлены особенности распределения концентраций металлов в органах и тканях гидробионтов, находящихся на вершинах трофических пирамид: в печени русского и персидского осетров преимущественно накапливаются цинк, медь и ртуть, в почках – кобальт, никель, свинец и кадмий, а в жабрах – свинец, кобальт и марганец, в мышечной ткани – ртуть. Долгинская сельдь и сельдь-черноспинка способны аккумулировать марганец, свинец и кадмий в жабрах, а цинк – в печени. У каспийской нерпы свинец аккумулируется в жировой ткани и легких, цинк, медь, кобальт, марганец, хром и ртуть – преимущественно в печени, а никель, свинец и кадмий – в почках.

5. Отмечено, что ртуть и цинк аккумулируются практически всеми звеньями трофической цепи; медь, кобальт, никель, кадмий и свинец накапливаются преимущественно беспозвоночными животными; хром и марганец в большей мере накапливаются донными отложениями.

Список источников

1. Безель В. С., Жуйкова Т. В., Гордеева В. А., Голоушкина Е. В. Биогеохимия импактных регионов: роль эдафических и фитоценологических факторов среды // Геохимия. 2020. Т. 65. № 10. С. 998–1008.
2. Ермаков В. В., Тютиков С. Ф., Сафонов В. А. Биогеохимическая индикация микроэлементов. М.: Наука, 2018. 386 с.
3. Коробова Е. М. Эколого-геохимические проблемы современной ноосферы. М.: Изд-во РАН, 2019. 122 с.

4. Леонова Г. А. Биогеохимическая индикация загрязнения водных экосистем тяжелыми металлами // Водные ресурсы. 2004. Т. 31. № 2. С. 215–222.
5. Леонова Г. А., Аношин Г. А., Бычинский В. А. Биогеохимические проблемы антропогенной химической трансформации водных экосистем // Геохимия. 2005. № 2. С. 182–196.
6. Вернадский В. И. Проблемы биогеохимии // Тр. биогеохим. лаб. 1980. Т. 16. 320 с.

7. Морозов Н. П. Химические элементы в гидробионтах и пищевых цепях // Биогеохимия океана. М.: Наука, 1983. С. 127–165.
8. Островская Е. В., Бреховских В. Ф., Волкова З. В. Загрязняющие вещества в водах Волжско-Каспийского бассейна. Астрахань: Издатель: Сорокин Роман Васильевич, 2017. 408 с.
9. Романкевич Е. А., Айбулатов Н. А. Геохимическое состояние морей России и здоровье человека // Вестн. отд. наук о земле РАН. 2004. № 1 (22). URL: <http://geo.web.ru/conf/khitariada/1-2004/scpub-5.pdf> (дата обращения: 10.09.2020).
10. Островская Е. В., Колмыков Е. В., Холина О. И. Углеводородное загрязнение северо-западной части Каспийского моря // Юг России: экология, развитие. 2016. № 11 (1). С. 137–148. URL: <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2016-1-137-148> (дата обращения: 15.04.2020).
11. Чуйко Е. В., Абдусаматов А. С. Особенности миграции тяжелых металлов в экосистеме Северного Каспия // Юг России: экология, развитие. 2013. № 8 (3). С. 110–116. URL: <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2013-3-110-116> (дата обращения: 15.04.2020).
12. Ковальский В. В. Геохимическая экология. М.: Наука, 1974. 420 с.
13. Ковальский В. В. Проблемы биогеохимии микроэлементов и геохимической экологии. Избранные труды. М.: Россельхозакадемия, 2009. 357 с.
14. Леонова Г. А., Бычинский В. А. Гидробионты Братского водохранилища как объекты мониторинга тяжелых металлов // Водные ресурсы. 1998. Т. 25. № 5. С. 603–610.
15. Моисеенко Т. И., Кудрявцева Л. П., Гашкина Н. А. Рассеянные элементы в поверхностных водах суши: технофильность, биоаккумуляция и экотоксикология. М.: Наука, 2006. 261 с.
16. Ермаков В. В., Тютиков С. Ф. Геохимическая экология животных. М.: Наука, 2008. 315 с.
17. Вернадский В. И. Живое вещество и биосфера. М.: Наука, 1994. 671 с.
18. Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения: Приказ Минсельхоза России № 552 от 13 декабря 2016 г. URL: https://www.chemanalytica.ru/f/prikaz_minselkhoza_rossii_ot_13122016_n_552_ob_utverzhdenii_pdk.pdf (дата обращения: 10.11.2022).
19. Виноградов А. П. Введение в геохимию океана. М.: Наука, 1967. 213 с.
20. Гордеев В. В. Речной сток в океан и черты его геохимии. М.: Наука, 1983. 160 с.
21. Лисицын А. П. Основные понятия биогеохимии океана // Биогеохимия океана. М.: Наука, 1983. С. 9–32.
22. Зайцев В. Ф., Ершова Т. С., Чаплыгин В. А. Содержание некоторых металлов в звеньях трофической сети Каспийского моря // Современные проблемы состояния и биогеохимической эволюции таксонов биосферы: материалы X Междунар. биогеохим. шк., посвящ. 70-летию ГЕОХИ РАН. М.: Изд-во ГЕОХИ РАН, 2017. С. 198–205.
23. Chaplygin V. A., Ershova T. S., Zaitsev V. F. Trace elements in the body of sturgeon in the Caspian Sea // 3rd International Symposium of Benthological Society of Asia (Vladivostok, Russian Federation, August 24–27, 2016): Abstract Book. Vladivostok: Dalnauka, 2016. P. 42.
24. Войнар А. И. Биологическая роль микроэлементов в организме животных и человека. М.: Высш. шк., 1960. 544 с.
25. Чаплыгин В. А., Хурсанов А. С., Ершова Т. С., Зайцев В. Ф. Коэффициенты накопления химических элементов в органах и тканях русского (*Acipenser gueldenstaedtii*, Brandt, 1833) и персидского (*Acipenser persicus*, Borodin, 1897) осетров Каспийского моря // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Рыбное хозяйство. 2021. № 2. С. 100–106. URL: <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2021-2-104-115> (дата обращения: 12.09.2022).

References

1. Bezel' V. S., Zhuikova T. V., Gordeeva V. A., Goloushkina E. V. Biogekhimiia i fitosentoticheskikh faktorov sredi [Biogeochemistry of impact regions: role of edaphic and phytocenotic environmental factors]. *Geokhimiia*, 2020, vol. 65, no. 10, pp. 998-1008.
2. Ermakov V. V., Tiutikov S. F., Safonov V. A. *Biogekhimicheskaya indikatsiia mikroelementozov* [Biogeochemical indication of microelementoses]. Moscow, Nauka Publ., 2018. 386 p.
3. Korobova E. M. *Ekologo-geokhimicheskie problemy sovremennoi noosfery* [Ecological and geochemical problems of modern noosphere]. Moscow, Izd-vo RAN, 2019. 122 p.
4. Leonova G. A. Biogekhimicheskaya indikatsiia zagriazneniia vodnykh ekosistem tiazhelymi metallami [Biogeochemical indication of pollution of water ecosystems by heavy metals]. *Vodnye resursy*, 2004, vol. 31, no. 2, pp. 215-222.
5. Leonova G. A., Anoshin G. A., Bychinskii V. A. Biogekhimicheskie problemy antropogennoi khimicheskoi transformatsii vodnykh ekosistem [Biogeochemical problems of anthropogenic chemical transformation of aquatic ecosystems]. *Geokhimiia*, 2005, no. 2, pp. 182-196.
6. Vernadskii V. I. Problemy biogekhimii [Problems of biogeochemistry]. *Trudy biogekhimicheskoi laboratorii*, 1980, vol. 16, 320 p.
7. Morozov N. P. Khimicheskie elementy v gidrobiontakh i pishchevykh tsepiakh [Chemical elements in hydrobiota and food chains]. *Biogekhimiia okeana*. Moscow, Nauka Publ., 1983. Pp. 127-165.
8. Ostrovskaia E. V., Brekhovskikh V. F., Volkova Z. V. *Zagriazniiaiushchie veshchestva v vodakh Volzhsko-Kaspiiskogo basseina* [Pollutants in waters of Volga-Caspian basin]. Astrakhan', Izdatel': Sorokin Roman Vasil'evich, 2017. 408 p.
9. Romankevich E. A., Aibulato N. A. Geokhimicheskoe sostoiianie morei Rossii i zdorov'e cheloveka [Geochemical state of Russian seas and human health]. *Vestnik otdeleniia nauk o zemle RAN*, 2004, no. 1 (22). Available at: <http://geo.web.ru/conf/khitariada/1-2004/scpub-5.pdf> (accessed: 10.09.2020).
10. Ostrovskaia E. V., Kolmykov E. V., Kholina O. I. Uglevodородное zagriaznenie severo-zapadnoi chasti Kaspiiskogo moria [Hydrocarbon pollution of northwestern part of Caspian Sea]. *Iug Rossii: ekologiya, razvitie*, 2016, no. 11 (1), pp. 137-148. Available at: <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2016-1-137-148> (accessed: 15.04.2020).
11. Chuiiko E. V., Abdusamadov A. S. Osobennosti migratsii tiazhelykh metallov v ekosisteme Severnogo Kaspiia [Characteristics of migration of heavy metals in ecosystem of Northern Caspian]. *Iug Rossii: ekologiya, razvitie*, 2013, no. 8 (3), pp. 110-116. Available at: <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2013-3-110-116> (accessed: 15.04.2020).
12. Koval'skii V. V. *Geokhimicheskaya ekologiya* [Geochemical ecology]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 420 p.

13. Koval'skii V. V. *Problemy biogeokhimii mikroelementov i geokhimicheskoi ekologii. Izbrannye trudy* [Problems of biogeochemistry of microelements and geochemical ecology. Selected works]. Moscow, Rossel'khozakademiia Publ., 2009. 357 p.
14. Leonova G. A., Bychinskii V. A. *Gidrobionty Bratskogo vodokhranilishcha kak ob"ekty monitoringa tiazhelykh metallov* [Hydrobionts of Bratsk Reservoir as objects of monitoring of heavy metals]. *Vodnye resursy*, 1998, vol. 25, no. 5, pp. 603-610.
15. Moiseenko T. I., Kudriavtseva L. P., Gashkina N. A. *Rasseiannye elementy v poverkhnostnykh vodakh sushii: tekhnofil'nost', bioakkumulatsiia i ekotoksikologiya* [Dispersed elements in surface waters of land: technophilicity, bioaccumulation and ecotoxicology]. Moscow, Nauka Publ., 2006. 261 p.
16. Ermakov V. V., Tiutikov S. F. *Geokhimicheskaiia ekologiya zhivotnykh* [Geochemical ecology of animals]. Moscow, Nauka Publ., 2008. 315 p.
17. Vernadskii V. I. *Zhivoe veshchestvo i biosfera* [Living matter and biosphere]. Moscow, Nauka Publ., 1994. 671 p.
18. *Ob utverzhenii normativov kachestva vody vodnykh ob"ektov rybokhoziaistvennogo znachenii, v tom chisle normativov predel'no dopustimyykh kontsentratsii vrednykh veshchestv v vodakh vodnykh ob"ektov rybokhoziaistvennogo znachenii: Prikaz Minsel'khoza Rossii № 552 ot 13 dekabrya 2016 g.* [On Approval of Water Quality Standards for Water Bodies of Fishery Significance, including standards for maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of water bodies of fishery significance: Order of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation No. 552 dated 13.12. 2016]. Available at: https://www.chemanalytica.ru/f/prikaz_minselkhoza_rossii_ot_13122016_n_552_ob_utverzhenii_pdk.pdf (accessed: 10.11.2022).
19. Vinogradov A. P. *Vvedenie v geokhimiю okeana* [Introduction to ocean geochemistry]. Moscow, Nauka Publ., 1967. 213 p.
20. Gordeev V. V. *Rechnoi stok v okean i cherty ego geokhimii* [River flow into ocean and features of its geochemistry]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 160 p.
21. Lisitsyn A. P. *Osnovnye poniatia biogeokhimii okeana* [Basic concepts of ocean biogeochemistry]. *Biogeokhimiia okeana*. Moscow, Nauka Publ., 1983. Pp. 9-32.
22. Zaitsev V. F., Ershova T. S., Chaplygin V. A. *Soderzhanie nekotorykh metallov v zven'iax troficheskoi seti Kaspiiskogo moria* [Concentration of metals in links of trophic net of Caspian Sea]. *Sovremennye problemy sostoianiia i biogeokhimicheskoi evoliutsii taksonov biosfery: materialy X Mezhdunarodnoi biogeokhimicheskoi shkoly, posviashchennoi 70-letiiu GEOKhI RAN*. Moscow, Izd-vo GEOKhI RAN, 2017. Pp. 198-205.
23. Chaplygin V. A., Ershova T. S., Zaitsev V. F. *Trace elements in the body of sturgeon in the Caspian Sea. 3rd International Symposium of Benthological Society of Asia (Vladivostok, Russian Federation, August 24–27, 2016): Abstract Book*. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2016. P. 42.
24. Voinar A. I. *Biologicheskaiia rol' mikroelementov v organizme zhivotnykh i cheloveka* [Biological role of trace elements in bodys of animals and humans]. Moscow, Vysshaia shkola Publ., 1960. 544 p.
25. Chaplygin V. A., Khursanov A. S., Ershova T. S., Zaitsev V. F. *Koeffitsienty nakopleniia khimicheskikh elementov v organakh i tkaniakh russkogo (Acipenser gueldenstaedtii, Vrandt, 1833) i persidskogo (Acipenser persicus, Vorodin, 1897) osetrov Kaspiiskogo moria* [Accumulation coefficients of chemical elements in organs and tissues of Russian sturgeon (*Acipenser gueldenstaedtii*, Brandt, 1833) and Persian sturgeon (*Acipenser persicus*, Borodin, 1897) in Caspian Sea]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Rybnoe khoziaistvo*, 2021, no. 2, pp. 100-106. Available at: <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2021-2-104-115> (accessed: 12.09.2022).

Статья поступила в редакцию 03.05.2022; одобрена после рецензирования 24.11.2022; принята к публикации 28.11.2022
The article is submitted 03.05.2022; approved after reviewing 24.11.2022; accepted for publication 28.11.2022

Information about the authors / Информация об авторах

Александр Николаевич Неваленный – доктор биологических наук, профессор; профессор кафедры гидробиологии и общей экологии; Астраханский государственный технический университет; rector@astu.org

Татьяна Сергеевна Ершова – кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры гидробиологии и общей экологии; Астраханский государственный технический университет; ershova_ts@mail.ru

Вячеслав Федорович Зайцев – доктор сельскохозяйственных наук, профессор; заведующий кафедрой гидробиологии и общей экологии; Астраханский государственный технический университет; v.zaitsev@astu.org

Владимир Александрович Чаплыгин – кандидат биологических наук; доцент кафедры гидробиологии и общей экологии; Астраханский государственный технический университет; v.zaitsev@astu.org

Aleksandr N. Nevalenny – Doctor of Sciences in Biology, Professor; Professor of the Department of Hydrobiology and General Ecology; Astrakhan State Technical University; rector@astu.org

Tatiana S. Ershova – Candidate of Sciences in Biology, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Hydrobiology and General Ecology; Astrakhan State Technical University; ershova_ts@mail.ru

Vyacheslav F. Zaitsev – Doctor of Sciences in Agriculture, Professor; Head of the Department of Hydrobiology and General Ecology; Astrakhan State Technical University; v.zaitsev@astu.org

Vladimir A. Chaplygin – Candidate of Sciences in Biology; Assistant Professor of the Department of Hydrobiology and General Ecology; Astrakhan State Technical University; v.zaitsev@astu.org