

УДК 594:543.215

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ КАТИОНОВ (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ и K^+) В ВОДЕ НА УРОВЕНЬ ОКИСЛИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТКАНЯХ ДВУСТВОРЧАТЫХ МОЛЛЮСКОВ СЕМ. DREISSENIDAE

© 2023 г. А. С. Соколова^а *, О. Л. Цельмович^а, Д. В. Микряков^а

^аИнститут биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН,
Россия 152742 Ярославская обл., Некоузский р-н, пос. Борок

*e-mail: Aleksandrasokol@rambler.ru

Поступила в редакцию 29.04.2022 г.

После доработки 14.11.2022 г.

Принята к публикации 21.11.2022 г.

Представлены результаты изучения влияния содержания катионов Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ и K^+ в воде на уровень продуктов перекисного окисления липидов и антиоксидантов в тканях двустворчатых моллюсков *Dreissena bugensis* и *D. polymorpha*. Отлов моллюсков проводили на четырех акваториях Горьковского водохранилища, отличающихся концентрациями катионов Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ и K^+ . Установлена корреляционная связь между количественными показателями катионов в воде и интенсивностью перекисных процессов, с одной стороны, и уровнем общей антиокислительной активности в тканях моллюсков, с другой. Зафиксированы статистически значимые межвидовые различия исследованных показателей у моллюсков из участков с повышенной концентрацией катионов.

Ключевые слова: Горьковское водохранилище, концентрации катионов Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ и K^+ , двустворчатые моллюски *D. bugensis* и *D. polymorpha*, перекисное окисление липидов, антиокислительная активность

DOI: 10.31857/S0367059723020129, **EDN:** MZSERK

Минеральный состав воды – важный экологический фактор, влияющий на рост, развитие и физиологические процессы в организме гидробионтов. Показатели водно-солевого обмена – надежные индикаторы физиологического состояния гидробионтов, помогают определять происхождение вида, степень его устойчивости и способность к адаптации [1–8].

Жизнедеятельность и выживание моллюсков обусловлены наличием специализированных структур и систем, осуществляющих активный транспорт катионов Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ и K^+ из внешней среды в организм. Наряду с другими неорганическими элементами они необходимы для осуществления жизнедеятельности организма, поддерживая осмотический, ионный и кислотно-щелочной баланс. Пороговые уровни катионов в воде определяют границы ареала моллюсков в природных условиях. Установлено, что расселение дрейссенид в пресные водоемы лимитируется концентрацией ионов кальция в воде менее 14 мг/дм³ [9]. Также изучены межвидовые различия *D. bugensis* и *D. polymorpha* по устойчивости к воде с низкой минерализацией. Для этих видов определены отличия минимальных концентраций различных ионов в воде, необходимые для

поддержания ионного баланса между организмом и средой [9]. Показано [10, 11], что для выживания и роста европейской популяции *D. polymorpha* необходимы концентрации Ca^{2+} выше 15 мг/дм³.

При совместном поселении двух видов дрейссенид, как правило, *D. bugensis* доминирует над *D. polymorpha*. Это связано с толерантностью первого вида к заиленному дну, устойчивостью к недостатку кислорода, высокими темпами роста и скорости фильтрации, более эффективной способностью захвата пищи из воды в условиях ее пониженной концентрации и др. [9, 12–14].

Однако в доступной литературе не обнаружены данные по воздействию изменения концентраций катионов Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ и K^+ в воде на интенсивность различных метаболических процессов в организме моллюсков. Особенно важно исследовать прооксидант-антиоксидантную систему, которая поддерживает динамическое равновесие окислительно-восстановительного баланса и регулирует метаболические процессы в организме. При воздействии стресс-факторов происходит активация окислительных процессов, которая связана с избыточным накоплением активных форм кислорода (АФК). Избыток АФК (супероксидный и гидроксильный радикалы,

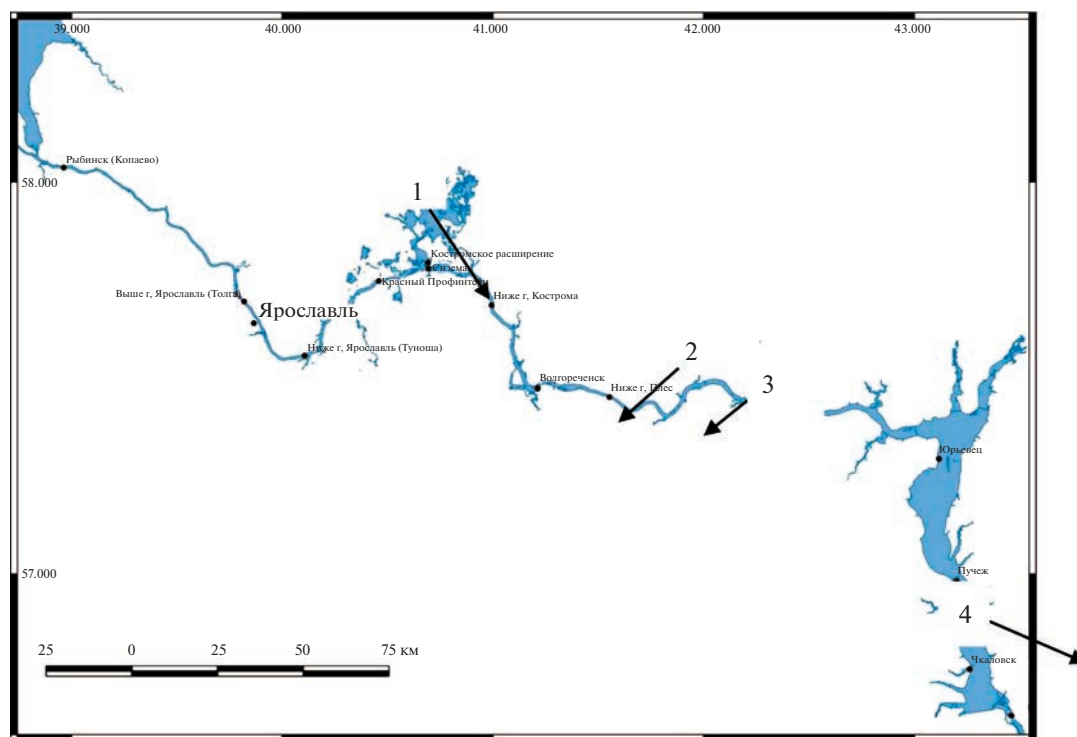


Рис. 1. Карта Горьковского водохранилища. Здесь и на рис. 2 и 3 станции: 1 – Костромское расширение, 2 – г. Волгореченск, 3 – ниже г. Плес, 4 – г. Пучеж.

синглетный кислород, пероксиды и многие другие соединения) становится причиной активации перекисного окисления липидов, инактивации структур антиокислительной защиты и нарушения динамического равновесия в системе прооксидант–антиоксидант в сторону образования оксидантов. Согласно существующим представлениям [15–20], антиокислительная защита осуществляется антиоксидантной системой клеток и тканей (антиоксидантными ферментами: супероксиддисмутазой, каталазой, глутатионпероксидазой, глутатион S-трансферазой) и низкомолекулярными антиоксидантными соединениями (α -токоферолом, восстановленным глутатионом, фенольной формой коэнзима Q_{10} , β -каротином, аскорбиновой кислотой и др.). Поэтому такие исследования позволят получить новую информацию о биохимических механизмах устойчивости моллюсков к изменению среды обитания.

Цель работы – изучить влияние концентрации ионов Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ и K^+ в воде на уровень окислительных процессов в тканях двустворчатых моллюсков сем. *Dreissenidae*.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследование проводили в ходе комплексной гидробиологической экспедиции (август 2018 г.) на научно-исследовательском судне “Академик

Топчиев” ИБВВ РАН. В качестве полигона использовали акваторию Горьковского водохранилища. Разные участки данного водоема отличаются неоднородностью химического состава, обусловленной наличием различных водных масс [21]. Отбор воды и отлов моллюсков проводили на четырех станциях: 1 – Костромское расширение, 2 – г. Волгореченск, 3 – ниже г. Плес, 4 – г. Пучеж (рис. 1), которые различались по гидрофизическим характеристикам (табл. 1). Первые три станции относятся к озерно-речной части водохранилища, а четвертая – к озерной. Пробы воды отбирали батометром из поверхностного (0.5 м) горизонта.

Сравнение концентраций главных ионов в воде из придонного и поверхностного слоев показало, что различия между ними не превышают погрешность метода измерений [22]. В результате было принято решение ограничиться отбором проб воды только из поверхностного горизонта. Пробы воды отбирали в полипропиленовые флаконы емкостью 20 мл с плотной крышкой и хранили при комнатной температуре. Дальнейшие исследования проводили в лабораторных условиях. Перед анализом в соответствии с методикой выполнения измерений воду фильтровали через мембранный фильтр с диаметром пор 0.2 мкм. Определение катионов выполнено методом капиллярного электрофореза на приборе “Капель 103 P”. За результат

Таблица 1. Характеристика места отбора проб

Станция	Глубина, м	T , °C	O_2 , мг/л	Прозрачность, см	Цветность, град
1. Костромское расширение	3.5	20.0	4.83	20	45
2. Город Волгореченск	17.00	21.2	7.28	100	60
3. Ниже города Плес	17.00	21.3	7.53	130	55
4. Город Пучеж	14.00	20.0	6.72	130	55

принимали среднее арифметическое двух параллельных измерений. Точность измерений оценивали по стандартным образцам, приготовленным из растворов ГСО (Государственные стандартные образцы) с аттестованными значениями определяемых катионов.

Половозрелых моллюсков отлавливали при помощи модифицированного дночерпателя Экмана-Берджа (ДАК-250) с площадью захвата $1/40 \text{ м}^2$, по 1–5 подъемов на каждой станции. После вылова мягкие ткани отделяли от раковины и сразу замораживали в морозильной камере при температуре $-18...-22^\circ\text{C}$. В лабораторных условиях непосредственно перед анализом пробы размораживали при комнатной температуре. Для дальнейшего исследования отбирали ткани моллюсков размером 15–20 мм. С каждой станции готовили по 10 суммарных гомогенатов от 5–15 моллюсков одного вида и размера без учета пола на 0.6%-ном физрастворе в соотношении 1 : 6 (масса к объему).

Об интенсивности перекисного окисления липидов (ПОЛ) судили по накоплению малонового диальдегида (МДА). Концентрацию МДА определяли в гомогенатах тканей на основе учета количества продуктов ПОЛ, реагирующих с тиобарбитуровой кислотой и дающих с ней окрашенный комплекс. Интенсивность окрашивания оценивали спектрофотометрически по изменению максимума поглощения при длине волны 535 нм. Содержание МДА вычисляли с учетом коэффициента молярной экстинкции ($1.56 \times 10^5 \text{ М}^{-1} \text{ см}^{-1}$) и выражали в наномолях на 1 г ткани [23].

Общую антиокислительную активность (ОАА) оценивали по кинетике окисления субстрата восстановленной формы 2,6-дихлорфенолиндофенола кислородом воздуха по общепринятой методике. Сущность метода заключается в том, что чем выше скорость окисления субстрата в присутствии биологического материала, тем ниже содержание антиоксидантов в тканях. Константу ингибирования окисления субстрата (КОС), являющуюся показателем ОАА ткани, определяли относительно контроля по формуле: $K_i = K_{\text{кон}} - K_{\text{оп}}/C$, где $K_{\text{кон}}$ и $K_{\text{оп}}$ – константы скорости окисления субстрата соответственно в контроле и опыте; C – концентрация гомогената в кювете [24].

Статистическая и графическая обработка данных проведена с помощью прикладных программ Microsoft Office Excel 2010, Statistica 6.0. Для выявления видовых различий применяли непараметрический критерий U Манна-Уитни. Статистическую значимость различий оценивали при $p < 0.05$. Связь между показателями моллюсков и уровнем Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ и K^+ определяли методом ранговой корреляции Спирмена.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Содержание ионов в воде. Проведенный анализ воды из исследуемых акваторий показал наиболее высокое содержание катионов Ca^{2+} (от 24.44 до 36.48 мг/дм³). Далее в порядке убывания следуют Mg^{2+} (от 7.94 до 12.08 мг/дм³) и Na^+ (от 3.85 до 6.8 мг/дм³). Для данного водоема содержание катионов K^+ мало вариабельно – его значение не превышает 2 мг/дм³. При этом стоит отметить различия концентрации ионов в воде на разных станциях. Разброс содержания катионов зависел от количественных показателей: наибольший – Ca^{2+} , а наименьший – K^+ . На станции 4 зафиксировано самое высокое содержание ионов Ca^{2+} (36.48), Mg^{2+} (12.08) и K^+ (1.75), а на станции 1 – Na^+ (6.8). Самое низкое содержание ионов Ca^{2+} (24.44), Mg^{2+} (7.94), Na^+ (3.86) было отмечено на станции 2, а K^+ (1.54) – на станции 3 (табл. 2).

Уровень содержания МДА. Обнаружены отличия уровня МДА в тканях моллюсков на разных станциях (рис. 2): наиболее высокие показатели у обоих видов отмечены на станциях 1 и 4, а низкие – на двух других станциях. Исследование межвидовых различий показало достоверно высокий уровень МДА в тканях *D. bugensis* со всех станций, кроме 2, по сравнению *D. polymorpha*.

Уровень ОАА. Моллюски из разных станций отличались не только интенсивностью ПОЛ, но и уровнем КОС (рис. 3). Наиболее высокие показатели КОС зафиксированы на станциях 1 и 2. Статистически значимые межвидовые отличия данного показателя зафиксированы на станциях 1 и 4. Более высокий уровень КОС, как и содержание МДА, отмечен у особей *D. bugensis*.

Корреляционный анализ. У обоих видов установлена прямая корреляционная связь между со-

Таблица 2. Концентрации катионов в воде, мг/дм³

Станция	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+
1. Костромское расширение	30.49	10.81	6.8	1.66
2. Город Волгореченск	24.44	7.94	3.85	1.54
3. Ниже города Плес	28.16	8.76	3.9	1.43
4. Город Пучеж	36.48	12.08	5.6	1.75

Таблица 3. Коэффициенты корреляции между уровнем МДА, КОС и концентрацией ионов Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ и K^+

Показатели	Концентрации							
	Ca^{2+}		Mg^{2+}		Na^+		K^+	
	<i>D. pol.</i>	<i>D. bug.</i>	<i>D. pol.</i>	<i>D. bug.</i>	<i>D. pol.</i>	<i>D. bug.</i>	<i>D. pol.</i>	<i>D. bug.</i>
МДА	0.64	0.83	0.90	0.95	0.96	0.94	0.90	0.86
КОС	−0.94	0.05	−0.83	0.30	−0.32	0.69	−0.64	0.61

держанием МДА и концентрацией катионов Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ и K^+ , а также у *D. bugensis* между уровнем КОС и концентрацией катионов Na^+ и K^+ (табл. 3). Обратная корреляционная связь выявлена в тканях моллюсков *D. polymorpha* между уровнем КОС и концентрацией катионов Ca^{2+} , Mg^{2+} и K^+ .

ОБСУЖДЕНИЕ

Вода Горьковского водохранилища относится к гидрокарбонатному классу, кальциево-магниевой группе, II типу (по классификации О.А. Алекина) [25]. Содержание кислорода в местах отбора проб было выше критических значений, уста-

новленных для обеспечения жизнедеятельности дрейссенид [26]. Зафиксированные нами концентрации ионов Ca, Mg, Na и K были выше нижних пороговых значений, установленных ранее В.И. Мартемьяновым для дрейссенид пресноводных водоемов [4, 9]. Различия концентрации ионов на станциях Горьковского водохранилища, как было указано выше, связаны с гидрологическим режимом данного водоема [21], в частности с проточностью и влиянием боковых притоков. В озерной части водохранилища по сравнению с озерно-речной течением воды практически отсутствует (0.04 м/с) [27].

Полученные показатели концентрации катионов существенно выше ранее описанных мини-

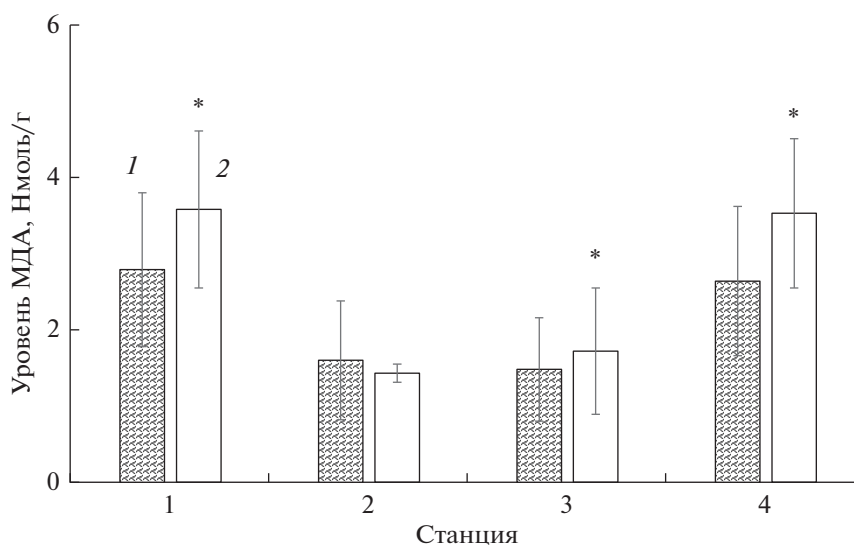


Рис. 2. Уровень МДА в тканях двустворчатых моллюсков. Здесь и на рис. 3: 1 – *D. polymorpha*, 2 – *D. bugensis*; * – значимые межвидовые различия при $p < 0.05$. Полосы погрешности на гистограммах отражают ошибку среднего $M \pm m$.

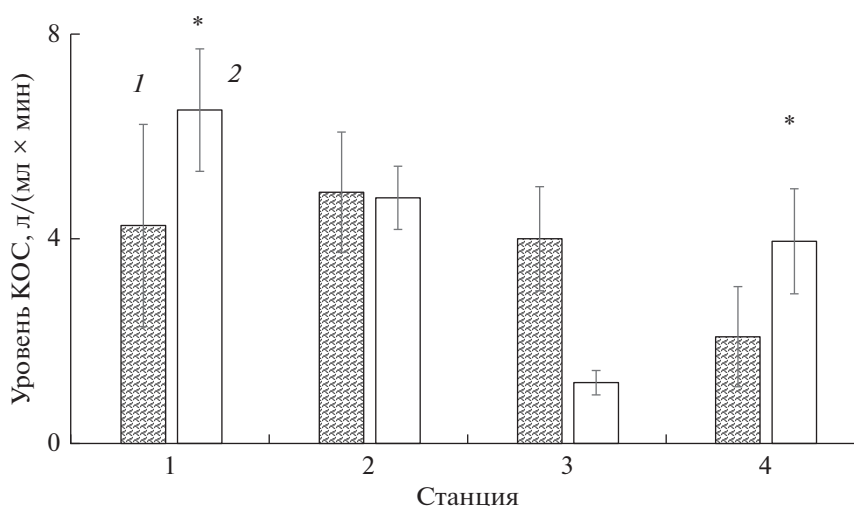


Рис. 3. Уровень КОС в тканях двустворчатых моллюсков.

мальных значений, требуемых для жизнедеятельности моллюсков [28–30]. Значительная проточность обеспечивает более высокое содержание кислорода в воде (см. табл. 1) и препятствует накоплению иловых отложений на грунте на станциях 2 и 3. Ранее нами [31] было показано существенное увеличение уровня МДА в тканях двустворчатых моллюсков *Unio tumidus* из участка реки Ахтуба с заиленным дном и замедленным течением по сравнению с песчаным дном и быстрым течением. Это хорошо согласуется с высокими показателями МДА у моллюсков обоих видов на станциях Костромское расширение и г. Пучеж. Вероятно, влияние гидрологического режима водоема на интенсивность окислительных процессов в организме моллюсков осуществляется вследствие изменения количественного содержания ионов в данных акваториях водохранилища. На это указывает прямая корреляционная связь между концентрациями ионов Ca, Mg, Na и K и уровнем МДА в тканях обоих видов. Необходимо также отметить возможное влияние токсикантов на интенсивность перекисных процессов. При исследовании в 2015 г. Горьковского водохранилища было зафиксировано превышение допустимых концентраций Ni, Cu, Zn, Cr в донных отложениях и рыбохозяйственных ПДК по уровню V, Cu, Zn, Sr, Mo в воде, однако содержание общих растворенных форм металлов не превышало санитарно-гигиенические нормы для водоемов [32]. Вместе с тем авторы не приводят сведения о концентрации тяжелых металлов в грунте и воде на исследуемых станциях.

Анализ уровня ОАА у моллюсков из разных станций показал неоднозначные результаты. Нами не обнаружено отличий данного показателя на разных участках Горьковского водохранилища в зависимости от гидрофизических параметров во-

ды. Однако проведенный корреляционный анализ выявил видовые отличия зависимости уровня КОС от концентрации различных ионов. Увеличение концентрации ионов Na и K в воде повышает этот показатель в организме *D. bugensis*, тогда как в тканях моллюсков *D. polymorpha* высокое содержание ионов Ca, Mg и K снижает уровень данного параметра. Это позволяет сделать вывод о видовом различии направления изменений уровня ОАА в тканях моллюсков при повышении концентрации ионов K в воде.

Как было сказано выше, *D. bugensis* более приспособлена к обитанию при заиленном дне и недостатку кислорода. Высокие темпы роста и скорости фильтрации в неблагоприятных условиях обитания обеспечивают интенсивные метаболические процессы. Это приводит к усилению процессов перекисного окисления в организме, что подтверждается значимо высокими показателями МДА и КОС у *D. bugensis* по сравнению с *D. polymorpha* на станциях 1 и 4.

При воздействии негативных стресс-факторов происходит активация окислительных процессов в организме гидробионтов. По изменению содержания МДА в тканях моллюсков оценивают условия среды обитания и характер реагирования на токсиканты [19, 20, 33–35].

Таким образом, обнаружены отличия уровня МДА и КОС у *D. bugensis* и *D. polymorpha* при разных концентрациях катионов Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} и K^{+} в воде. Повышение концентрации катионов усиливает окислительные процессы в организме обоих видов дрейссенид. Межвидовые отличия исследуемых показателей указывают на различия в функционировании механизмов прооксидант-антиоксидантной системы у разных видов сем. Dreissenidae. Вероятно, от успешного поддержа-

ния окислительно-восстановительного баланса зависят устойчивость и способность адаптации организма к изменениям среды обитания.

Работа выполнена в рамках государственного задания (тема № 121050500046-8).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Флерова Г.И., Мартеньянов В.И., Запруднова Р.А. Содержание электролитов в сыворотке крови пресноводных рыб // Биол. науки. 1980. № 3. С. 46–51.
2. Запруднова Р.А., Мартеньянов В.И. Использование параметров ионного обмена для оценки внутривидовой разнокачественности и устойчивости рыб к внешним воздействиям // Структура локальной популяции у пресноводных рыб / Ред. Поддубный А.Г. Рыбинск: ИББВВ РАН, 1990. С. 170–186.
3. Мартеньянов В.И. Содержание воды и катионов в различных тканях двустворчатых моллюсков, обитающих в Волжском плесе Рыбинского водохранилища // Журн. эвол. биохим. и физиол. 1996. Т. 32. № 2. С. 151–155.
4. Мартеньянов В.И. Динамика содержания натрия, калия, кальция, магния у пресноводного моллюска дрейссены *Dreissena polymorpha* при стрессе // Журн. эвол. биохим. и физиол. 2000. Т. 36. № 1. С. 33–36.
5. Запруднова Р.А. Изменения поведения и ионной регуляции у пресноводных рыб при стрессе // Успехи совр. биологии. 1999. Т. 119. № 3. С. 265–270.
6. Запруднова Р.А. Оценка стрессоустойчивости леща *Abramis brama* по обмену ионами натрия и калия между организмом и водой // Вопросы рыболовства. 2008. Т. 9. № 3. С. 697–710.
7. Виноградов Г.А., Мартеньянов В.И. Влияние экологических факторов на показатели водно-солевого обмена дрейссены *Dreissena polymorpha*: Эффект изменения рН и концентрации калия в воде // Биол. внутренних вод. 2004. № 3. С. 82–85.
8. Martemyanov V.I., Borisovskaya E.A. Indices of hydromineral metabolism in Tyulka (*Clupeonella Cultriventris*; Clupeiformes, Clupeidae) introduced in the Rybinsk reservoir in comparison to aboriginal and marine fish species // Russ. J. of Biological Invasions. 2010. V. 1. № 3. P. 187–193. <https://doi.org/10.1134/S2075111710030082>
9. Мартеньянов В.И. Пороговые концентрации катионов во внешней среде, определяющие границы распространения *Dreissena polymorpha* и *Dreissena bugensis* в пресных водоемах // Дрейссениды: эволюция, систематика, экология: Лекции и мат. докл. II междунар. школы-конференции. Борок: Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина, 2013. С. 80–83.
10. Jones L.A., Ricciardi A. Influence of physicochemical factors on the distribution and biomass of invasive mussels (*Dreissena polymorpha* and *Dreissena bugensis*) in the St. Lawrence River // Can. J. Fish. Aquat. Sci. 2005. V. 62. P. 1953–1962.
11. Farr M.D., Payne B.S. Environmental habitat conditions associated with freshwater dreissenids // Aquatic Nuisance Species Research Program. 2010. 32 p.
12. Шкорбатов Г.Л., Карневич А.Ф., Антонов П.И. Экологическая физиология // Дрейссена *Dreissena polymorpha* (Pall.) (Bivalvia, Dreissenida): Систематика, экология и практическое значение. Сер. “Виды фауны России и сопредельных стран”. М.: Наука, 1994. С. 67–108.
13. Karatayev A., Burlakova L., Padilla D. Physical factors that limit the distribution and abundance of *Dreissena polymorpha* (Pall.) // J. of Shellfish Research. 1998. V. 17. № 4. P. 1219–1235.
14. Mills E.L., Leach J.H., Carlton J.T., Secor C.L. Exotic species in the Great Lakes: A history of biotic crises and anthropogenic introductions // J. of Great Lakes Research. 1993. V. 19. P. 1–54.
15. Viarengo A., Pertica M., Canesi L. et al. Lipid peroxidation and level of antioxidant compounds (GSH, vitamin E) in the digestive glands of mussels of three different age groups exposed to anaerobic and aerobic conditions // Mar. Environ. Res. 1989. V. 28. P. 2991–2995.
16. Winston G.W. Oxidants and antioxidants in aquatic animals // Comp. Biochem. Physiol. 1991. V. 100. № 1–2. P. 173–176.
17. Меньшикова Е.Б., Зенков Н.К., Ланкин В.З. и др. Окислительный стресс: Патологические состояния и заболевания. Новосибирск: АРТА, 2008. 284 с.
18. Скулачев В.П. Новые сведения о биохимическом механизме запрограммированного старения организма и антиоксидантной защите митохондрий // Биохимия. 2009. Т. 74. №. 12. С. 1718–1721.
19. Черноморские моллюски: элементы сравнительной и экологической биохимии. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014. 323 с.
20. Экотоксикологические исследования прибрежной черноморской ихтиофауны в районе Севастополя. М.: ГЕОС, 2016. 360 с.
21. Экологические проблемы Верхней Волги. Отв. редактор Копылов А.И. Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2001. 427 с.
22. Методика измерений массовой концентрации катионов аммония, калия, натрия, лития, магния, стронция, бария и кальция в пробах питьевых, природных (в том числе минеральных) и сточных вод методом капиллярного электрофореза с использованием системы капиллярного электрофореза «Капель». ПНДФ 14.1:2.4.167-2000. 2014. 36 с.
23. Андреева Л.И., Кожемякин Н.А., Кишкун А.А. Модификация методов определения перекисей липидов в тесте с тиобарбитуровой кислотой // Лаб. дело. 1988. № 11. С. 41–43.
24. Семенов В. Л., Ярош А.М. Метод определения антиокислительной активности биологического материала // Укр. биохим. журн. 1985. Т. 57. № 3. С. 50–51.
25. Алексин О.А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1970. 444 с.
26. Пряничникова Е.Г. Структурно-функциональные характеристики дрейссенид Рыбинского водохранилища: Дис. ... канд. биол. наук. Борок, 2012. 179 с.
27. Волга и ее жизнь. Л.: Наука, 1978. 348 с.

28. Martemyanov V.I. Influence of environmental mineral composition on the indices of water - salt metabolism in *Dreissena polymorpha* Pallas introduced in the Rybinsk reservoir // Russ. J. of Biological Invasions. 2011. V. 2. № 2–3. P. 213–222.
<https://doi.org/10.1134/S207511171103009X>
29. Виноградов Г.А., Клерман А.К., Комов В.Т. Особенности ионного обмена пресноводных моллюсков в условиях высокой концентрации ионов водорода и низкой минерализации внешней среды // Экология. 1987. № 3. С. 81–84.
30. Dean P.M., Matthews E.K. Electrical activity in pancreatic islet cells: effect of ions // J. Physiol. 1970. V. 210. P. 265–275.
31. Sokolova A.S., Mikryakov V.R., Kuzmicheva S.V., Suvorova T.A. Immune physiological indices of *Unio tumidus* (Philipson, 1788) (Bivalvia) in different sections of the Akhtuba river // Hydrobiological Journal. 2018. V. 54. № 4. P. 78 – 84.
<https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v54.i4.80>
32. Томилина И.И., Ганеева М.В., Ложкина Р.А. Оценка качества воды и донных отложений каскада водохранилищ реки Волга по показателям токсичности и химического состава // Труды Института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН. 2018. № 82 (85). С. 107–131.
<https://doi.org/10.24411/0320-3557-2018-1-0015>
33. Будняк А.К., Захариева З.Е., Сорокин А.В., Петров С.А. Состояние окислительно-восстановительной системы в органах черноморской мидии *Mytilus galloprovincialis* в присутствии солей цинка и меди в среде обитания // Вестник ОНУ. 2007. Т. 12. № 5. С. 19–24.
34. Гостюхина О.Л., Головина И.В. Состояние антиоксидантного комплекса и перекисного окисления липидов в тканях мидии из Севастопольских бухт в ранневесенний период // Экологическая химия. 2011. № 20 (4). С. 211–217.
35. Довженко Н.В., Бельчева Н.Н., Челомин В.П. Реакция антиоксидантной системы мидии Грея *Mytilus grayanus* как индикатор загрязнения прибрежных акваторий (залив Петра Великого в Японском море) // Вестник МГОУ. Сер. Естественные науки. 2014. № 4. С. 57–66.