



УДК 597.442 + 591.1 + 577.122

EDN MTWХКТ

<https://doi.org/10.33910/2687-1270-2023-4-4-466-474>

## Изменение содержания продуктов окислительной модификации белков в сыворотке крови у различных видов осетровых при их адаптации к гиперосмотической среде

А. В. Вьюшина <sup>✉1</sup>, О. Г. Семенова <sup>1</sup>, [Л. С. Краюшкина](#) <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт физиологии им. И. П. Павлова РАН, 199034, Россия, г. Санкт-Петербург, наб. Макарова, д. 6

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Россия, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7–9

### Сведения об авторах

Анна Вадимовна Вьюшина, e-mail: [vyushinaav@infran.ru](mailto:vyushinaav@infran.ru)

Ольга Геннадьевна Семенова, e-mail: [semenovaog@infran.ru](mailto:semenovaog@infran.ru)

[Людмила Сергеевна Краюшкина](#), SPIN-код: 4762-1950

**Для цитирования:** Вьюшина, А. В., Семенова, О. Г., [Краюшкина, Л. С.](#) (2023) Изменение содержания продуктов окислительной модификации белков в сыворотке крови у различных видов осетровых при их адаптации к гиперосмотической среде. *Интегративная физиология*, т. 4, № 4, с. 466–474. <https://doi.org/10.33910/2687-1270-2023-4-4-466-474> EDN MTWХКТ

**Получена** 5 октября 2023; прошла рецензирование 11 декабря 2023; принята 20 декабря 2023.

**Финансирование:** Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-04-06553.

**Права:** © А. В. Вьюшина, О. Г. Семенова, [Л. С. Краюшкина](#) (2023). Опубликовано Российским государственным педагогическим университетом им. А. И. Герцена. Открытый доступ на условиях лицензии CC BY-NC 4.0.

**Аннотация.** В данной работе исследовали изменения окислительной модификации белков (ОМБ) сыворотки крови у осетровых разных эколого-физиологических групп в процессе их адаптации к морской воде с целью выяснения физиолого-биохимических различий в функционировании механизмов осмотической и ионной регуляции у осетровых этих групп. Были изучены: стерлядь *Acipenser ruthenus* (Linnaeus, 1758, пресноводный вид из Средней Волги, совершающий миграции только в пределах реки), сибирский осетр из реки Лена *A. baerii* (Brandt, 1869, пресноводный вид, совершающий кратковременные пищевые миграции в эстуарий с соленостью воды до 10 ‰), русский осетр *A. gueldenstaedtii* (Brandt et Ratzeburg, 1833) и белуга *Huso huso* (Linnaeus, 1758, солоноватоводные анадромные виды Волго-Каспийского бассейна, совершающие регулярные миграции «река-море-река» и обитающие в каспийских водах при солености до 12–14 ‰). Для определения количества продуктов ОМБ использовали методику Арутюняна с соавторами (Arutyunyan et al. 2000). Показано, что у стерляди уровень ОМБ при солевой нагрузке падает, у сибирского осетра остается без изменений; у изученных анадромных видов колебания уровня ОМБ совпадают с динамикой осмолярности, увеличиваясь в течении 12 часов после перевода рыб в искусственную морскую воду и снижаясь после перехода на гипоосмотический тип регуляции. Можно заключить, что показатели ОМБ сыворотки крови являются значимыми маркерами адаптационных перестроек у осетров различных экологических групп.

**Ключевые слова:** осетровые, эколого-физиологические группы, гиперосмотическая среда, адаптация, окислительная модификация белков

# Changes in the level of protein oxidative modification products in blood serum of different types of sturgeon in response to their adaptation to hyperosmotic environment

A. V. Vyushina <sup>✉1</sup>, O. G. Semenova <sup>1</sup>, L. S. Krayushkina <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Pavlov Institute of Physiology, Russian Academy of Sciences,  
6 Makarova Emb., Saint Petersburg 199034, Russia

<sup>2</sup>Saint-Petersburg State University, 7–9 Universitetskaya Emb., Saint Petersburg 199034, Russia

## Authors

Anna V. Vyushina, e-mail: [vyushinaav@infran.ru](mailto:vyushinaav@infran.ru)

Olga G. Semenova, e-mail: [semenovaog@infran.ru](mailto:semenovaog@infran.ru)

Lyudmila S. Krayushkina, SPIN: 4762-1950

**For citation:** Vyushina, A. V., Semenova, O. G., Krayushkina, L. S. (2023) Changes in the level of protein oxidative modification products in blood serum of different types of sturgeon in response to their adaptation to hyperosmotic environment. *Integrative Physiology*, vol. 4, no. 4, pp. 466–474. <https://doi.org/10.33910/2687-1270-2023-4-4-466-474> EDN MTWXXT

**Received** 5 October 2023; reviewed 11 December 2023; accepted 20 December 2023.

**Funding:** This study was supported by RFFR grant No. 15-04-06553.

**Copyright:** © A. V. Vyushina, O. G. Semenova, L. S. Krayushkina (2023). Published by Herzen State Pedagogical University of Russia. Open access under CC BY-NC License 4.0.

**Abstract.** The article investigates changes in the level of oxidative proteins in the blood serum of sturgeons from different ecological and physiological groups in response to their adaptation to sea water. The study aim to identify physiological and biochemical differences in osmotic and ion regulation in different groups of sturgeons. Among the studied groups are sterlet *Acipenser ruthenus* Linnaeus, 1758 (freshwater species from the Middle Volga, migrating only within the river), Siberian sturgeon from the Lena river *A. baerii* Brandt, 1869 (freshwater species, making short-term food migration to the estuary with salinity of water up to 10 ‰), Russian sturgeon *A. gueldenstaedtii* Brandt et Ratzeburg, 1833 and Beluga *Huso huso* (Linnaeus, 1758) (brackish water anadromous species of the Volga-Caspian basin, making regular migration 'river-sea-river' and living in the Caspian waters with salinity up to 12–14 ‰). The carbonyl derivatives of proteins were identified in the blood serum using the method described in (Arutyunyan et al. 2000). It is shown that in salty environment the level of oxidative proteins falls, in sterlet, remains unchanged in Siberian sturgeon, while in the studied anadromous species the fluctuations of oxidative proteins level match the dynamics of osmolarity — it increases within 12 hours after the transfer of fish into artificial sea water and decreases after the transition to the hypoosmotic type of regulation. It can be concluded that oxidative modification of serum protein is a significant marker of adaptation in sturgeons of different ecological groups.

**Key words:** sturgeon, ecological and physiological groups, hyperosmotic environment, adaptation, oxidative modification of proteins

Светлой памяти  
Людмилы Сергеевны Краюшкиной,  
учителя и друга

## Введение

Осетровые (сем. *Acipenseridae*), являясь по происхождению пресноводными рыбами, в процессе эволюции освоили различные по солености ареалы и в настоящее время живут как в пресной, так и морской среде. Их можно условно разделить на четыре эколого-физиологические группы: 1) исключительно пресноводные виды; 2) пресноводные виды,

но совершающие кратковременные, в основном пищевые, миграции в солоноватые воды (5–10 ‰) заливов и эстуарий; 3) солоноватоводные диадромные; 4) морские диадромные виды, живущие большую часть жизни в морских водах соленостью, соответственно, 12–18 ‰ и 22–33 ‰, но совершающие регулярные миграции в реки на нерест. Способность осетровых этих групп адаптироваться к солености среды их обитания обусловлена механизмами осмотической

и ионной регуляции, которые имеют различный уровень физиолого-биохимической активности (Krayushkina 2022).

Ионорегуляция в морской воде — чрезвычайно энергозависимый процесс, поскольку транспорт ионов во многих случаях протекает против концентрационного градиента, например, выведение из организма избытка  $\text{Na}^+$  и  $\text{K}^+$  хлоридными клетками жабр (Marshall, Bryson 1998). Как энергозависимый процесс ионорегуляция зависит от функционирования митохондрий, при работе которых образуется 70% внутриклеточных активных форм кислорода (АФК). У рыб была обнаружена прямая взаимосвязь между интенсивностью метаболизма и активацией окислительных ферментов (Wilhelm Filho et al. 1993).

В настоящее время установлено, что в норме в тканях происходит постоянная генерация АФК, которые участвуют в передаче сигналов, направленных на запуск каскада реакций, необходимых для приспособления и выживания организма в экстремальных условиях (Halliwell, Gutteridge 2007). Любая стрессорная реакция организма сопровождается кратковременным подъемом АФК и развитием окислительного стресса. Окислительный стресс является одним из тех стимулов, которые помогают включить клеточную адаптацию организма (Smith 1991). Токсическое действие АФК проявляется при состояниях окислительного стресса, сопровождающихся резкой интенсификацией свободно-радикальных процессов и снижением активности антиоксидантной защиты в тканях (Davies 1995; Halliwell, Gutteridge 2007).

Одно из центральных мест в работе сигнальных систем клетки принадлежит белкам и продуктам их метаболизма, в частности продуктам свободно-радикального окисления белков, которое можно рассматривать как систему внутренней модуляции и передачи информации от внешней среды к внутриклеточным системам и наоборот (Dubinina 2006).

Окислительная модификация белков рассматривается как один из ранних и надежных показателей окислительного стресса (Caraceni et al. 1997; Mecocci et al. 1999; Stadtman 2001). Белки плазмы, подвергшиеся окислительной деструкции, имеют довольно большой период полураспада и могут находиться в клетках в течение многих часов (Grune et al. 1997; Reinheckel et al. 1998). Повышение уровня ОМБ свидетельствует о напряженности свободно-радикальных процессов при воздействии неблагоприятных внешних факторов и ряде пато-

логических состояний (Ciolino, Levine 1997; Winterbourn et al. 2000).

Количество окисленных белков в клетках обусловлено генетически и является их фенотипической характеристикой (Dubinina 2006). Окислительная модификация белков является одним из ранних и доказательных маркеров метаболических изменений в организме при стрессорных нагрузках и в процессе адаптации к ним. В этой связи представляет интерес определение уровня ОМБ в сыворотке крови у осетровых, принадлежащих к разным экологическим группам, в процессе их адаптации к морской воде с целью дальнейшего выяснения физиолого-биохимических различий в функционировании механизмов осмотической и ионной регуляции у осетровых этих групп.

### Материал и методы исследования

Для экспериментальной работы были использованы неполовозрелые особи (в возрасте 2+) следующих видов из различных экологических групп:

Стерлядь *Acipenser ruthenus* (Linnaeus, 1758; длиной  $39,0 \pm 0,6$  см, весом  $193,0 \pm 10,3$  г) — пресноводный вид из Средней Волги, совершающий миграции только в пределах реки (1-я группа); в эксперименте было использовано шесть животных.

Сибирский осетр из реки Лена *A. baerii* (Brandt, 1869; длиной  $63,0 \pm 1,0$  см, весом  $863,0 \pm 49,8$  г) — пресноводный вид, совершающий кратковременные пищевые миграции в эстуарий с соленостью воды до 10 ‰ (2-я группа); в эксперименте было использовано шесть животных.

Русский осетр *A. gueldenstaedtii* (Brandt et Ratzeburg, 1833; длиной  $40,2 \pm 0,4$  см, весом  $225,6 \pm 7,3$  г); в эксперименте было использовано десять животных.

Белуга *Huso huso* (Linnaeus, 1758; длиной  $56,3 \pm 3,4$  см, весом  $700,0 \pm 107,4$  г); в эксперименте было использовано десять животных.

Солоноватоводные анадромные виды, русский осетр и белуга, совершают регулярные миграции «река-море-река» и обитают в каспийских водах при солености до 12–14 ‰ (3-я группа).

Экспериментальная работа с ленским осетром, выращенным на Конаковском рыбноводном заводе (Тверская обл.), выполнена в лаборатории Биологического НИИ Санкт-Петербургского государственного университета. Исследование неполовозрелых особей стерляди, белуги и русского осетра, выращенных в научно-производственном центре по осетроводству БИОС (Астраханская обл., Икрянинский р-н), проведено

на Кизанском и Бертюльском рыбоводных заводах Астраханской области.

В эксперименте рыб переводили из пресной воды (контроль) в морскую воду соленостью 12,5–12,7 ‰, по составу и соотношению солей аналогичную воде Среднего Каспия (12,7 ‰). Через 7–10 суток адаптации рыб всех исследуемых видов, а также в течение различных сроков адаптации (через 12, 24 и 72 ч) в опытах с русским осетром и белугой брали пробы для определения осмолярности сыворотки крови с целью оценки уровня осмотической регуляции вида и уровня ОМБ сыворотки крови. Пресноводные виды — стерлядь и сибирский осетр были переведены в морскую воду соленостью 12,5–12,7 ‰ после предварительной их адаптации к солености 10 ‰ в течение 10 суток, после перед переводом их в соленость 12,5–12,7 ‰ также были взяты пробы крови.

Пробы брали из хвостовой вены с помощью шприца. Кровь после ее свертывания центрифугировали для получения чистой сыворотки. Осмолярность анализируемых биологических сред и воды определяли методом криоскопии на автоматическом микроосмометре МТ-2 (НПО «Буревестник», Россия), результаты выражали в мосм/л.

Определение продуктов ОМБ в сыворотке крови производили спектрофотометрически по методу (Levin et al. 1990) с незначительными модификациями (Arutyunyan et al. 2000). При определении ОМБ использовали два показателя: спонтанная ОМБ (СОМБ) и ОМБ, индуцированная реактивом Фентона (ФОМБ). Это позволило дифференцированно оценить степень повреждения окисленных белков и степень патологических изменений. Первый показатель характеризует базальный уровень окислительной модификации белков, второй, характеризующий приращение ОМБ после стимуляции реактивом Фентона (смесь  $\text{FeSO}_4$  10 мМ, ЭДТА 10 мМ и  $\text{H}_2\text{O}_2$  0,1 М), указывает на наличие субстрата для свободно-радикальных процессов и в целом является показателем резервных возможностей организма при реакции на окислительный стресс (Dubinina 2006; Kuzmenko, Laptev 1999). Измерение оптической плотности продуктов ОМБ производили при длине волны 363 нм, результаты спонтанной и индуцированной ОМБ выражали в Е/мг белка, где Е — единицы оптической плотности. Общий белок измеряли по методу Лоури.

Статистическую обработку полученных результатов проводили с использованием пакета программ STATISTICA 8.0 (Stat Soft Inc.). Данные анализировали с помощью критерия Стьюден-

та в случае нормального распределения (изменение осмолярности) и по критерию Манна-Уитни в случае отсутствия нормального распределения (изменение ОМБ). Проверку нормальности распределения выборки осуществляли с помощью критерия Шапиро — Уилка. Различия считали достоверными при  $p < 0,05$ .

## Результаты

Изменения осмолярности сыворотки крови у изученных видов после их адаптации к морской воде показали, что эти виды характеризуются различным уровнем осмотической регуляции при увеличении солености среды (табл. 1). Через семь суток пребывания стерляди в морской воде 12,7 ‰ после предварительной адаптации к солености 10 ‰ в течение десяти суток осмолярность сыворотки крови поднимается на 55,8 % выше исходного уровня (в пресной воде) и достигает значения осмолярности морской воды. Этот вид приспосабливается к предоставленной солености как осмоконформер. У сибирского осетра в аналогичных условиях осмолярность сыворотки крови поднимается к концу опыта на 18,8 % выше исходного уровня и устанавливается на 17,8 % ниже осмолярности морской воды.

При прямом переводе русского осетра и белуги из пресной в морскую воду осмолярность сыворотки крови поднимается в течение 24 часов после перевода, соответственно, на 65,8 мосм/л и 55,2 мосм/л выше уровня, который был у рыб в пресной воде. На седьмые сутки опыта осмолярность сыворотки крови у этих видов устанавливается, соответственно, на 19,3% и 21,8% ниже, чем осмолярность морской воды, что свидетельствует о переходе рыб на гипоосмотический тип регуляции.

В пресной воде стерлядь и сибирский осетр имеют повышенный уровень СОМБ по сравнению с русским осетром и белугой (табл. 1). Также следует отметить, что уровень этого параметра у стерляди выше ( $p = 0,017$ ), чем у сибирского осетра, а у белуги выше, чем у русского осетра ( $p = 0,006$ ). ФОМБ в пресной воде у стерляди и сибирского осетра достоверно ниже, чем СОМБ, в то время как у диадромных солоноватоводных видов наблюдается обратная картина (табл. 1).

После адаптации стерляди к солоноватой воде 12 ‰ в течение семи дней уровень как спонтанной, так и индуцированной окислительной модификации белков достоверно снизились по сравнению со значениями этих показателей в пресной воде (табл. 1). У сибирского осетра,

Табл. 1. Осмолярность сыворотки крови и уровень окислительной модификации белков у осетровых в пресной воде и после адаптации к морской воде

Виды и период воздействия	Осмолярность сыворотки крови, мосм/л M ± s. e. [n]	Окислительная модификация белков, Е/мг белка, Ме (SQR) [n]	
		Спонтанная	Индукцированная
<i>A. ruthenus</i> Стерлядь в пресной воде 7 сут в S = 12,7 ‰ (409 ± 2 мосм/л)	263,6 ± 1,2 [5]	0,33 (0,34-0,41) [4]	0,24 (0,23-0,29) [4]
	410,7 ± 4,0* [6]	0,23* (0,23-0,29) [4]	0,06* (0,06-0,09) [4]
<i>A. baerii</i> Сибирский осетр (река Лена) в пресной воде 10 сут в S = 10 ‰ (322,2 мосм/л) 10 сут в S = 12,5 ‰ (403 ± 3 мосм/л)	278,7 ± 2,2 [6]	0,18 (0,14-0,19) [5]	0 (0-0) [5]
	—	0,05* (0-0,09) [4]	0,09* (0,04-0,29) [4]
	331,2 ± 7,5* [5]	0,17 (0,11-0,23) [4]	0,17* (0,12-0,23) [4]
<i>A. gueldenstaedtii</i> Русский осетр в пресной воде в S = 12,5‰ (403 ± 3 мосм/л) 12 ч 24 ч 72 ч 7 сут	285,6 ± 2,1 [10]	0 (0-0) [5]	0,19 (0,18-0,2) [5]
	324,4 ± 1,5 [5]	0,05*(0,05-0,16) [5]	0,39*(0,36-0,72)[4]
	351,4 ± 5 [5]	0 (0-0) [5]	0,53*(0,29-0,54) [5]
	334,2 ± 9,2 [4]	0,02 (0,01-0,07) [4]	0,44*(0,34-0,65) [4]
	325,2 ± 6,2* <sup>24</sup> [5]	0,08* (0,07-0,1) [4]	0,41*(0,27-0,44) [5]
<i>Huso huso</i> Белуга в пресной воде в S = 12,5 ‰ (409 ± 2 мосм/л) 12 ч 24 ч 7 сут	279,6 ± 2,2 [10]	0,01 (0,01-0,02) [7]	0,52 (0,15-0,98) [7]
	313,8 ± 2,9 [5]	0,04* (0,04-0,5) [5]	0,31 (0,26-0,31) [5]
	334,8 ± 2,3 [5]	0,015 (0-0,02) [5]	0,48 (0,21-1,01) [5]
	319,8 ± 1,7* [6]	0,03*(0,02-0,04) [5]	0,29 (0,27-0,35) [5]

Примечание: M ± s. e. — среднее значение и его стандартная ошибка; различия достоверны: \* — p < 0,05 (без индекса — по сравнению с контролем, в пресной воде, с индексом <sup>(24)</sup> — по сравнению с соответствующим периодом воздействия), в квадратных скобках — количество рыб. Ме — медиана, IQR — интерквартильный размах между значениями 25–75 перцентилей, «—» — нет данных.

Table 1. Osmolarity of blood serum and the level of oxidative modification of proteins in sturgeon in fresh water and after adaptation to sea water

Species and exposure time	Blood serum osmolarity, mosm/l M ± s. e. [n]	Oxidative modification of proteins, E/mg protein, Me (SQR) [n]	
		Spontaneous	Induced
<i>A. ruthenus</i> Sterlet in freshwater 7 days in S = 2.7 ‰ (409 ± 2 mosm/l)	263.6 ± 1.2 [5]	0.33 (0.34-0.41) [4]	0.24 (0.23-0.29) [4]
	410.7 ± 4.0* [6]	0.23* (0.23-0.29) [4]	0.06* (0.06-0.09) [4]
<i>A. baerii</i> Siberian sturgeon (river Lena) in freshwater 10 days in S = 10 ‰ (322.2 mosm/l) 10 days in S = 12.5 ‰ (403 ± 3 mosm/l)	278.7 ± 2.2 [6]	0.18 (0.14-0.19) [5]	0 (0-0) [5]
	—	0.05* (0-0.09) [4]	0.09* (0.04-0.29) [4]
	331.2 ± 7.5* [5]	0.17 (0.11-0.23) [4]	0.17* (0.12-0.23) [4]

Table 1. Completion

<i>A. gueldenstaedtii</i> Russian sturgeon in freshwater in S = 12.5 ‰ (403 ± 3 mosm/l)	285.6 ± 2.1 [10]	0 (0-0) [5]	0.19 (0.18-0.2) [5]
12 h	324.4 ± 1.5 [5]	0.05*(0.05-0.16) [5]	0.39*(0.36-0.72)[4]
24 h	351.4 ± 5 [5]	0 (0-0) [5]	0.53*(0.29-0.54) [5]
72 h	334.2 ± 9.2 [4]	0.02 (0.01-0.07) [4]	0.44*(0.34-0.65) [4]
7 days	325.2 ± 6.2* <sup>24</sup> [5]	0.08* (0.07-0.1) [4]	0.41*(0.27-0.44) [5]
<i>Huso huso</i> Beluga in freshwater in S = 12.5 ‰ (409 ± 2 mosm/l)	279.6 ± 2.2 [10]	0.01 (0.01-0.02) [7]	0.52 (0.15-0.98) [7]
12 h	313.8 ± 2.9 [5]	0.04* (0.04-0.5) [5]	0.31 (0.26-0.31) [5]
24 h	334.8 ± 2.3 [5]	0.015 (0-0.02) [5]	0.48 (0.21-1.01) [5]
7 days	319.8 ± 1.7* [6]	0.03*(0.02-0.04) [5]	0.29 (0.27-0.35) [5]

Note: M ± s. e. — mean value and its standard deviation; differences are significant at \* p — < 0.05 (without index — compared with control, in fresh water; with index (<sup>24</sup>) — compared with the corresponding period of exposure); in square brackets — the number of fish. Me — median, IQR — interquartile range between 25–75 percentiles, “–” — no data available.

который в природе совершает кратковременные миграции в солоноватые воды, в опыте после семи суток пребывания в воде 10 ‰ СОМБ снижается, а ФОМБ — увеличивается от следовых значений до 0,09 Е/мг белка (табл. 1). При последующем содержании рыб в течение семи суток в воде с соленостью 12 ‰ значения СОМБ возрастают до уровня, отмеченного в пресной воде, а показатели ФОМБ остаются без изменений.

В процессе адаптации русского осетра и белуги к морской воде 12,5 ‰ через 12 часов опыта у обоих видов наблюдается достоверное увеличение показателей СОМБ сыворотки крови. Через 24 часа пребывания рыб в морской воде этот показатель снижается до уровня, наблюдаемого в пресной воде. После семи суток содержания в морской воде у русского осетра и у белуги уровень СОМБ возрастает до значений, наблюдаемых через 12 часов опыта.

ФОМБ при адаптации русского осетра к морской среде достоверно увеличивается через 12 часов опыта и остается далее без изменений. У белуги в процессе адаптации к морской воде 12,5 ‰ этот показатель не изменяется, но следует отметить, что в исследуемых группах наблюдается большой разброс значений (табл. 1.).

### Обсуждение

Более высокий уровень СОМБ у пресноводных видов может свидетельствовать о более интенсивном кислородном обмене у стерляди и сибирского осетра по сравнению с белугой и русским осетром в пресной воде. Кроме того, этот факт может отражать интенсивность ра-

боты митохондрий в зависимости от температуры окружающей среды в эпитопе обитаемости вида (Iftikar 2014; Rörtner 2002).

Как уже упоминалось, средневожская стерлядь при адаптации к солоноватой воде становится изоосмотической среде обитания и не проявляет черт гипоосмотической регуляции, характерной для солоноватоводных диадромных видов. Эванс и Кульц в своем обзоре отмечают, что из-за высокой потребности в энергии, связанной с макромолекулярной защитой и восстановлением (например, синтезом белков теплового шока), ключевой особенностью клеточной стрессовой реакции является перенаправление метаболической энергии с нормальных клеточных процессов на специфические функции клеточной адаптации (Evans, Kültz 2020). Изменения уровня ОМБ, которые мы наблюдаем у средневожской стерляди после адаптации к воде 12,7 ‰, могут свидетельствовать о замедлении метаболизма и снижении уровня клеточного дыхания, связанных с перенапряжением систем адаптации.

Изменения в уровне ОМБ у сибирского осетра в течение адаптации к гиперосмотической среде свидетельствуют об успешной функциональной перестройке редокс-баланса организма, связанной с адаптационными процессами. Возможно, что успешная адаптация этого вида рыб связана с перекрестной адаптацией к низким температурам и связанными с этим развитыми механизмами выработки энергии в митохондриях (Evans, Kültz 2020; Wilhelm Filho 2007).

Повышенный уровень продуктов ОМБ у белуги в сравнении с русским осетром в контроле (пресная вода), возможно, отражает видовые

особенности белкового и / или кислородного метаболизма этого вида осетровых. Высокая дисперсия показателей ФОМБ у белуги после перевода в искусственную морскую воду может быть отражением функциональной незрелости структур, связанных с генерацией и реализацией адаптационных стресс-сигналов (McCormick 1994). Несмотря на большую массу тела рыб (700,0 ± 107,4 г), белуга, вероятно, еще не достигает завершения функциональной зрелости. Тем не менее, даже эти животные демонстрируют вполне действенную гипоосмотическую регуляцию по сравнению с осмоконформером — стерлядью. При сравнении изменений уровня ФОМБ в течение адаптации к солевому воздействию у сибирского осетра и солоноватоводных проходных форм можно предположить, что механизмы взаимодействия кислородного обмена и адаптации к изменению осмолярности внешней среды у сибирского осетра иные, чем у белуги и русского осетра.

В целом, можно заметить, что в пресной воде более высокий уровень показателей СОМБ у пресноводных осетров по сравнению с солоноватоводными связан со специфическими механизмами кислородного метаболизма и эпителием обитаемости вида. По-видимому, окислительная модификация белков участвует в процессах, связанных с изменением типа осморегуляции (Rivera-Ingraham, Lignot 2017). Кроме того, возможность изменения типа осморегуляции зависит не только от наличия специфических ион-экскреторных ферментативных систем в эффекторных органах (McCormick 1994), но также определяется генетически зависимыми механизмами кислородного метаболизма в тканях и резистентностью тканей и органов разных видов к окислительному стрессу (Dubinina 2006).

Можно заключить, что окислительная модификация белков сыворотки крови является значимым маркером адаптационных перестроек у осетров различных экологических групп. Процессы ОМБ как отражение участия окислительного стресса в механизмах осмотической и ионной регуляции при адаптации к морской воде у разных экологических групп осетровых имеют существенное значение в формировании физиолого-биохимических различий.

### Список сокращений

ОМБ — окислительная модификация белков.

СОМБ — спонтанная окислительная модификация белков.

ФОМБ — фентон-индуцированная окислительная модификация белков.

АФК — активные формы кислорода.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии потенциального или явного конфликта интересов.

### Conflict of Interest

The authors declare that there is no conflict of interest, either existing or potential.

### Соответствие принципам этики

Исследования с участием животных соответствует принципам международной этики.

### Ethics Approval

The authors declare that the study complies with all international ethical principles applicable to animal research.

### Вклад авторов

- a. Вьюшина Анна Вадимовна — идея работы и планирование эксперимента, сбор и обработка данных, написание рукописи, редактирование рукописи;
- б. Семенова Ольга Геннадьевна — идея работы и планирование эксперимента, сбор и обработка данных, написание рукописи, редактирование рукописи;
- в. Краюшкина Людмила Сергеевна — идея работы и планирование эксперимента, сбор и обработка данных, написание рукописи, редактирование рукописи.

### Author Contributions

- a. Anna V. Vyushina — developed the research concept and planned the experiment, collected and processed the data, drafted the manuscript;
- b. Olga G. Semenova — developed the research concept and planned the experiment, collected and processed the data, drafted the manuscript;
- c. Lyudmila S. Krayushkina — developed the research concept and planned the experiment, collected and processed the data, drafted the manuscript.

## List of Abbreviations

OMP — oxidative modification of proteins.  
 SOMP — spontaneous oxidative modification of proteins.  
 FOMP — Fenton-chemistry-based oxidative modification of proteins.  
 ROS — reactive oxidative species.

## References

- Arutyunyan, A. V., Dubinina, E. E., Zybina, N. N. (2000) *Metody otsenki svobodnoradikal'nogo okisleniya i antioksidantnoj sistemy organizma [Methods of estimating a free-radical oxidation and anti-oxidant system in the body]*. Saint Petersburg: Foliant Publ., 104 p. (In Russian)
- Caraceni, P., De Maria, N., Ryu, H. S. et al. (1997) Proteins but not nucleic acids are molecular target for the free radical attack during reoxygenation of rat hepatocytes. *Free Radical Biology and Medicine*, vol. 23, no. 2, pp. 393–344. [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(96\)00571-0](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(96)00571-0) (In English)
- Ciolino, H. P., Levine, R. L. (1997) Modification of proteins in endothelial cell death during oxidative stress. *Free Radical Biology and Medicine*, vol. 22, no. 7, pp. 1277–1282. [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(96\)00495-9](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(96)00495-9) (In English)
- Davies, K. J. A. (1995) Oxidative stress: The paradox of aerobic life. *Biochemical Society Symposium*, vol. 61, pp. 1–31. <https://doi.org/10.1042/bss0610001> (In English)
- Dubinina, E. E. (2006) *Produkty metabolizma kisloroda v funkcional'noj aktivnosti kletok: (zhizn' i smert', sozidanie i razrushenie): fiziologicheskie i kliniko-biokhimicheskie aspekty [Products of oxygen metabolism in the functional activity of cells: (life and death, creation and destruction): Physiological and clinical-biochemical aspects]*. Saint Petersburg: Meditsinskaya Pressa Publ., 397 p. (In Russian).
- Evans, T. G., Kültz, D. (2020) The cellular stress response in fish exposed to salinity fluctuations. *Journal of Experimental Zoology. Part A: Ecological and Integrative Physiology*, vol. 333, no. 6, pp. 421–435. <http://doi.org/10.1002/jez.2350> (In English)
- Grune, T., Reinheckel, T., Davies, K. J. A. (1997) Degradation of oxidized proteins in mammalian cells. *FASEB Journal*, vol. 11, no. 7, pp. 526–534. PMID: [9212076](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/9212076/) (In English)
- Halliwell, B., Gutteridge, J. M. C. (2007) *Free radicals in biology and medicine*. 4<sup>th</sup> ed. Oxford: Oxford University Press, 851 p. (In English)
- Iftikar, F. I., MacDonald, J. R., Baker, D. W. et al. (2014) Could thermal sensitivity of mitochondria determine species distribution in a changing climate? *The Journal of Experimental Biology*, vol. 217, no. 13, pp. 2348–2357. <http://doi.org/10.1242/jeb.098798> (In English)
- Krayushkina, L. S. (2022) *Funktsional'naya evolyutsiya osmoregulyatornoj sistemy osetrovyykh (Acipenseridae) [Functional evolution of osmoregulatory system of sturgeons (Acipenseridae)]*. Moscow: Fismatlit Publ., 316 p. (In Russian)
- Kuzmenko, D. I., Laptev, D. I. (1999) Otsenka rezerva lipidov syvorotki krovi dlya perekisnogo okisleniya v dinamike okislitel'nogo stressa u krysa [Assessment of serum lipid reserve for peroxidation in the dynamics of oxidative stress in rats]. *Voprosy Meditsinskoj Khimii*, vol. 45, no. 1, pp. 47–54. (In Russian).
- Levin, R. L., Garland, D., Oliver, C. N. et al. (1990) Determination of carbonyl content in oxidatively modified proteins. *Methods in Enzymology*, vol. 186, pp. 464–478. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(90\)86141-H](https://doi.org/10.1016/0076-6879(90)86141-H) (In English)
- Marshall, W. S., Bryson, S. E. (1998) Transport mechanisms of seawater teleost chloride cells: An inclusive model of a multifunctional cell. *Comparative Biochemistry and Physiology. Part A: Molecular and Integrative Physiology*, vol. 119, no. 1, pp. 97–106. [https://doi.org/10.1016/S1095-6433\(97\)00402-9](https://doi.org/10.1016/S1095-6433(97)00402-9) (In English)
- McCormick, S. D. (1994) Ontogeny and evolution of salinity tolerance in anadromous salmonids: Hormones and heterochrony. *Estuaries and Coasts*, vol. 17, no. 1A, pp. 26–33. <https://doi.org/10.2307/1352332> (In English)
- Mecocci, P., Fanó, G., Fulle, S. et al. (1999) Age-dependent increases in oxidative damage to DNA, lipids, and proteins in human skeletal muscle. *Free Radical Biology & Medicine*, vol. 26, no. 3–4, pp. 303–308. [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(98\)00208-1](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00208-1) (In English)
- Pörtner, H. O. (2002) Climate variations and the physiological basis of temperature dependent biogeography: Systemic to molecular hierarchy of thermal tolerance in animals. *Comparative Biochemistry and Physiology. Part A: Molecular & Integrative Physiology*, vol. 132, no. 4, pp. 739–761. [https://doi.org/10.1016/S1095-6433\(02\)00045-4](https://doi.org/10.1016/S1095-6433(02)00045-4) (In English)
- Reinheckel, T., Noack, H., Lorenz, S. et al. (1998) Comparison of protein oxidation and aldehyde formation during stress in isolated mitochondria. *Free Radical Research*, vol. 29, no. 4, pp. 297–305. <https://doi.org/10.1080/10715769800300331> (In English)
- Rivera-Ingraham, G. A., Lignot, J.-H. (2017) Osmoregulation, bioenergetics and oxidative stress in coastal marine invertebrates: Raising the questions for future research. *Journal of Experimental Biology*, vol. 220, no. 10, pp. 1749–1760. <http://doi.org/10.1242/jeb.135624> (In English)

- Smith, C. V. (1991) Correlations and apparent contradictions in assessment of oxidant stress status *in vivo*. *Free Radical Biology and Medicine*, vol. 10, no. 3–4, pp. 217–224. [https://doi.org/10.1016/0891-5849\(91\)90079-I](https://doi.org/10.1016/0891-5849(91)90079-I) (In English)
- Stadtman, E. R. (2001) Protein oxidation in aging and age-related diseases. *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 928, no. 1, pp. 22–38. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2001.tb05632.x> (In English)
- Wilhelm Filho, D. (2007) Reactive oxygen species, antioxidants and fish mitochondria *Frontiers in Bioscience*, vol. 12, no. 4, pp. 1229–1237. <https://doi.org/10.2741/2141> (In English)
- Wilhelm Filho, D., Giulivi, C., Boveris, A. (1993) Antioxidant defences in marine fish — I. Teleosts. *Comparative Biochemistry and Physiology. Part C: Pharmacology, Toxicology and Endocrinology*, vol. 106, no. 2, pp. 409–413. [https://doi.org/10.1016/0742-8413\(93\)90154-D](https://doi.org/10.1016/0742-8413(93)90154-D) (In English)
- Winterbourn, C. C., Buss, H. I., Chan, T. P. et al. (2000) Protein carbonyl measurement show evidence of early oxidative stress in critically ill patients. *Critical Care Medicine*, vol. 28, no. 1, pp. 143–149. <http://dx.doi.org/10.1097/00003246-200001000-00024> (In English)