

БИОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 597.552.511:577.122.2:591.543.43(1-924.16)

БЕЛКОВАЯ ДЕГРАДАЦИЯ ТКАНЕЙ И ОРГАНОВ ГОРБУШИ *ONCORHYNCHUS GORBUSCHA* КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА В ХОДЕ ПОКАТНОЙ И НЕРЕСТОВОЙ МИГРАЦИЙ

Н.П. Канцерова, Л.А. Лысенко

Институт биологии Карельского научного центра РАН,

ул. Пушкинская 11, г. Петрозаводск, 185910,

e-mail: nkantserova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5844-4788>;

e-mail: l-lysenko@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9558-7400>

Оценивали интенсивность белковой деградации в тканях горбуши Кольского полуострова в ходе покатной миграции из р. Индёры в Белое море, а также в скелетных мышцах производителей горбуши в ходе нерестовой миграции из Белого моря в р. Индёр. Продемонстрирована взаимосвязь уровня белковой деградации со стадией жизненного цикла горбуши. Установлены особенности физиологического состояния нерестящейся горбуши Кольского полуострова, оцениваемые по уровню активности внутриклеточных протеиназ и содержанию карбонилированных белков, по сравнению с другими видами лососевых.

Ключевые слова: горбуша *Oncorhynchus gorbuscha*, внутриклеточные протеиназы, белковые карбонилы, покатная миграция, нерестовая миграция, р. Индёра, Белое море.

Образец цитирования: Канцерова Н.П., Лысенко Л.А. Белковая деградация тканей и органов горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* Кольского полуострова в ходе покатной и нерестовой миграций // Региональные проблемы. 2025. Т. 28, № 2. С. 54–57. DOI: 10.31433/2618-9593-2025-28-2-54-57.

Горбуша (*Oncorhynchus gorbuscha*), представитель тихоокеанских лососей, – моноциклический вид с коротким жизненным циклом, самым высоким темпом роста и массонакопления среди лососевых, характеризующийся очень высокой численностью популяций. Во второй половине XX века были начаты работы по интродукции этого вида в водоемы Атлантики, в которых популяции собственных лососевых рыб гораздо меньше. В настоящее время натурализовавшаяся в Белом море популяция горбуши стабильно обеспечивает возврат по нечетным годам, тогда как популяция четных лет практически отсутствует [1].

Горбуше присущи короткий жизненный цикл (два года), быстрый и синхронный темп

гаметогенеза, быстрые и необратимые физиологические перестройки организма при миграции из морской воды в пресную. Пресноводный этап жизни в постэмбриональный период не превышает нескольких недель, личинки после выхода из грунта мигрируют в море, к моменту рассасывания желточного мешка способны к осморегуляции и переходу из пресной воды в морскую. Морской период длится чуть более года, после чего горбуша совершает возвратную миграцию для нереста в реки, где в двухлетнем возрасте завершает свой жизненный цикл. Как в реке, так и в море вся популяция горбуши является одновозрастной [1].

Одним из маркерных показателей развития адаптивных ответов организмов на изменение внешних условий признан уровень белковой

деградации. Основными системами белковой деградации у позвоночных животных являются убиквитин-протеасомная, лизосомально-аутофагическая и кальпаиновая, причем у рыб преобладают лизосомальный и кальпаиновый пути [10, 11, 15]. Необходимо отметить, что интенсивность внутриклеточного протеолиза в органах и тканях беломорской горбуши на разных стадиях жизненного цикла ранее не исследовалась. Тем не менее, оценка физиологического состояния горбуши во время ската из реки в море, а также нерестовой миграции и нереста, в том числе по уровню белковой деградации в её органах, актуальна, учитывая роль этого вида в экосистемах беломорских рек. Цель нашей работы – оценить белковый катаболизм у смолтов горбуши (в цельных организмах) во время покатной миграции из р. Индёры в Белое море, а также в скелетных мышцах производителей горбуши в ходе нерестовой миграции из Белого моря в р. Индёру.

Исследование проводилось на р. Индёре (Мурманская обл.). Отлов смолтов горбуши проводился в реке в начале (20 мая) и в конце (02 июня) ската. Производители горбуши были выловлены в преднерестовый период (10–15 августа) на трёх участках р. Индёры: устьевом (солёность 30‰, 19.2 °С, полный прилив), эстуарном (солёность 6‰, 16.8 °С, полный прилив), предэстуарном (пресная вода, 16.3 °С). Пробы тканей и органов фиксировали в жидком азоте. В исследуемых образцах определяли активность кальпаинов – кальцийзависимую казеинолитическую активность, чувствительную к ингибиторам цистеиновых протеиназ [5], химотрипсиноподобную активность протеасом [13], активность катепсина D [2], содержание водорастворимого белка [3], содержание белковых карбонильных групп [9].

Отмечен высокий уровень активности внутриклеточных протеиназ у смолтов всех изученных групп. Для горбуши характерна ранняя смолтификация [7, 16], личинки начинают смолтифицироваться практически сразу после вылупления, еще до полной резорбции желточного мешка [6, 14]. Смолтификация и скат горбуши происходит при очень малом размере особей (~0.2 г) и сопровождается переходом с эндогенного питания на экзогенное. Согласно данным литературы, для покатных смолтов горбуши характерен очень высокий уровень метаболизма [8, 12]; полученные нами результаты о высоком уровне активности внутриклеточных протеиназ у изученных смолтов горбуши также подтверждают в целом высокий уровень метаболизма.

Охарактеризован уровень активности внутриклеточных протеиназ, а также содержание водорастворимых и карбонилированных белков в скелетных мышцах производителей горбуши в ходе нерестовой миграции из Белого моря в р. Индёру. В белых скелетных мышцах исследованных рыб обнаружено отсутствие достоверных изменений растворимой фракции белков, а также повышение активности катепсина D, играющего ведущую роль в деградации мышечных белков, однако не столь значительное, как у других видов лососевых. Для горбуши описаны поведенческие адаптации, направленные на поиск оптимальных путей миграции [4], по сравнению с неркой горбуша расходует меньше энергии на созревание половых продуктов. Указанные особенности позволяют горбуше подойти к нерестилищам в относительно сохранном, неистощённом состоянии со слабыми проявлениями нерестовых изменений. В ходе нерестовой миграции горбуши наблюдалось накопление карбонилированных белков, маркеров оксидативного стресса.

Таким образом, полученные в результате исследования данные о белковой деградации, включая активность протеолитических ферментов, уровень их белковых субстратов, в том числе необратимо повреждённых окислением, в целых организмах смолтов беломорской горбуши, а также в скелетных мышцах горбуши на разных отрезках нерестового пути, в целом согласуются со сведениями литературы, полученными для других видов лососёвых на разных этапах жизненного цикла. Выявленный высокий уровень активности внутриклеточных протеиназ и содержания карбонилированных белков у смолтов горбуши во время покатной миграции из реки Индёры в Белое море свидетельствует о высокой скорости обмена белка и метаболических процессов в целом у недавно вылупившихся и переходящих с эндогенного на экзогенное питание личинок горбуши. Присущие нерестящейся горбуше поведенческие адаптации обуславливают физиологическое состояние её производителей в речной период пути к местам размножения. Так, усиление протеолитических процессов и расход тканевых белков в мышцах горбуши не столь значительны, как у других видов лососёвых, что позволяет ей подойти к нерестилищам с относительно слабыми проявлениями деградации тканей.

Исследование проведено в рамках государственного задания КарНЦ РАН FMEN-2022-0006.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Городилов Ю.Н. О проблеме интродукции тихоокеанских лососей в моря европейской части России // Вестник СПбГУ. Сер. 3. Биология. 2003. № 4. С. 57–63. EDN: RTSZWN.
2. Anson M.L. The estimation of pepsin, trypsin, papain, and cathepsin with hemoglobin // The Journal of general physiology. 1938. Vol. 22, N 1. P. 79–89.
3. Bradford M.M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding // Analytical biochemistry. 1976. Vol. 72, N 1–2. P. 248–254.
4. Crossin G.T., Hinch S.G., Farrell A.P. et al. Pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*) migratory energetics: response to migratory difficulty and comparisons with sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) // Can. J. Zool. 2003. Vol. 81, N 12. P. 1986–1995. DOI: 10.1139/z03-193.
5. Enns D.L., Belcastro A.N. Early activation and redistribution of calpain activity in skeletal muscle during hindlimb unweighting and reweighting // Canadian journal of physiology and pharmacology. 2006. Vol. 84, N 6. P. 601–609.
6. Gallagher Z.S., Bystriansky J.S., Farrell A.P. et al. A novel pattern of smoltification in the most anadromous salmonid: pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*) // Canadian journal of fisheries and aquatic sciences. 2013. Vol. 70, N 3. P. 349–357.
7. Heard W.R. Life history of pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*) // Pacific salmon life histories / eds. C. Groot, L. Margolis. Vancouver: UBC Press, 1991. P. 119–230.
8. Killen S.S., Costa I., Brown J.A. et al. Little left in the tank: metabolic scaling in marine teleosts and its implications for aerobic scope // Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences. 2007. Vol. 274, N 1608. P. 431–438.
9. Levine R.L., Garland D., Oliver C.N. et al. Determination of carbonyl content in oxidatively modified proteins // Methods in enzymology. 1990. Vol. 186. P. 464–478.
10. Martin S.A., Blaney S., Bowman A.S. et al. Ubiquitin–proteasome-dependent proteolysis in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*): effect of food deprivation // Pflügers Archiv. 2002. Vol. 445. P. 257–266.
11. Nemova N.N., Kantserova N.P., Lysenko L.A. The traits of protein metabolism in the skeletal muscle of teleost fish. Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology. 2021. Vol. 57 (3). P. 626–645. DOI: 10.1134/s0022093021030121.
12. Ou M., Hamilton T.J., Eom J. et al. Responses of pink salmon to CO₂-induced aquatic acidification // Nature Climate Change. 2015. Vol. 5, N 10. P. 950–955.
13. Rodgers K.J., Dean R.T. Assessment of proteasome activity in cell lysates and tissue homogenates using peptide substrates // Int J Biochem Cell Biol. 2003. Vol. 35. P. 716–727.
14. Sackville M., Wilson J.M., Farrell A.P. et al. Water balance trumps ion balance for early marine survival of juvenile pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*) // Journal of Comparative Physiology B. 2012. Vol. 182. P. 781–792.
15. Salem M., Nath J., Rexroad C.E. et al. Identification and molecular characterization of the rainbow trout calpains (Capn1 and Capn2): their expression in muscle wasting during starvation // Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology. 2005. Vol. 140, N 1. P. 63–71.
16. Quinn T.P., Myers K.W. Anadromy and the marine migrations of Pacific salmon and trout: Rounsefell revisited // Reviews in Fish Biology and Fisheries. 2004. Vol. 14. P. 421–442.

REFERENCES:

1. Gorodilov Yu.N. On The Problem of Introduction of Pacific Salmons into the Seas of European Russia. *Vestnik SPbGU. Ser. 3. Biologiya*, 2003, no. 4, pp. 57–63. (In Russ.). EDN: RTSZWN.
2. Anson M.L. The estimation of pepsin, trypsin, papain, and cathepsin with hemoglobin. *The Journal of general physiology*, 1938, vol. 22, no. 1, pp. 79–89.
3. Bradford M.M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical biochemistry*, 1976, vol. 72, no. 1–2, pp. 248–254.
4. Crossin G.T., Hinch S.G., Farrell A.P. et al. Pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*) migratory energetics: response to migratory difficulty and comparisons with sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*). *Can. J. Zool.*, 2003, vol. 81, no. 12, pp. 1986–1995. DOI: 10.1139/z03-193.
5. Enns D.L., Belcastro A.N. Early activation and redistribution of calpain activity in skeletal muscle during hindlimb unweighting and reweighting. *Canadian journal of physiology and pharmacology*, 2006, vol. 84, no. 6, pp. 601–609.
6. Gallagher Z.S., Bystriansky J.S., Farrell A.P. et al. A novel pattern of smoltification in the most anadromous salmonid: pink salmon (*Oncorhynchus*

- gorbuscha*). *Canadian journal of fisheries and aquatic sciences*, 2013, vol. 70, no. 3, pp. 349–357.
7. Heard W.R. Life history of pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*), in *Pacific salmon life histories*, C. Groot, L. Margolis Eds. Vancouver: UBC Press, 1991, pp. 119–230.
 8. Killen S.S., Costa I., Brown J.A. et al. Little left in the tank: metabolic scaling in marine teleosts and its implications for aerobic scope *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2007, vol. 274, no. 1608, pp. 431–438.
 9. Levine R.L., Garland D., Oliver C.N. et al. Determination of carbonyl content in oxidatively modified proteins. *Methods in enzymology*, 1990, vol. 186, pp. 464–478.
 10. Martin S.A., Blaney S., Bowman A.S. et al. Ubiquitin–proteasome-dependent proteolysis in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*): effect of food deprivation. *Pflügers Archiv*, 2002, vol. 445, pp. 257–266.
 11. Nemova N.N., Kantserova N.P., Lysenko L.A. The traits of protein metabolism in the skeletal muscle of teleost fish. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*, 2021, vol. 57 (3), pp. 626–645. DOI: 10.1134/s0022093021030121.
 12. Ou M., Hamilton T.J., Eom J. et al. Responses of pink salmon to CO₂-induced aquatic acidification. *Nature Climate Change*, 2015, vol. 5, no. 10, pp. 950–955.
 13. Rodgers K.J., Dean R.T. Assessment of proteasome activity in cell lysates and tissue homogenates using peptide substrates. *Int J Biochem Cell Biol*, 2003, vol. 35, pp. 716–727.
 14. Sackville M., Wilson J.M., Farrell A.P. et al. Water balance trumps ion balance for early marine survival of juvenile pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*). *Journal of Comparative Physiology B*, 2012, vol. 182, pp. 781–792.
 15. Salem M., Nath J., Rexroad C.E. et al. Identification and molecular characterization of the rainbow trout calpains (Capn1 and Capn2): their expression in muscle wasting during starvation. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, 2005, vol. 140, no. 1, pp. 63–71.
 16. Quinn T.P., Myers K.W. Anadromy and the marine migrations of Pacific salmon and trout: Rounsefell revisited. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2004, vol. 14, pp. 421–442.

PROTEIN DEGRADATION IN THE TISSUES AND ORGANS OF THE KOLA PENINSULA PINK SALMON *ONCORHYNCHUS GORBUSCHA* DURING THE DOWNSTREAM AND THE SPAWNING MIGRATION

N.P. Kantserova, L.A. Lysenko

In the work, it is assessed the intensity of protein degradation in tissues of the Kola Peninsula pink salmon during its downstream migration from the Indera River to the White Sea and in skeletal muscles of pink salmon spawners during its spawning migration from the White Sea to the Indera River. The authors have shown a relationship between the level of protein degradation and the life cycle stage of the pink salmon. They have established peculiarities in the physiological state of the Kola Peninsula spawning pink salmon, estimated by the level of intracellular protease activity and the content of carbonylated proteins, as compared to pink salmon species beyond migration.

Keywords: Pink salmon *Oncorhynchus gorbuscha*, intracellular proteases, protein carbonyls, downstream migration, spawning migration, Indera River, White Sea.

Reference: Kantserova N.P., Lysenko L.A. Protein degradation in the tissues and organs of the Kola Peninsula Pink salmon *Oncorhynchus gorbuscha* during the downstream and the spawning migration. *Regional'nye problemy*, 2025, vol. 28, no. 2, pp. 54–57. (In Russ.). DOI: 10.31433/2618-9593-2025-28-2-54-57.

Поступила в редакцию 23.04.2025

Принята к публикации 17.06.2025