

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ РАДИОБИОЛОГИИ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ДИМИНУЦИИ ХРОМАТИНА У ЦИКЛОПОВ (COPEPODA, CRUSTACEA)

А. К. Гришанин^{1,2}

¹Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина Российской академии наук, 152742 Борок, Ярославская обл., Некоузский р-н, e-mail: andreygrishanin@mail.ru

²Государственный университет "Дубна", 141980 г. Дубна, Московская обл., Университетская, 19

Поступила в редакцию 4.04.2025

Приведены результаты работ по радиочувствительности хромосом у *C. kolensis* и *C. insignis* (Copepoda, Crustacea), у одного из которых наблюдается диминуция хроматина, а у второго — отсутствует. Результаты исследований диминуции хроматина методами радиобиологии позволили установить резкое снижение частоты хромосомных aberrаций в последиминуционных клетках и обнаружить низкий уровень спонтанных хромосомных aberrаций во время ранних делений. Дозы гамма-радиации от 1 до 5 Гр приводят к замедлению клеточного цикла у зародышей у *C. kolensis* и *C. insignis*, а облучение дозами от 20 Гр и выше останавливает развитие зародышей на стадии 8–16 кл., при этом процесс диминуции хроматина у зародышей *C. kolensis* не нарушается. Доза 200 Гр блокирует процесс диминуции хроматина у *C. kolensis*.

Ключевые слова: Cyclopoidea, эмбриогенез, γ -излучение.

DOI: 10.47021/0320-3557-2025-70-75

ВВЕДЕНИЕ

Огромное количество радиобиологических исследований было проведено на эукариотических организмах, радиочувствительность которых варьирует в значительных пределах [Сарапульцев, Гераськин, 1993 (Sarapul'tsev, Geras'kin, 1993)]. Сравнение радиочувствительности хромосом в клетках с различной величиной генома обычно проводилось между организмами, принадлежащими либо к одной таксономической группе, либо к видам из разных таксономических групп. Проблему радиочувствительности геномов разного размера можно рассматривать следующим образом. Во-первых, согласно классическому механизму разрыва-сшивания, любые два конца разорванной хромосомы могут способствовать возникновению хромосомных aberrаций обменного типа [Baltimore, 2001]. Если это так, то даже если ограничиться повторяющимися последовательностями, частота радиационно-индуцированных хромосомных aberrаций будет увеличиваться с увеличением размера генома. С другой стороны, мутагенез хромосом может быть направлен на определенную небольшую часть генома. Вероятной мишенью является ДНК, ассоциированная с ядерным матриксом [Akifyev et al., 1995], которая во многом одинакова у разных видов. Тогда выход радиационно-индуцированных хромосомных aberrаций будет лишь незначительно различаться среди видов, существенно различающихся по общему размеру генома.

Уникальную возможность исследования радиочувствительности хромосом в клетках организма, принадлежащего к одному и тому же виду, но с различной величиной генома, исследователи получают при работе с видами,

у которых в ходе онтогенеза проходит диминуция хроматина. Диминуция хроматина представляет собой запрограммированное удаление генетического материала (целых хромосом, их фрагментов или целых геномов) из клеток соматической линии; клетки зародышевой линии сохраняют свою ядерную ДНК неизменной на протяжении всего онтогенеза и лишь в особых случаях элиминации подвергается часть генома клеток зародышевого пути [Tobler et al., 1992; Goday, Pimpinelli, 1993; Гришанин и др., 2006 (Grishanin et al., 2006); Grishanin, 2014; Wang, Davis, 2014; Dedukh, Krasikova, 2021; Zagoskin, Wang, 2021; Klock et al., 2022; Drotos et al., 2022].

Мутагенез, индуцированный γ -излучением в связи с диминуцией хроматина, изучен недостаточно и ограничен немногими работами [Акифьев и др., 1996 (Akifyev et al., 1996); Grishanin et al., 2002; Grishanin, Akifyev, 2005; Grishanin, Chinyakova, 2021]. Эти работы позволили выяснить частоту хромосомных aberrаций в клетках соматической линии зародышей вида *Cyclops kolensis* Lilljeborg, 1901 до и после диминуции хроматина. Для объективного анализа полученных данных был исследован хромосомный мутагенез у вида без диминуции хроматина *Cyclops insignis* Claus, 1857 при сходных дозах ионизирующей радиации.

В своих работах по исследованию диминуции хроматина Boveri [1910], Geyer-Dushinskaya [1959] и Beermann [1977] высказали предположение, что в цитоплазме зародышей видов *Ascaris Linnaeus*, 1758, *Cecidomyiidae* и *Cyclops Müller*, 1785, у которых в раннем эмбриогенезе наблюдается явление диминуции хроматина, имеются факторы, включающие процесс

диминуции хроматина. В своей работе с галлицами *Cecidomyiidae* (Diptera) Geyer-Dushinskaya [1961] использовала ультрафиолетовое излучение для инактивации клеточных ядер зародышей. В своей последующей работе Geyer-Dushinskaya [1961] показала, что в клетках полового пути видов *Cecidomyiidae* имеется гомогенное вещество, окрашивающееся гематоксином, которое подавляет элиминацию хромосом в клетках соматической линии, но если это вещество удалить из клеток полового пути, то в них наблюдается элиминация хроматина. Для выяснения вопроса о времени процесса инициации диминуции хроматина у *C. kolensis* был использован метод радиационной инактивации ядер развивающихся зародышей [Grishanin, Chinyakova, 2021]. Этот метод позволяет

определить стадию развития зародышей, на которой проявляется морфогенетическая функция ядер [Brigs et al., 1951; Нейфах, 1961 (Neyfakh, 1961); Нейфах, 1962 (Neyfakh, 1962); Нейфах, Лозовская, 1961 (Neyfakh, Lozovskaya, 1984)]. Он основан на том, что дозы радиации порядка 10–20 Гр (Грей) разрушают хромосомы, вызывая их многочисленные aberrации, но при этом цитоплазма эмбриональных клеток продолжает выполнять свои функции. Зародыши с инактивированными ядрами развиваются до определенной стадии эмбрионального развития, обусловленной детерминантами яйца. Исчерпав их потенциал, зародыш останавливается в развитии, так как многочисленные хромосомные aberrации блокируют работу ядерного генома пресоматических клеток.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ РАДИОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ХРОМОСОМ ВИДОВ CYCLOPOIDA В СВЯЗИ С РЕДУКЦИЕЙ ГЕНОМА В РЕЗУЛЬТАТЕ ДИМИНУЦИИ ХРОМАТИНА

Исследование зародышей *C. kolensis* методами радиационной биологии до и после диминуции хроматина, а также зародышей вида *C. insignis*, у российской популяции которого диминуция хроматина не обнаружена, показал крайне низкий уровень спонтанных хромосомных aberrаций [Grishanin, Akifyev, 2005]. В интактных постдиминуционных клетках хромосомные aberrации также практически отсутствовали. Анализ клеток зародышей *C. kolensis*, облученных на додиминуционных этапах развития дозой 5 Гр, показал высокий уровень радиочувствительности на додиминуционных этапах развития и очень низкий уровень выхода хромосомных aberrаций в клетках соматической линии после диминуции хроматина [Grishanin, Akifyev, 2005]. Полученные результаты во многом представляются необычными. Во-первых, это крайне низкий уровень спонтанных хромосомных aberrаций на ранних делениях дробления, выявленный как у *C. kolensis*, так и у *C. insignis*. Число спонтанных хромосомных aberrаций на ранних делениях дробления у циклопов, в том числе и в преддиминуционном делении у *C. kolensis*, как минимум в 100–150 раз меньше, чем в наиболее детально изученном в этом отношении объекте — лимфоцитах человека. Это означает, что в клетках циклопов работает эффективная система противомутагенной защиты, которая должна поддерживать целостность хромосом, в целях исключения событий, нарушающих запрограммированную эксцизию элиминируемых участков ДНК, и тем самым обеспечивать высокую точность процесса диминуции хроматина. Точность процесса вырезания элиминируемого хроматина представляет собой необходимое условие для сохранения генетической

информации в клетках соматической линии после диминуции хроматина. Низкий уровень спонтанных хромосомных aberrаций на ранних делениях дробления, выявленный у *C. insignis*, возможно, имеет такое же объяснение, как и для вида *C. kolensis*, несмотря на отсутствие у российской популяции *C. insignis* диминуции хроматина. Дело в том, что у немецкой популяции *C. insignis* обнаружена диминуция хроматина [Einsle, 1993]. Это предполагает, что российская популяция вида *C. insignis* произошла от исходного вида *C. insignis*, обладающего диминуцией хроматина и обитающего в Боденском озере в Германии, потеряв при этом механизм диминуции хроматина, но сохранив низкий уровень спонтанного мутагенеза. Во-вторых, снижение частоты хромосомных aberrаций в клетках соматической линии у *C. kolensis* после диминуции хроматина не пропорционально степени редукции генома. Полученные результаты не укладываются в рамки классической теории индукции хромосомных aberrаций [Savage, 1989]. Исходя из этой теории, частота хромосомных aberrаций в додиминуционных эмбриональных клетках *C. kolensis* после диминуции хроматина должна уменьшаться в соответствии с редукцией генома, т.е. в 15–16 раз. Однако частоты хромосомных aberrаций у зародышевых клеток *C. kolensis* до и после диминуции хроматина различаются в 50 раз [Grishanin, Akifyev, 2005]. Такое несоответствие снижения частоты хромосомных aberrаций и степени редукции генома можно объяснить на основе результатов экспериментов, согласно которым хромосомные aberrации формируются в минорной части генома, связанной с ядерным матриксом и являющейся наиболее изменчивой частью генома

[Akifyev et al., 1995]. Можно предположить, что в результате диминуции хроматина происходит уменьшение числа точек контакта ядерной ДНК пресоматических клеток *C. kolensis* с ядерным матриксом в 50 раз, в результате чего частота хромосомных aberrаций уменьшается в такой же степени. В то же время необходимо отметить, что 94% ДНК, удаляемой из хромосом соматических клеток *C. kolensis* в ходе диминуции хроматина, будут включать значительное количество сайтов ДНК, связанных с ядерным матриксом.

Анализ различий между частотами хромосомных aberrаций в клетках додиминуционных зародышей *C. kolensis* при различных интервалах (от 60 до 180 мин) между облучением и фиксацией позволил высказать предположение о том, что в облученных додиминуционных зародышах процесс цитокинеза замедляется [Grishanin, Akifyev, 2005].

Результаты экспериментов по облучению зародышей *C. insignis* во время 2–3 делений дробления, которые соответствуют додиминуционным делениям дробления у *C. kolensis*, и во

время 7–8 делений дробления, соответствующих последиминуционным делениям дробления у *C. kolensis*, показали близкие частоты хромосомных aberrаций на клетку. Эти частоты, в свою очередь, на порядок ниже, чем у додиминуционных зародышей *C. kolensis*, но в 3–4 раза выше, чем у последиминуционных зародышей *C. kolensis* [Grishanin, Akifyev, 2005]. Уровень спонтанного мутагенеза у *C. insignis* практически такой же низкий, как и у *C. kolensis* [Grishanin, Akifyev, 2005].

Эти данные также можно объяснить с точки зрения концепции о значении участков ДНК ассоциированных с ядерным матриксом в формировании хромосомных aberrаций, высказанных ранее относительно *C. kolensis*. Действительно, при отсутствии диминуции хроматина в клетках зародышей *C. insignis*, геном клеток соматической линии остается неизменным, также неизменным остается число точек контакта ДНК хромосом с ядерным матриксом, а вследствие этого практически неизменными остаются частоты хромосомных aberrаций после воздействия γ -излучения.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ВЫСОКИХ ДОЗ γ -ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЗАРОДЫШИ *C. KOLENSIS* И *C. INSIGNIS*

Методы радиобиологии оказались эффективными при изучении механизмов включения процесса диминуции хроматина. Для определения стадии развития зародышей, на которой проявляется морфогенетическая функция ядер, был использован метод радиационной инактивации ядер.

При облучении эмбрионов *C. kolensis* дозами от 20 до 200 Гр развитие эмбрионов не продвигалось дальше 16-клеточной стадии [Grishanin, Chinyakova, 2021]. Причиной остановки развития зародышей *C. kolensis* на стадии 8–16 кл., является, по-видимому, повреждение хромосом цитоплазматических структур, контролирующих деления дробления [Grishanin, Chinyakova, 2021]. Количество микроядер в интерфазных клетках *C. kolensis* при облучении дозами 20–200 Гр наблюдалось в диапазоне 1.14–6.3 м/я на клетку [Grishanin, Chinyakova, 2021]. В клетках на стадии метафазы-анафазы, были обнаружены многочисленные мосты, фрагменты и слипшиеся хромосомы [Grishanin, Chinyakova, 2021].

Развитие зародышей *C. insignis*, облученных дозами 50–100 Гр, также было ограничено стадией 16 кл. [Grishanin, Chinyakova, 2021]. В ядрах этих клеток было обнаружено много микроядер [Grishanin, Chinyakova, 2021]. В клетках на стадии метафазы-анафазы отмечена высокая частота хромосомных aberrаций, наблюдались слипшиеся хромосомы [Grishanin,

Chinyakova, 2021]. Причиной остановки клеточных делений были, по-видимому, многочисленные хромосомные aberrации.

Известно, что первые деления дробления контролируются сигнальными молекулами, запасенными еще в яйцеклетке [Rivera-Pomar et al., 1995; Jaeger, 2018]. Можно предположить, что развитие эмбрионов *C. kolensis* и *C. insignis* с радиационно-инактивированными ядрами до стадии 8–16 кл. определяется программой развития и регулируется факторами транскрипции и сигнальными молекулами цитоплазмы яйцеклетки. Высокие дозы гамма-излучения инактивируют наследственную информацию, содержащуюся в ядрах клеток эмбрионов *C. kolensis* при дозах 50, 100 Гр, и у части эмбрионов, облученных дозой 200 Гр, но не влияют на компоненты цитоплазмы, которые важны для прохождения диминуции хроматина. Тем не менее, доза радиации 200 Гр у некоторых эмбрионов, по-видимому, нарушила структуру или динамику цитоплазматических факторов, которые регулируют ход диминуционных процессов, что явилось причиной их остановки.

Остановка развития зародышей *C. kolensis* на стадии 8–16 кл. при облучении их дозами γ -излучения от 20 до 200 Гр, а также блокирование диминуционных позволяют предполагать, что детерминанты, включающие процесс диминуции хроматина, находятся в цитоплазме

неоплодотворенного яйца *C. kolensis*, а не регулируются эмбриональными генами.

Здесь необходимо отметить работы А.А. Нейфаха по изучению регуляции процессов развития у *Ascaris suum* и *Parascaris equorum* Goeze, 1782 (Ascaridida, Nematoda) [Нейфак, 1961 (Neyfakh, 1961)]. У обоих видов нематод в раннем эмбриогенезе проходит процесс диминуции хроматина [Bovery, 1910; Tobler et al., 1985, 1992; Muller, Tobler, 2000]. В своих

работах А.А. Нейфак не ставил перед собой задачу изучения влияния γ -излучения на процесс диминуции хроматина у *A. suum* и *P. equorum*, поэтому мы не можем судить о влиянии радиации на диминуцию хроматина у этих видов. Тем не менее эксперименты по облучению эмбрионов *A. suum* на стадии 4 кл. имели результат, сходный с экспериментами на циклопах: развитие остановилось на стадии 16 кл. [Нейфак, 1961 (Neyfakh, 1961)].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, использование методов радиобиологии при изучении двух видов веслоногих раков, у одного из которых проходит диминуция хроматина (*C. kolensis*), а у второго диминуция хроматина не наблюдается (*C. insignis*), дало важные и неожиданные результаты:

- низкий уровень спонтанных хромосомных aberrаций во время ранних делений дробления у зародышей видов *C. kolensis* и *C. insignis*;
- при пятнадцатикратной редукции додиминуционного генома *C. kolensis* частота хромосомных aberrаций в последиминуционных клетках уменьшается в 50 раз;
- облучение додиминуционных зародышей *C. kolensis* дозами гамма-радиации от 1 до

5 Гр приводит к замедлению клеточных циклов, а облучение дозами от 20 Гр и выше останавливает развитие зародышей *C. kolensis* и *C. insignis* на стадии 8–16 кл., при этом процесс диминуции хроматина у зародышей *C. kolensis* не нарушается;

- у части эмбрионов *C. kolensis*, облученных дозой 200 Гр, блокируется процесс диминуции хроматина;
- детерминанты, включающие процесс диминуции хроматина, находятся в цитоплазме неоплодотворенного яйца *C. kolensis*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акифьев А.П., Беляев И.Я., Гришанин А.К. и др. Aberrации хромосом, диминуция хроматина и их значение для понимания молекулярно-генетической организации эукариотических хромосом // Радиационная биология. Радиоэкология. 1996. Т. 36. № 6. С. 789–797.
- Гришанин А.К., Шеховцов А.К., Бойкова Т.В. и др. Проблема диминуции хроматина на рубеже XX и XXI веков // Цитология. 2006. Т. 48. № 5. С. 379–397.
- Нейфак А.А. Сравнительное радиационное исследование морфогенетической функции ядер в развитии животных // Журнал общей биологии. 1961. Т. XXII. № 1. С. 42–57.
- Нейфак А.А. Проблема взаимоотношений ядра и цитоплазмы в развитии. М.: ВИНТИ, 1962. 51 с.
- Нейфак А.А., Лозовская Е.Р. Гены и развитие организма. М.: Наука, 1984. 337 с.
- Сарапульцев Б.И., Гераськин С.А. Генетические основы радиорезистентности и эволюция. М.: Энергоатомиздат, 1993. 208 с.
- Akifyev A.P., Khudolii G.A., Yakimenko A.V. et al. The G¹-process in PHA-stimulated human lymphocytes and the appearance of radiation-induced chromosome aberrations // Russ. J. Genet. 1995. Vol. 31. P. 485–491.
- Beermann S. The diminution of heterochromatic chromosomal segments in *Cyclops* (Crustacea, Copepoda) // Chromosoma. 1977. Vol. 60. P. 297–344. DOI: 10.1007/BF00292858337.
- Einsle U. Crustacea: Copepoda: Calanoida und Cyclopoida. Subwasserfauna on Mitteleuropa 8, Heft 4. Stuttgart: Teil Gustav Fischer Verlag, 1993. 209 p.
- Dedukh D., Krasikova A. Delete and survive: strategies of programmed genetic material elimination in eukaryotes // Biol. Rev. Camb. Philos. Soc. 2022. Vol. 97. P. 195–216. DOI: 10.1111/brv.12796.
- Drotos K.H., Zagoskin M.V., Kess T. et al. Throwing away DNA: programmed downsizing in somatic nuclei // Trends in Genetics. 2022. Vol. 38. P. 483–500. DOI: 10.1016/j.tig.202202003.
- Geyer-Dushinskaya I. Experimental research on chromosome elimination in Cecidomyiidae (Diptera) // J. Exp. Zool. 1959. Vol. 141. P. 391–441. DOI: 10.1002/jez.1401410302.
- Geyer-Duszynska I. Spindle disappearance and chromosome behavior after partial embryo irradiation in Cecidomyiidae // Chromosoma. 1961. Vol. 12. P. 233–247.
- Goday C., Pimpinelli S. The occurrence, role and evolution of chromatin diminution in nematodes // Parasitol. Today. 1993. Vol. 9. P. 319–322. DOI: 10.1016/0169-4758(93)90229-9.
- Grishanin, A.K., S.V. Degtyarev S.V., Akif'ev A.P. Chromosomal radiosensitivity as associated with chromatin diminution in *Cyclops* (Crustacea, Copepoda) // Russ. J. Genet. 2002. Vol. 308. P. 373–378.
- Grishanin A.K., Akifyev A.P. The peculiarities of the radiation mutagenesis of *Cyclops kolensis* and *Cyclops insignis* (Crustacea, Copepoda) // Radiation Biology. Radioecology. 2005. Vol. 45. P. 294–298.

- Grishanin A.K. Chromatin diminution in Copepoda (Crustacea): pattern, biological role and evolutionary aspects // *Comp. Cytogen.* 2014. Vol. 8. P. 1–10. DOI: 10.3897/CompCytogen.v8i1.5913.
- Grishanin A.K., Chinyakova O.A. Study of chromatin diminution in *Cyclops kolensis* (Copepoda, Crustacea) by radiobiological methods // *Comp. Cytogen.* 2021. Vol. 15. P. 329–338. DOI: 10.3897/CompCytogen.v15.i4.64350.
- Jaeger J. Shift happens: The developmental and evolutionary dynamics of gap gene system // *Current Opinion in Systems Biology.* 2018. Vol. 11. P. 65–73. DOI: 10.1016/j.coisb.2018.08.004.
- Kloc M., Kubiak J.Z., Ghobrial R.M. Natural genetic engineering: A programmed chromosome/DNA elimination // *Development.* 2022. Vol. 486. P. 15–25. DOI: 10.1016/j.ydbio.2022.03.008.
- Müller F., Tobler H. Chromatin diminution in the parasitic nematodes *Ascaris suum* and *Parascaris univalens* // *Int. J. Parasitol.* 2000. Vol. 30. P. 391–399. DOI: 10.1016/S0020-7519(99)00199-X.
- Tobler H., Etter A., Müller F. Chromatin diminution in nematode development // *Trends in Genetics.* 1992. Vol. 8. P. 427–432. DOI: 10.1016/0168-9525(92)90326-Y.
- Tobler H., Müller F., Back E., Aeby P. Germ line — soma differentiation in *Ascaris*: a molecular approach // *Experientia.* 1985. Vol. 41. P. 1311–1319.
- Wang J., Davis R.E. Programmed DNA elimination in multicellular organisms // *Current Opinion in Genetics & Development.* 2014. Vol. 27. P. 26–34. DOI: 10.1016/j.gde.2014.03.012.

REFERENCES

- Akifyev A.P., Belyaev I.Ya., Grishanin A.K. et al. Aberracii khromosom, diminuciya khromatina i ikh znachenie dlya ponimaniya molekulyarno-geneticheskoy organizacii ehukarioticheskikh khromosom [Chromosome aberrations, chromatin diminution and their significance for understanding the molecular genetic organization of eukaryotic chromosomes]. *Radiacionnaya biologiya. Radioekologiya*, 1996, vol. 36, no. 6, pp. 789–797. (In Russia)
- Akifyev A.P., Khudolii G.A., Yakimenko A.V. et al. The G¹-process in PHA-stimulated human lymphocytes and the appearance of radiation-induced chromosome aberrations. *Russ. J. Genet.*, 1995, vol. 31, pp. 485–491.
- Beermann S. The diminution of heterochromatic chromosomal segments in *Cyclops* (Crustacea, Copepoda). *Chromosoma*, 1977, vol. 60, pp. 297–344. doi: 10.1007/BF00292858337.
- Dedukh D., Krasikova A. Delete and survive: strategies of programmed genetic material elimination in eukaryotes. *Biol. Rev. Camb. Philos. Soc.*, 2022, vol. 97, pp. 195–216. doi: 10.1111/brv.12796.
- Drotos K.H., Zagoskin M.V., Kess T. et al. Throwing away DNA: programmed downsizing in somatic nuclei. *Trends in Genetics*, 2022, vol. 38, pp. 483–500. doi: 10.1016/j.tig.2022.02.003.
- Einsle U. Crustacea: Copepoda: Calanoida und Cyclopoida. Subwasserfauna on Mitteleuropa 8, Heft 4. Stuttgart, Teil Gustav Fischer Verlag, 1993. 209 p.
- Geyer-Dushinskaya I. Experimental research on chromosome elimination in Cecidomyiidae (Diptera). *J. Exp. Zool.*, 1959, vol. 141, pp. 391–441. doi: 10.1002/jez.1401410302.
- Geyer-Duszynska I. Spindle disappearance and chromosome behavior after partial embryo irradiation in Cecidomyiidae. *Chromosoma*, 1961, vol. 12, pp. 233–247.
- Goday C., Pimpinelli S. The occurrence, role and evolution of chromatin diminution in nematodes. *Parasitol. Today*, 1993, vol. 9, pp. 319–322. doi: 10.1016/0169-4758(93)90229-9.
- Grishanin A.K. Chromatin diminution in Copepoda (Crustacea): pattern, biological role and evolutionary aspects. *Comp. Cytogen.*, 2014, vol. 8, pp. 1–10. doi: 10.3897/CompCytogen.v8i1.5913.
- Grishanin A.K., Akifyev A.P. The peculiarities of the radiation mutagenesis of *Cyclops kolensis* and *Cyclops insignis* (Crustacea, Copepoda) // *Radiation Biology. Radioecology.* 2005. Vol. 45. P. 294–298.
- Grishanin A.K., Chinyakova O.A. Study of chromatin diminution in *Cyclops kolensis* (Copepoda, Crustacea) by radiobiological methods. *Comp. Cytogen.*, 2021, vol. 15, pp. 329–338. doi: 10.3897/CompCytogen.v15.i4.64350.
- Grishanin A.K., Shekhovtsov A.K., Boikova T.V. et al. Problema diminucii khromatina na rubezhe XX i XXI vekov [The problem of chromatin diminution at the turn of the XX and XXI centuries]. *Citologiya*, 2006, vol. 48, no. 5, pp. 379–397. (In Russia)
- Grishanin, A.K., S.V. Degtyarev S.V., Akif'ev A.P. Chromosomal radiosensitivity as associated with chromatin diminution in *Cyclops* (Crustacea, Copepoda). *Russ. J. Genet.*, 2002, vol. 308, pp. 373–378.
- Jaeger J. Shift happens: The developmental and evolutionary dynamics of gap gene system. *Current Opinion in Systems Biology*, 2018, vol. 11, pp. 65–73. doi: 10.1016/j.coisb.2018.08.004.
- Kloc M., Kubiak J.Z., Ghobrial R.M. Natural genetic engineering: A programmed chromosome/DNA elimination. *Development.* 2022, vol. 486, pp. 15–25. doi: 10.1016/j.ydbio.2022.03.008.
- Müller F., Tobler H. Chromatin diminution in the parasitic nematodes *Ascaris suum* and *Parascaris univalens*. *Int. J. Parasitol.*, 2000, vol. 30, pp. 391–399. doi: 10.1016/S0020-7519(99)00199-X.
- Neyfakh A.A. Problema vzaimootnoshenij yadra i citoplazmy v razvitii [The problem of the relationship between the nucleus and cytoplasm in development]. Moscow, VINITI, 1962. 51 p. (In Russia)
- Neyfakh A.A. Sravnitel'noe radiacionnoe issledovanie morfogeneticheskoy funkcii yader v razvitii zhivotnykh [Comparative radiation study of the morphogenetic function of nuclei in animal development]. *Zhurnal obshchej biologii*, 1961, vol. XXII, no. 1, pp. 42–57. (In Russia)
- Neyfakh A.A., Lozovskaya E.R. Geny i razvitie organizma [Genes and the development of the organism]. Moscow, Nauka, 1984. 337 p. (In Russia)

- Sarapul'tsev B.I., Geras'kin S.A. Geneticheskie osnovy radiorezistentnosti i ehvolyuciya [Genetic foundations of radiore-sistance and evolution]. Moscow, Ehnergoatomizdat, 1993. 208 p. (In Russia)
- Tobler H., Etter A., Müller F. Chromatin diminution in nematode development. *Trends in Genetics*, 1992, vol. 8, pp. 427–432. doi: 10.1016/0168-9525(92)90326-y.
- Tobler H., Müller F., Back E., Aeby P. Germ line — soma differentiation in *Ascaris*: a molecular approach. *Experientia*, 1985, vol. 41, pp. 1311–1319.
- Wang J., Davis R.E. Programmed DNA elimination in multicellular organisms. *Current Opinion in Genetics & Develop-ment*, 2014, vol. 27, pp. 26–34. doi: 10.1016/j.gde.2014.03.012.

APPLICATION OF RADIOBIOLOGICAL METHODS IN STUDYING CHROMATIN DIMINUTION IN CYCLOPS (COPEPODA, CRUSTACEA)

A. K. Grishanin^{1,2}

¹*Papanin Institute for Biology of Inland Waters Russian Academy of Sciences
152742 Borok, Russia; e-mail: andreygrishanin@mail.ru*

²*Dubna State University; 141980 Dubna, Universitetskaya, 19, Moscow region
Revised 4.04.2025*

This paper briefly reviews the results of studies on chromosome radiosensitivity in *Cyclops kolensis* and *Cyclops insignis* (Copepoda, Crustacea), one of which exhibits chromatin diminution and the other does not. The results of studies of chromatin diminution using radiobiological methods have revealed a sharp decrease in the frequency of chromosomal aberrations in post-diminution cells and a low level of spontaneous chromosomal aberrations during early divisions. Gamma-radiation doses of 1 to 5 Gy slow down the cell cycle in *C. kolensis* and *C. insignis* embryos, while irradiation at doses of 20 Gy and higher stops embryo development at the 8–16-cell stage, while the process of chromatin diminution in *C. kolensis* embryos is not disrupted. A dose of 200 Gy blocks the process of chromatin diminution in *C. kolensis*.

Keywords: Cyclopoida, embryogenesis, γ -radiation