

## ■ 30 лет Чернобыльской катастрофе

УДК 621:039.58

### ЧЕРНОБЫЛЬ ТРИДЦАТЬ ЛЕТ СПУСТЯ: ОЦЕНКА ПОСЛЕДСТВИЙ БИОЛОГАМИ И МЕДИКАМИ

Я.Б. БЛЮМ<sup>1</sup>, Д.М. ГРОДЗИНСКИЙ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт пищевой биотехнологии и геномики НАН Украины, Киев  
E-mail: blume@nas.gov.ua

<sup>2</sup> Институт клеточной биологии и генетической инженерии НАН Украины, Киев

*Обобщающая статья содержит краткий анализ работ, подводящих итоги клеточно-биологических, молекулярно-генетических и популяционно-генетических исследований, посвященных изучению воздействия на биологические системы острого облучения и хронического радиационного загрязнения вследствие аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г.*

**Ключевые слова:** Чернобыльская АЭС, авария, радионуклиды, радиационное загрязнение, острое и хроническое облучение, рак щитовидной железы, радиочувствительность растений, микроэволюционные изменения, морфозы хвойных, радиоадаптация.

В этом году исполнилось 30 лет с момента аварии на Чернобыльской АЭС – крупнейшей радиационной катастрофы в истории человечества, случившейся 26 апреля 1986 г. В результате этого события значительные территории Беларуси, Украины и России, а также часть территорий стран Скандинавии и Альпийского региона были существенно загрязнены радиоактивными осадками. Вследствие Чернобыльской аварии уровни облучения формировались прежде всего за счет источников β-излучения (<sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr), γ-излучения (<sup>137m</sup>Ba), α-излучения (<sup>238</sup>Pu, <sup>239</sup>Pu, <sup>240</sup>Pu, <sup>241</sup>Am). Внешние дозы облучения определялись уровнями загрязнения соответствующих территорий <sup>137</sup>Cs. Внутренние же дозы облучения определялись поглощением живыми организмами <sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr с водой и пищей. Вдыхаемый воздух, загрязненный изотопами <sup>238,239,240</sup>Pu and <sup>241</sup>Am,

также был важной составляющей внутренних доз облучения.

Систематические исследования, проведенные практически сразу же после Чернобыльской аварии, позволили обнаружить ряд различных биологических эффектов на животных и растительных объектах [1–9]. Однако опасность обнаруженных эффектов на популяционном уровне как для человека, так и для других живых организмов все еще не изучена в достаточной степени и требует дальнейшего исследования.

За прошедшие 30 лет с момента Чернобыльской катастрофы, с целью мониторинга именно популяционных последствий такого масштабного радиоактивного загрязнения и изучения клеточно-биологических и молекулярно-генетических механизмов воздействия острого и хронического облучения на живые организмы, проведено много исследований как украинскими учеными, особенно в первые годы после аварии, так и их белорусскими коллегами с участием зарубежных ученых, прежде всего из США (уже в последующие десятилетия). Поскольку не все эти результаты последовательно обобщены и все еще не нашли достаточно полного отражения в научных публикациях, мы решили посвятить один из выпусков журнала «Цитология и генетика» 2016 г. публикации таких работ.

В статье В.М. Дрозд, М.Л. Лушик, Л.И. Даниловой и др. [10] проанализирован тридцатилетний опыт повторяющихся скрининговых программ и исследований в загрязненных и

© Я.Б. БЛЮМ, Д.М. ГРОДЗИНСКИЙ, 2016

незагрязненных регионах Беларуси. Авторы обсуждают возможные причины противоречивых и спорных заключений о последствиях Чернобыльской катастрофы, сделанных исходя из проведенных разными группами исследований в ранний послеаварийный период. В частности, в работе описываются результаты оценки динамики высоких показателей заболеваемости раком щитовидной железы у детей и подростков, и в связи с этим обсуждается важность продолжения скрининговых обследований населения для раннего выявления заболеваний щитовидной железы.

Статья Н.Д. Тронько и В.М. Пушкарева посвящена анализу основных молекулярно-генетических механизмов образования папиллярной карциномы щитовидной железы [11], по сути единственного вида раковых заболеваний, для которого установлена причинно-следственная связь с радиоактивным загрязнением после Чернобыльской аварии. Поэтому авторы детально анализируют участие ионизирующей радиации в патогенезе папиллярной карциномы щитовидной железы. В частности, ими обсуждается роль микроокружения опухоли, воспалительных процессов и ядерного транскрипционного фактора NF-κB в инициации и развитии папиллярной карциномы щитовидной железы.

В работе В. Дрозд, И. Бранована, Н. Щиглик и др. [12] приводятся весьма интересные и оригинальные результаты о взаимосвязи увеличения частоты заболеваемости раком щитовидной железы от уровня облучения щитовидной железы и уровня загрязнения питьевой воды нитратами. Эти результаты хорошо прослеживаются на примере Беларуси, где содержание нитратов в грунтовых водах резко возросло из-за интенсивного использования азотных удобрений в сельском хозяйстве. Соответственно результаты исследований постчернобыльского периода показали, что увеличение заболеваемости раком щитовидной железы зависит не только от уровня дозы облучения щитовидной железы, но и от уровня нитратов в грунтовых водах. Очевидно, что соответствующие исследования могли бы быть проведены и на других территориях, в том числе и Украины, загрязненных радионуклидами вследствие Чернобыльской катастрофы.

Комплементарно к освещению проблемы заболевания раком у населения, подвергшегося облучению вследствие ядерной аварии на ЧАЭС, в статье И. Бранована и соавт. [13] рассматривается эффективность биполярной радиочастотной абляции узловых образований щитовидной железы. В последнее десятилетие этот метод получает все более широкое применение при лечении узловых образований щитовидной железы. Тем не менее до сих пор явно ощущается недостаток морфологических экспериментальных работ, ориентированных на оценку эффективности применения устройств различного типа. Авторами работы представлены результаты экспериментальных исследований эффективности оригинального инструмента для биполярной радиочастотной абляции, а также продемонстрирована его высокая эффективность для элиминации узлов щитовидной железы различной консистенции и с различным злокачественным потенциалом, что открывает широкие перспективы внедрения в практику такого аппликатора наравне с прочими методами малоинвазивной хирургии.

Как и в случае собранных доказательств воздействия последствий Чернобыльской катастрофы на человека спустя 30 лет после аварии, по-прежнему ощущается дефицит информации о генетических популяционных эффектах радионуклидного загрязнения экосистем. До сих пор нам неизвестно, насколько растения способны адаптироваться к низким дозам хронического ионизирующего излучения и проявлять повышенную устойчивость к радиации. Если допустить, что в популяциях разных видов растений быстро накапливается мутационный груз, следует ожидать быстрых микроэволюционных изменений в биоте зоны отчуждения Чернобыльской АЭС. Одним из следствий такой ситуации является вопрос о том, могут ли растения справляться с повышенной патогенностью грибов и вирусов в Чернобыльской зоне отчуждения. В обзоре И. Бубряка и соавт. [14] предпринята попытка обобщить имеющуюся информацию по этим проблемам и сделать выводы о наиболее актуальных направлениях дальнейших исследований возможных негативных последствий хронического радионуклидного загрязнения экосистем.

Как раз в работе М.М. Данченко и соавт. [15] обсуждаются различные методологические подходы для исследования трансгенерационных изменений метаболических путей в семенах культурных растений в процессе адаптации к хроническому облучению в Чернобыльской зоне отчуждения. Совместное использование общебиологических (цитогенетика, мутагенез) и таких тонких современных подходов, как геномика и протеомика, позволяет проанализировать системный ответ организма и обнаружить скрытые эффекты хронического облучения у растений Чернобыльской зоны. Следует особо отметить эффективное использование авторами методов протеомики, варьирующих от идентификации синтеза и фолдинга отдельных белков до характеристики посттрансляционных модификаций, профилей экспрессии, синтеза белков в период развития семян до стадии полного созревания или белковых взаимодействий при произрастании и развитии растений в условиях перманентного влияния стрессовых факторов. Таким образом, результаты этого исследования наглядно демонстрируют, как использование методов протеомики открывает новые горизонты в понимании скрытых механизмов воздействия малых доз хронического облучения на живые клетки и позволяет визуализировать метаболические изменения вне зависимости от их транскрипционной, трансляционной или эпигенетической природы.

Известно, что наиболее подходящими растительными индикаторными объектами для биомониторинга радиационного загрязнения являются хвойные растения, поскольку они обладают высокой радиочувствительностью [1, 16, 17]. Ранее накопившиеся сведения о молекулярно-биологической природе морфологических аномалий у голосеменных растений, индуцированных хроническим облучением в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС, были обобщены Сорочинским [18]. Тем не менее в последующие годы появился еще ряд достаточно важных работ, посвященных анализу молекулярно-биологических и молекулярно-генетических последствий воздействия хронического облучения на голосеменные растения, произрастающие в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС. Продолжение этого на-

правления работ как раз и проанализировано в обзоре А.И. Емец и соавт. [19], завершающем этот выпуск журнала.

В заключение необходимо сказать, что подборка работ, собранных в нынешнем номере журнала, позволяет сделать обобщенный взгляд с позиций достижений молекулярной и клеточной биологии, геномики и протеомики, молекулярной и популяционной генетики на некоторые узловые моменты в оценке последствий хронического радиационного загрязнения на протяжении 30 лет после Чернобыльской ядерной аварии. За это время активность  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  уменьшилась в два раза. В 2016 г., когда истекло время полужизни  $^{137}\text{Cs}$ , общая площадь с уровнями загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  выше 1 Ки/км<sup>2</sup> (37 кБк/м<sup>2</sup>) (это официально определенный нижний уровень радиоактивного загрязнения после Чернобыльской аварии) в Беларуси, Украине и России уменьшилась в 1,6; 2,7; 2,9 раза соответственно. В 2046 г., когда снова истечет период полужизни  $^{137}\text{Cs}$ , площади с уровнями загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  порядка 37 кБк/м<sup>2</sup> в трех странах в пропорции к 1986 г. составят величины в 2,4; 7 и 5 раз меньше [20]. В течение всего времени после аварии происходило увеличение биодоступности  $^{90}\text{Sr}$  вследствие высвобождения этого радионуклида из горячих частиц (время их полужизни в почве – 2–14 лет), достигнув нынче максимального уровня. Относительно других радионуклидов, загрязняющих зону отчуждения, следует отметить, что уровень активности  $^{238}\text{Pu}$  (время полужизни – 87,7 лет) уменьшился на 20 %, в то время как активность  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{240}\text{Pu}$ , для которых время полужизни составляет тысячи лет, существенно не изменилась. Параллельно происходит аккумуляция радионуклидов  $^{241}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Am}$ , и их активность увеличивается. К настоящему времени активность  $^{241}\text{Am}$  на 33 % выше, чем активность  $^{238+239+240}\text{Pu}$ , и этот показатель будет увеличиваться в последующие 50 лет на 16 % и только затем активность  $^{241}\text{Am}$  (время полужизни – 432,8 лет) будет медленно уменьшаться [20]. Однако увеличение радиоактивного загрязнения окружающей среды в зоне отчуждения некоторыми из наиболее значимых излучателей  $\alpha$ -радиации не будет оказывать существенного влияния на общую радиобиологическую ситуацию.

Таким образом, несмотря на общее улучшение ситуации как в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС, так и на всех прилегающих территориях Беларуси, Украины и России спустя 30 лет после катастрофы, продолжение научных исследований многолетнего воздействия хронического облучения остается по-прежнему актуальным. Это прежде всего касается необходимости продолжения изучения механизмов воздействия этого фактора на организм человека и соответствующих популяционно-генетических исследований, поскольку вопрос радиационной защиты населения в загрязненных после Чернобыльской аварии территориях остается наиболее важным. Однако не менее значимым вопросом, заслуживающим дальнейшего углубленного изучения, является расширение понимания нами воздействия хронического радиационного излучения как на отдельные виды живых организмов в пределах зоны отчуждения, так и на совокупность различных живых объектов в условиях изменяющегося удельного вклада в суммарный радиационный фон каждого из наиболее важных загрязняющих радионуклидов.

CHORNOBYL THIRTY YEARS LATER:  
EVALUATION OF THE CONSEQUENCE  
BY BIOLOGISTS AND MEDICS

Ya.B. Blume, D.M. Grodzinsky

Institute of Food Biotechnology and Genomics,  
Natl. Academy of Sci. of Ukraine, Kyiv

E-mail: blume@nas.gov.ua

Institute of Cell Biology and Genetic Engineering,  
Natl. Academy of Sci. of Ukraine, Kyiv

Summarizing paper contains short analysis of the publications resulting cell biological, molecular genetic and population genetic investigations devoted to studying of acute radiation exposure and chronic radiation contamination effects on biological systems after disaster on Chornobyl nuclear power station in 1986.

ЧОРНОБИЛЬ ТРИДЦЯТЬ РОКІВ ПОТОМУ:  
ОЦІНКА НАСЛІДКІВ БІОЛОГАМИ  
ТА МЕДИКАМИ

Я.Б. Блум, Д.М. Гродзинський

Узагальнююча стаття містить короткої аналіз робіт, що підводять підсумки клітинно-біологічних, молекулярно-генетичних і популяційно-генетичних досліджень, присвячених вивченню впливу гостро-

го опромінення та хронічного радіаційного забруднення на біологічні системи внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС у 1986 р.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРЫ

1. Geras'kin, S.A., Fesenko, S.V., and Alexakhin, R.M., Effects of non-human species irradiation after the Chernobyl NPP accident, *Environ. Int.*, 2008, vol. 34, no. 6, pp. 880–897.
2. Kovalchuk, I., Abramov, V., Pogribny, I., and Kovalchuk, O., Molecular aspects of plant adaptation to life in the Chernobyl zone, *Plant Physiol.*, 2004, vol. 135, no. 1, pp. 357–363.
3. Møller, A.P., and Mousseau, T.A., Biological consequences of Chernobyl: 20 years on, *Trends Ecol. Evol.*, 2006, vol. 21, no. 4, pp. 200–207.
4. Møller, A.P., Mousseau, T.A., Species richness and abundance of forest birds in relation to radiation at Chernobyl, *Biol. Lett.*, 2007, vol. 3, no. 5, pp. 483–486.
5. Møller, A.P., and Mousseau, T.A., Reduced abundance of insects and spiders linked to radiation at Chernobyl 20 years after the accident, *Biol. Lett.*, 2009, vol. 5, no. 3, pp. 356–359.
6. Møller, A.P., and Mousseau, T.A., Efficiency of bio-indicators for low-level radiation under field conditions, *Ecol. Indicators*, 2011, vol.11, no. 2, pp. 424–430.
7. Møller, A.P., Nishiumi, I., Suzuki, H., Ueda, K., and Mousseau, T.A., Differences in effects of radiation on abundance of animals in Fukushima and Chernobyl, *Ecol. Indicators*, 2013, vol. 24, pp. 75–81.
8. Mousseau, T.A., and Müller, A.P., Genetic and ecological studies of animals in Chernobyl and Fukushima, *J. Hered.*, 2014, vol. 105, no. 5, pp. 704–709.
9. Yablokov, A.V., Nesterenko, V.B., and Nesterenko, A.V., *Chernobyl: consequences of the catastrophe for people and the environment*, New York, 2009, 327 p.
10. Drozd, V.M., Lushchik, M.L., Danilova, L.I., Okulevich, N.M., Shimanskaya, I.G., Mitiukova, T.A., Shiglik, N., and Branovan, I., Experience of thyroid gland status screening in postchernobyl period, *Cytol. Genet.*, 2016, vol. 50, no. 6, pp. 8–14.
11. Tronko N.D., Pushkarev V.M. 30 years of the Chernobyl accident. Molecular genetic mechanisms of carcinogenesis of thyroid gland, *Cytol. Genet.*, 2016, vol. 50, no. 6, pp. 15–22.
12. Drozd, V.M., Branovan, I., Shiglik N., Lushchik, M.L., Platonova, T.Y., Pashkevich, V.I., Kudelsky, A.V., Shimanskaya, I., Danilova, L.I., Biko, J., and Reiners, C., Influence of nitrate in drinking water on the prevalence of thyroid cancer and other diseases (literature review and experience in post-chernobyl period in Belarus), *Cytol. Genet.*, 2016, vol. 50, no. 6, pp. 23–28.

13. Branovan, I., Fridman, M., Lushchuk, M., Drozd, V., Krasko, O., Nedzvedz, O., Shiglik, N., and Danilova, L., Morphological evaluation of the effectiveness of bipolar radiofrequency ablation for thyroid nodules, *Cytol. Genet.*, 2016, vol. 50, no. 6, pp. 29–33.
14. Boubriak, I., Akimkina, T., Polischuk, V., Dmitriev, A., Mccready, S., and Grodzinsky, D. Long term effects of chernobyl contamination on dna repair function and plant resistance to different biotic and abiotic stress factors, *Cytol. Genet.*, 2016, vol. 50, no. 6, pp. 34–59.
15. Danchenko, M.M., Klubicova, K., Krivohizha, M.V., Berezhna, V.V., Sakada, V.I., Hajduch, M., and Rashydov, N.M., Systems biology is an efficient tool for investigation of low-dose chronic irradiation influence on plants in the Chernobyl zone, *Cytol. Genet.*, 2016, vol. 50, no. 6, pp. 60–79.
16. Kozubov, G.M., and Taskaev, A.I., The features of morphogenesis and growth processes of conifers in the Chernobyl nuclear accident zone, *Radiat. Biol. Radioecol.*, 2007, vol. 47, pp. 204–223 (in Russian).
17. Watanabe, Y., Ichikawa, S., Kubota, M., Hoshino, J., Kubota, Y., Maruyama, K., Fuma, S., Kawaguchi, I., Yoschenko, V.I., and Yoshida, S., Morphological defects in native Japanese fir trees around the Fukushima Daiichi nuclear power plant, *Sci. Rep.*, 2015, vol. 5, no. art. 13232, doi: 10.1038/srep13232.
18. Sorochinsky, B.V., Molecular-biological nature of morphological abnormalities induced by chronic irradiation in coniferous plants from the Chernobyl exclusion zone: emphasis on a possible role of the cytoskeleton, *Tsitol. Genet.*, 2003, vol. 37, no. 2, pp. 49–55.
19. Yemets, A.I., Blume, R.Ya., and Sorochinsky, B.V., Adaptation of the gymnosperms to the conditions of irradiation in chornobyl zone: from morphological anomalies to the molecular genetic consequences, *Cytol. Genet.*, 2016, vol. 50, no. 6, pp. 80–87.
20. Kashparov, V., Levchuk, S., Khomutynyn, Iu., and Morozova, V., *Chernobyl: 30 Years of Radioactive Contamination Legac*, Ukr. Inst. Agricult. Radiol. of Natl Univ. Life and Environm. Sci. of Ukraine, 2016, [http://www.uia.org.ua/report\\_2016.pdf](http://www.uia.org.ua/report_2016.pdf)

Поступила 10.08.16