



ЦИТОГЕНЕТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ИНТЕРКАЛЯРНОЙ МЕРИСТЕМЕ ХВОИ КРАСНОЙ ЯПОНСКОЙ СОСНЫ В ОТДАЛЕННЫЙ ПЕРИОД ПОСЛЕ АВАРИИ НА АЭС «ФУКУСИМА»

© Д.В. Васильев¹, С.А. Гераськин¹, В.И. Йощенко², М.А. Лыченкова¹, К. Нанба²

¹Федеральное государственное бюджетное научное учреждение

«Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии», Обнинск, Россия;

²Институт радиоактивности окружающей среды, Университет Фукусимы, г. Фукусима, Япония

Для цитирования: Васильев Д.В., Гераськин С.А., Йощенко В.И., Лыченкова М.А., Нанба К. Цитогенетические эффекты в интеркалярной меристеме хвои красной японской сосны в отдаленный период после аварии на АЭС «Фукусима» // Экологическая генетика. – 2020. – Т. 18. – № 4. – С. 483–491. <https://doi.org/10.17816/ecogen18932>.

Поступила: 24.12.2019

Одобрена: 27.09.2020

Принята: 23.12.2020

✿ **Введение.** Несмотря на значительный объем исследований, до настоящего времени отдаленные последствия хронического радиационного воздействия на растения и животных остаются предметом научных дискуссий. После аварии на АЭС «Фукусима» у молодых сосен и елей была обнаружена повышенная частота снятия апикального доминирования. Наиболее вероятная причина наблюдаемых морфозов связана с повреждением излучением апикальных меристем хвойных растений в первые годы после аварии, когда они получили наиболее высокие поглощенные дозы. Если эта гипотеза верна, то даже спустя 8 лет в интеркалярной меристеме хвои растений из этих популяций с высокой долей вероятности можно будет обнаружить повышенный уровень цитогенетических нарушений.

Целью настоящей работы была проверка этой гипотезы.

Материалы и методы. Широкая распространенность на территориях, загрязненных радионуклидами в результате аварии на АЭС «Фукусима», и высокая радиочувствительность обусловили выбор красной японской сосны (*Pinus densiflora* Siebold et Zucc.) в качестве объекта наших исследований. Цитогенетические эффекты были оценены в пяти ее популяциях. Частоту и спектр цитогенетических нарушений в интеркалярной меристеме хвои определяли ана-телофазным методом.

Результаты. Частота aberrantных клеток в интеркалярной меристеме хвои статистически значимо превышает контрольный уровень на всех импактных участках и растет с увеличением дозы. Хотя корреляции между частотой цитогенетических нарушений в хвое и наличием нарушений апикального доминирования у растений не обнаружено, все популяции сосны с радиоактивно загрязненных территорий характеризуются повышенной частотой как цитогенетических нарушений, так и морфозов, связанных со снятием апикального доминирования.

Вывод. Повреждение излучением апикальных меристем хвойных растений в первые годы после аварии, когда они получили наиболее высокие поглощенные дозы, — наиболее вероятная причина повышенной частоты снятия апикального доминирования в исследованных популяциях красной японской сосны из зоны, подвергшейся радиоактивному загрязнению в результате аварии на АЭС «Фукусима».

✿ **Ключевые слова:** авария на АЭС «Фукусима»; красная японская сосна; радиоактивное загрязнение; цитогенетические нарушения; снятие апикального доминирования.

CYTOGENETIC EFFECTS IN THE NEEDLES INTERCALAR MERISTEM OF JAPANESE RED PINE IN THE REMOTE PERIOD AFTER THE FUKUSHIMA NPP ACCIDENT

© D.V. Vasiliev¹, S.A. Geras'kin¹, V.I. Yoschenko², M.A. Lychenkova¹, K. Nanba²

¹Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia;

²Institute of Environmental Radioactivity of Fukushima University, Fukushima, Japan

Cite this article as: Vasiliev DV, Geras'kin SA, Yoschenko VI, Lychenkova MA, Nanba K.. Cytogenetic effects in the needles intercalar meristem of japanese red pine in the remote period after the Fukushima NPP accident.

Ecological genetics. 2020;18(4):483-491. <https://doi.org/10.17816/ecogen18932>.

Received: 24.12.2019

Revised: 27.09.2020

Accepted: 23.12.2020

✿ **Background.** The study of the long-term effects of chronic radiation exposure on plants and animals, which are still the subject of scientific discussion, is necessary to understand the consequences of radiation accidents. After the Fukushima nuclear power plant accident, some of the young pines and spruces showed an increased frequency of apical dominance cancelling. The most probable cause of the observed morphoses is associated with damage to the apical meristem of coniferous plants by radiation in the first year of the accident, when they received the highest absorbed doses. If this hypothesis is true, then even 8 years after the accident it will be possible with high degree of probability to detect an increased level of cytogenetic abnormalities in the intercalary meristem of needles of plants from these populations.

The aim of this work was to verify this hypothesis.

Materials and methods. Five populations of Japanese red pine from territories contaminated with radionuclides as a result of the accident at the Fukushima nuclear power plant were investigated. The frequency and spectrum of cytogenetic abnormalities in the intercalary meristem of needles were determined by the ana-telophase analysis.

Results. The frequency of aberrant cells in the needles intercalary meristem of Japanese red pine from the contaminated with radionuclides territory statistically significantly exceeds the control level in all impact sites and increases along with the dose rate. Although there is no correlation between the frequency of cytogenetic abnormalities in needles and the presence of cancellation of apical dominance in plants, all pine populations from radioactively contaminated territories are characterized by an increased frequency of both cytogenetic abnormalities and morphoses associated with the cancellation of apical dominance.

Conclusion. Radiation damage to the apical meristems of conifers in the first year of the accident, when they received the highest absorbed doses, is the most likely cause of the increased frequency of cancellation of apical dominance in the studied populations of Japanese red pine from the zone affected by the accident at the Fukushima nuclear power plant.

✿ **Keywords:** accident at the Fukushima nuclear power plant; Japanese red pine; radioactive contamination; cytogenetic abnormalities; cancellation of apical dominance.

ВВЕДЕНИЕ

В результате крупных радиационных катастроф значительно ухудшается среда обитания человека, и некоторые ранее густонаселенные районы становятся непригодными для жизни. Одной из таких катастроф является авария на АЭС «Фукусима-Дайичи» в 2011 г. Этой аварии была присвоена максимальная седьмая категория по шкале Международного агентства по атомной энергетике (МАГАТЭ) [1]. Результатом аварии стало радиоактивное загрязнение значительной территории, население вдоль северо-западного следа было эвакуировано. Загрязненные радионуклидами и покинутые людьми территории предоставляют уникальную возможность для оценки последствий длительного хронического радиационного воздействия на живую природу. Несмотря на значительное количество проведенных исследований, до настоящего времени последствия хронического облучения для населяющих эти территории растений и животных остаются предметом научных дискуссий [2–5].

Анализ последствий Чернобыльской катастрофы показал, что хвойные фитоценозы наиболее чувствительны к радиационному воздействию [6, 7]. Исследования в зоне аварии на АЭС «Фукусима» подтверждают этот вывод. В частности, было пока-

зано [8, 9], что молодые деревья сосны и ели с загрязненных радионуклидами территорий характеризуются повышенной частотой морфологических аномалий, связанных с отменой апикального доминирования. Возникает вопрос о причинах формирования такого рода эффектов, и здесь незаменимую помощь могут оказать генетические тест-системы, так как они достаточно чувствительны и способны интегрировать в своем отклике воздействие всех биологически значимых агентов [10].

Наиболее вероятная причина наблюдавшихся в работах [8, 9] морфозов связана с повреждением излучением апикальных меристем хвойных растений в первые годы аварии, когда они получили наиболее высокие поглощенные дозы. Если эта гипотеза верна, то даже спустя 8 лет после аварии в интеркалярной меристеме хвои растений из этих популяций с высокой долей вероятности можно будет обнаружить повышенный уровень цитогенетических нарушений. *Целью* настоящей работы была проверка этой гипотезы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили на широко распространенной в зоне, загрязненной радионуклидами в результате аварии на АЭС «Фукусима», красной

японской сосне (*Pinus densiflora* Siebold et Zucc). Обладая, как и сосна обыкновенная [11], высокой чувствительностью к ионизирующим излучениям, крупными легко идентифицируемыми хромосомами, она является одним из реперных видов, на которых основана современная система радиационной защиты биоты [12].

Исследовали популяции сосны с территорий, загрязненных радионуклидами в результате аварии на АЭС «Фукусима» (рис. 1). Средний возраст большинства деревьев изучаемых популяций на момент отбора проб составлял 5–8 лет. В качестве контроля выбрана популяция растений с территории Фукусимского университета (F). На загрязненных территориях исследовали популяции растений с участков «Акибадай» (A), «Цусима ферма» (Т), «Цусима школа» (S) и «Окума» (O). В каждой популяции выделяли три типа деревьев: с нарушениями апикального доминирования (FA, AA, SA, TA, OA); восстановившиеся после нарушения апикального доминирования (FR, AR, SR, TR, OR) и без морфозов (FN, AN, SN, TN, ON). Доля аномальных деревьев в популяции представлена в табл. 1.

Мощность поглощенной дозы в воздухе измеряли на высоте 1 м с помощью дозиметра PDR-111 (Hitachi-Aloka Medical, Япония). На каждом участке среднее значение мощности дозы и стандартное отклонение определяли по результатам 10–20 измерений. В момент отбора проб, через 8 лет после аварии, основной вклад в поглощенную растениями дозу вносил ^{137}Cs . Мощности дозы в момент отбора проб и координаты экспериментальных участков представлены в табл. 1.

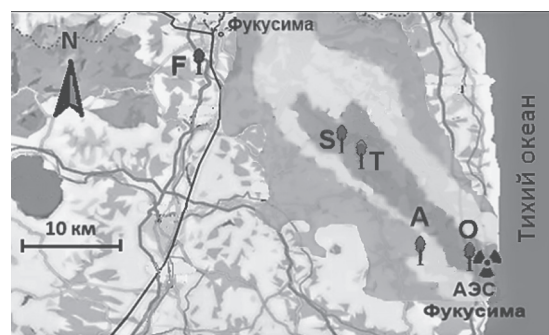


Рис. 1. Схема района исследований. 📍 — места отбора проб. Обозначения в тексте

Молодые побеги с хвоей собирали в мае 2019 г. На каждом участке в пределах гомогенного древостоя отбирали побеги с 10–15 деревьев на высоте 1–2 м от поверхности земли. С каждого дерева брали по 10 молодых побегов, которые фиксировали в уксусном спирте (1 : 3).

Частоту и спектр цитогенетических нарушений в интеркалярной меристеме хвои оценивали в ана-телофазе. Этот метод рекомендован как чувствительный, информативный и хорошо воспроизводимый инструмент биологического мониторинга окружающей среды [10, 13], эффективно использованный в наших предыдущих исследованиях [11, 14].

Для цитогенетического анализа пинцетом отщипывали участок хвои с интеркалярной меристемой и окрашивали ацетоорсеином, после чего готовили временные давленные препараты согласно методике [15]. Все препараты кодировали. В каждом препарате анализировали все клетки на стадиях анафазы или телофазы (3412–7958 ана-телофаз на вариант опыта, 150–450 — на растение)

Таблица 1

Характеристика исследуемых участков (среднее \pm SD)

Вариант	Описание	Мощность дозы, мкЗв/ч ⁻¹	Координаты	Доля деревьев с радиоморфозами
F	Университетский городок, склон холма	0,33 \pm 0,05	37.682921 N, 140.456635 E	0,14 \pm 0,04
A	Заброшенное рисовое поле	3,4* \pm 0,1	37.411508 N, 140.960887 E	0,52* \pm 0,11
T	Заброшенный сельскохозяйственный участок	3,5* \pm 0,3	37.553270 N, 140.786833 E	0,42* \pm 0,07
S	Бывшая спортивная площадка	3,7* \pm 0,4	37.562330 N, 140.768256 E	0,45* \pm 0,06
O	Пологий склон вдоль дороги возле заброшенного спорткомплекса	6,4* \pm 0,4	37.411911 N, 140.994318 E	0,42* \pm 0,06

* Отличие от контроля статистически значимо: $p < 0,05$.

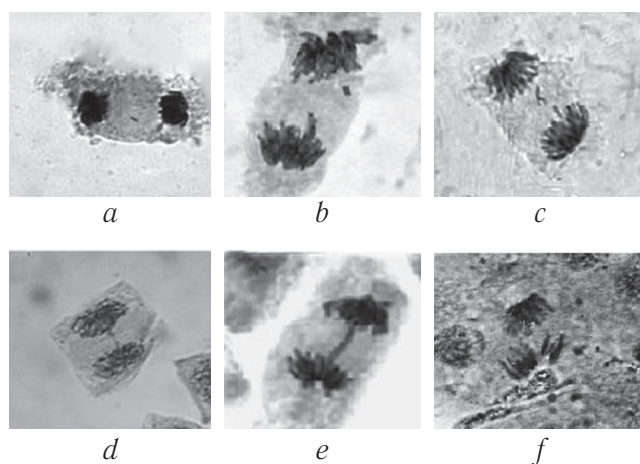


Рис. 2. Аномалии митоза в интеркалярной меристеме хвои красной японской сосны: *a* — одиночный фрагмент; *b* — двойной фрагмент; *c* — отставание; *d* — одиночный мост; *e* — двойной мост; *f* — многополюсный митоз

ний выделяли [15, 16] хроматидные (одиночные), хромосомные (двойные) мосты и фрагменты, многополюсные митозы, а также отставания хромосом (рис. 2). В сложных случаях для точной идентификации типа нарушения использовали изменение фокуса и освещения. Просмотр препаратов проводили на микроскопах Nikon Eclipse 55i и Nikon Eclipse E200 (Nikon, Япония) при общем увеличении $\times 400$ – 1000 .

Экспериментальные данные проверяли на наличие выбросов по критерию Диксона. Четыре

выброса, превышающие критическое значение при $p = 0,05$, были исключены из дальнейшего рассмотрения. Анализ данных проводили в программе Microsoft Office Excel 2007 методами вариационной статистики (дисперсионный и корреляционный анализ). Гипотезу о соответствии выборок экспериментальных данных нормальному распределению проверяли с помощью IBM SPSS Statistics по критерию Колмогорова – Смирнова. Поскольку экспериментальные данные были распределены в соответствии с нормальным законом, различия между средними значениями определяли по критерию Стьюдента и считали значимыми при $p < 0,05$. Для оптимизации объема выборки применяли методику статистического анализа эмпирических распределений [17].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Эмпирические распределения данных о цитогенетических эффектах в исследуемых популяциях имеют высокую однородность как для всей совокупности изученных деревьев (коэффициент вариации 0,8–1,2), так и между растениями каждой популяции (коэффициент вариации 0,2–0,4). Частота цитогенетических нарушений в интеркалярной меристеме хвои на всех загрязненных радионуклидами участках статистически значи-

Таблица 2

Частота aberrantных клеток в интеркалярной меристеме хвои и относительный вклад разных видов цитогенетических нарушений

Вариант	ВК	АК, % \pm SD	Спектр					
			$f' + m' \pm$ SD		$f'' + m'' \pm$ SD		$g + mp \pm$ SD	
			f'	m'	f''	m''	g	mp
F	7958	$1,08 \pm 0,11$	$25,16 \pm 0,05$		$32,08 \pm 0,05$		$42,77 \pm 0,05$	
			$13,21 \pm 0,02$	$11,95 \pm 0,02$	$3,77 \pm 0,03$	$28,30 \pm 0,03$	$38,36 \pm 0,04$	$4,40 \pm 0,01$
A	4422	$2,15^* \pm 0,21$	$17,95 \pm 0,04$		$48,72 \pm 0,06$		$33,33 \pm 0,05$	
			$3,85^* \pm 0,01$	$14,10 \pm 0,01$	$8,33 \pm 0,02$	$40,38 \pm 0,03$	$27,56 \pm 0,03$	$5,77 \pm 0,02$
T	3467	$2,83^* \pm 0,38$	$9,24^* \pm 0,04$		$63,59^* \pm 0,06$		$27,17 \pm 0,06$	
			$4,35^* \pm 0,01$	$4,89 \pm 0,01$	$6,52 \pm 0,02$	$57,07^* \pm 0,02$	$23,91^* \pm 0,02$	$3,26 \pm 0,01$
S	4591	$2,06^* \pm 0,21$	$11,30^* \pm 0,04$		$53,04^* \pm 0,06$		$35,65 \pm 0,06$	
			$2,61^* \pm 0,01$	$8,70 \pm 0,02$	$14,35^* \pm 0,02$	$38,70 \pm 0,02$	$30,87 \pm 0,02$	$4,78 \pm 0,02$
O	3412	$3,88^* \pm 0,37$	$9,27^* \pm 0,03$		$47,10 \pm 0,05$		$43,63 \pm 0,05$	
			$4,63^* \pm 0,01$	$4,63^* \pm 0,01$	$11,20^* \pm 0,01$	$35,91 \pm 0,02$	$35,52 \pm 0,02$	$8,11 \pm 0,01$

Примечание. ВК — число просмотренных клеток в стадиях анафазы и телофазы; АК — aberrantные клетки; f' , m' — хроматидные (одиночные) фрагменты и мосты; f'' , m'' — хромосомные (двойные) фрагменты и мосты; g — отставания хромосом; mp — многополюсные митозы; отличие от контроля статистически значимо: $* p < 0,05$.

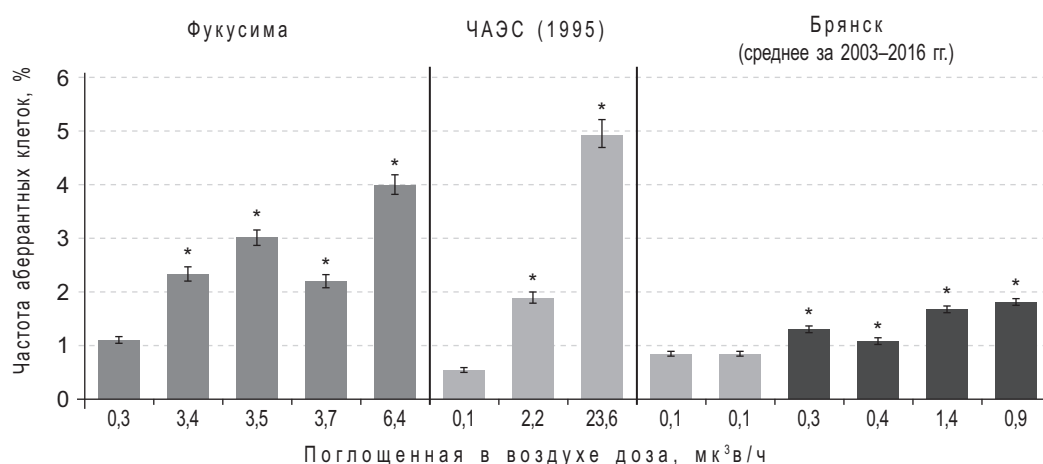


Рис. 3. Частота цитогенетических нарушений в популяциях красной японской сосны (настоящее исследование) и популяциях сосны обыкновенной из 30-километровой зоны ЧАЭС [19] и Брянской области [14]. Отличие от контроля статистически значимо: * $p < 0,05$

мо превышает контрольный уровень (табл. 2). Наибольшая частота нарушений наблюдалась на участке О, расположенном ближе всего к АЭС «Фукусима». Между участками А, S и Т различия в частоте цитогенетических нарушений статистически незначимы ($p < 0,05$), уровни поглощенных в воздухе доз также мало различаются. Вывод о радиационной природе наблюдаемых изменений подтверждает наличие статистически значимой корреляции частоты цитогенетических нарушений с дозой ($r = 0,95$, $p < 0,05$). Таким образом, в популяциях красной японской сосны, характеризующихся повышенной частотой снятия апикального доминирования (табл. 1), статистически значимо увеличена и частота цитогенетических нарушений в интеркалярной меристеме хвои (табл. 2), что свидетельствует в пользу нашей гипотезы о радиационной природе формирования этого типа морфозов.

Сопоставим результаты этого исследования с данными наших предыдущих наблюдений за популяциями сосны обыкновенной с территорий, загрязненных радионуклидами в результате аварии на Чернобыльской АЭС. Эти исследования были проведены в 1995 г. в 30-километровой зоне ЧАЭС (через 9 лет после аварии, что сопоставимо по времени с началом данного исследования — через 8 лет после аварии на АЭС «Фукусима») и в наиболее загрязненных радионуклидами районах Брянской области (2003–2016). Несмотря на то что в популяциях красной японской сосны частота цитогенетических нарушений

оценивалась в интеркалярной меристеме хвои, а в популяциях сосны обыкновенной — в корешках проростков семян, качественно полученные результаты сопоставимы (рис. 3), хотя частота цитогенетических нарушений в интеркалярной меристеме как правило выше, чем в апикальной меристеме корней проростков [14, 18]. Во всех трех полевых исследованиях частота цитогенетических нарушений статистически значимо растет с мощностью дозы хронического облучения (Фукусима: $r = 0,94$, $p < 0,05$; 30-километровая зона ЧАЭС: $r = 0,98$, $p < 0,05$; Брянская область: $r = 0,85$, $p < 0,05$).

Дополнительную информацию о природе факторов, вносящих основной вклад в увеличение уровня мутационной изменчивости, можно получить, анализируя спектр цитогенетических нарушений. Поскольку частота индукции разных видов структурных мутаций зависит от механизма действия фактора [20], по изменению относительного вклада разных видов мутаций можно сделать вывод, какой фактор вносит основной вклад в наблюдаемое увеличение частоты мутаций [10, 14]. В частности, ионизирующее излучение чаще индуцирует крупные генетические изменения (делеции и перестройки), что выражается в повышенной частоте хромосомных aberrаций [21], а большинство химических мутагенов вызывают главным образом митотические аномалии и хроматидные aberrации [10]. Действительно, в популяциях красной японской сосны из районов Т и S наблюдается статистически значимое увеличение частоты хромосомных

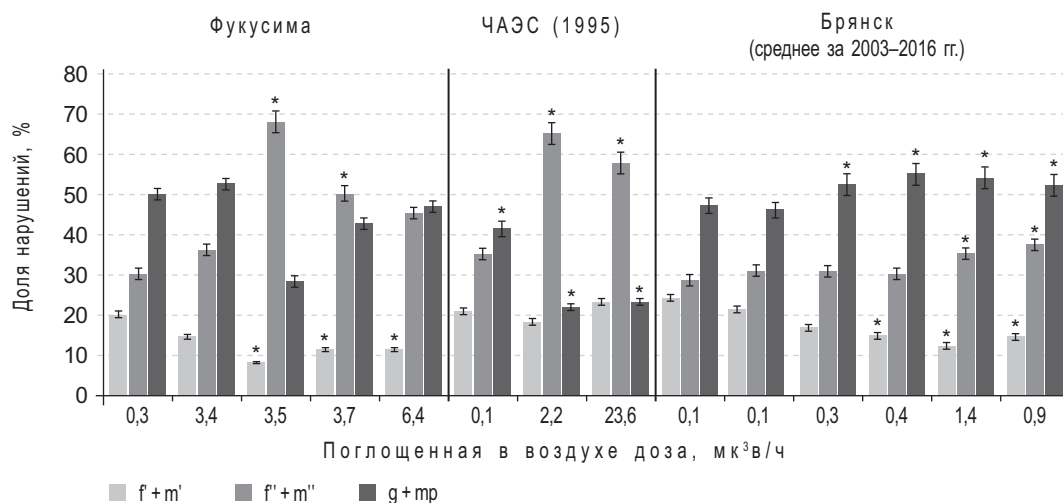


Рис. 4. Спектр цитогенетических нарушений в популяциях красной японской сосны (настоящее исследование) и сосны обыкновенной из 30-километровой зоны ЧАЭС [19] и Брянской области [11]. f' , m' — хроматидные (одиночные) фрагменты и мосты; f'' , m'' — хромосомные (двойные) фрагменты и мосты; g — отставания хромосом; mp — многополюсные митозы. Отличие от контроля статистически значимо: * $p < 0,05$

нарушений. При этом различия по спектру нарушений у деревьев внутри каждой популяции незначительны (коэффициент вариации 0,62–3,56). Так же, как и в наших предыдущих исследованиях на сосне обыкновенной, имеется тенденция к увеличению вклада хромосомных aberrаций с ростом мощности дозы (рис. 4). Таким образом, данные о соотношении разных видов цитогенетических нарушений в исследуемых популяциях красной японской сосны являются еще одним подтверждением радиационной природы наблюдаемых изменений.

Поскольку наши исследования проводились на популяциях, которые в 2014–2016 гг. обследовались на наличие радиоморфозов [9], возможно проверить наличие взаимосвязи между снятием апикального доминирования и частотой цитогенетических нарушений в хвое. Для этого частота цитогенетических нарушений на каждом экспериментальном участке была отдельно рассчитана для растений, у которых наблюдались нарушения апикального доминирования (FA, AA, SA, TA, OA), растений, восстановившихся после нарушения апикального доминирования (FR, AR, SR, TR, OR), и растений без радиоморфозов (FN, AN, SN, TN, ON). Проведенный анализ не выявил (рис. 5) статистически значимых различий между растениями из разных групп по частоте цитогенетических нарушений. Тем не менее необходимо отметить, что все загрязненные радионуклидами

участки характеризуются не только повышенной частотой цитогенетических эффектов (табл. 2), но и высокой частотой снятий апикального доминирования (табл. 1). Радиочувствительность клеток меристемы на несколько порядков выше, чем дифференцированных и специализированных, поэтому они являются критическими тканями в условиях облучения [22] и повреждаются при дозах, не оказывающих видимых эффектов на сформированные органы и ткани. Поэтому в первые годы аварии, когда растения получили наиболее высокие поглощенные дозы, апикальные меристемы могли быть серьезно повреждены. Повреждение апикальной меристемы стимулирует пролиферативную активность более радиостойчивых спящих почек, из которых образуются боковые побеги, то есть ведет к снятию апикального доминирования. В ряде случаев наблюдается восстановление апикального доминирования, когда один из побегов подавляет рост других и занимает лидирующее положение.

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что повышенная частота цитогенетических нарушений в хвое красной японской сосны, населяющей загрязненные радионуклидами участки, обусловлена радиационным воздействием. Даже спустя 8 лет после аварии на АЭС «Фукусима», существующие уровни радиоактивного загрязнения способны оказывать негативное воздействие на чувствительные к действию ионизиру-

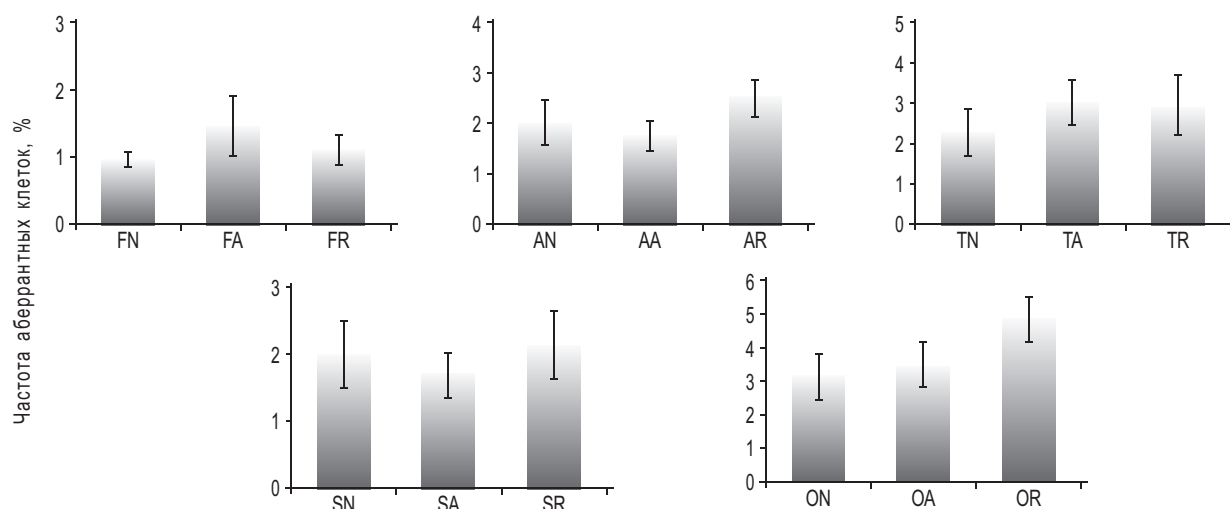


Рис. 5. Взаимосвязь частоты цитогенетических эффектов и нарушений апикального доминирования. По оси абсцисс группы деревьев: с нарушениями апикального доминирования (FA, AA, SA, TA, OA); восстановленные (FR, AR, SR, TR, OR); без морфозов (FN, AN, SN, TN, ON)

ющего излучения растения. Полученные данные сопоставимы с результатами наших исследований в районах, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате аварии на ЧАЭС, и позволяют объяснить формирование в первый период аварии у молодых хвойных деревьев морфозов, связанных со снятием апикального доминирования.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 119-54-50003 и гранта JSPS (JPJSBP120194806) в рамках двусторонней программы поддержки совместных проектов РФФИ-JSPS.

ЛИТЕРАТУРА

1. Annual report 2011. World Trade Organization; 2011. 158 p. Available from: https://www.wto-ilibrary.org/the-wto/annual-report-2011_52320670-en.
2. Garnier-Laplace J, Beaugelin-Seiller K, Della Vedova C, et al. Radiological dose reconstruction for birds reconciles outcomes of Fukushima with knowledge of dose-effect relationships. *Sci Rep.* 2015;5:16594. <https://doi.org/10.1038/srep16594>.
3. Horiguchi T, Yoshii H, Mizuno S, et al. Decline in intertidal biota after the 2011 Great East Japan earthquake and tsunami and the Fukushima nuclear disaster: field observations. *Sci Rep.* 2016;6:20416. <https://doi.org/10.1038/srep20416>.
4. Okano T, Ishiniwa H, Onuma M, et al. Effects of environmental radiation on testes and spermatogenesis in wild large Japanese field mice (*Apodemus speciosus*) from Fukushima. *Sci Rep.* 2016;6:23601. <https://doi.org/10.1038/srep23601>.
5. Otaki JM. Fukushima's lessons from the blue butterfly: a risk assessment of the human living environment in the post-Fukushima era. *Integr Environ Assess Manag.* 2016;12(4):667-672. <https://doi.org/10.1002/ieam.1828>.
6. Козубов Г.М., Таскаев А.И. Радиобиологические и радиоэкологические исследования древесных растений (по материалам 7-летних исследований в районене аварии на Чернобыльской АЭС). – СПб.: Наука, 1994. – 252 с. [Kozubov GM, Taskaev AI. Radiobiologicheskiiye i radioekologicheskiiye issledovaniya drevesnykh rasteniy (po materialam 7-letnikh issledovaniy v rayonene avarii na Chernobyl'skoy AES). Saint Petersburg: Nauka; 1994. 252 p. (In Russ.)]
7. Гераськин С.А., Фесенко С.В., Алексахин Р.М. Воздействие аварийного выброса Чернобыльской АЭС на биоту // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2006. – Т. 46. – № 2. – С. 178–188. [Geras'kin SA, Fesenko SV, Aleksakhin RM. The effects of non-human species irradiation after the CHNPP accident. *Radiation biology. Radioecology.* 2006;46(2):178-188. (In Russ.)]

8. Watanabe Y, Ichikawa S, Kubota M, et al. Morphological defects in native Japanese fir trees around the Fukushima Dai-Ichi nuclear power plant. *Sci Rep.* 2015;5:13232. <https://doi.org/10.1038/srep13232>.
9. Yoschenko V, Nanba K, Yoshida S, et al. Morphological abnormalities in Japanese red pine (*Pinus densiflora*) at the territories contaminated as a result of the accident at Fukushima Dai-Ichi Nuclear power plant. *J Environ Radioact.* 2016;165:60-67. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.09.006>.
10. Гераськин С.А., Сарапульцева Е.И., ред. Биологический контроль окружающей среды: генетический мониторинг. — М.: Академия, 2010. — 206 с. [Geras'kin SA, Sarapultseva EI, eds. *Biologicheskii kontrol' okruzhayushchey sredy: geneticheskii monitoring.* Moscow: Academy; 2010. 206 p. (In Russ.)]
11. Geras'kin S, Volkova P, Vasiliyev D, et al. Scots pine as a promising indicator organism for bio-monitoring of the polluted environment: a case study on chronically irradiated populations. *Mutat Res.* 2019;842:3-13. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2018.12.011>.
12. ICRP Publication 108. Environmental protection: the concept and use of reference animals and plants. *Ann ICRP.* 2009;38(4-6):1-242.
13. Kalaev VN, Butorina AK. Cytogenetic effect of radiation in seed of oak (*Quercus robur* L.) trees growing on sites contaminated by Chernobyl fallout. *Silvae Genetica.* 2006;55(1-6):93-101. <https://doi.org/10.1515/sg-2006-0014>.
14. Geras'kin SA, Kim JK, Oudalova AA, et al. Bio-monitoring the genotoxicity of populations of Scots pine in the vicinity of a radioactive waste storage facility. *Mutat Res.* 2005;583(1):55-66. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2005.02.003>.
15. Паушева З.П. Практикум по цитологии растений. — М.: Агропромиздат, 1988. — 272 с. [Pausheva ZP. *Workshop on plant cytology.* Moscow: Agropromizdat; 1988. 272 p. (In Russ.)]
16. Бочков Н.П., Демин Ю.С., Лучник Н.В. Классификация и методы учета хромосомных aberrаций в соматических клетках // Генетика. — 1972. — Т. 8. — № 5. — С. 133–141. [Bochkov NP, Demin YuS, Luchnik NV. Classification and methods of accounting for chromosomal aberrations in somatic cells. *Genetics.* 1972;8(5):133-141. (In Russ.)]
17. Гераськин С.А., Фесенко С.В., Черняева Л.Г., Санжарова Н.И. Статистические методы анализа эмпирических распределений коэффициентов накопления радионуклидов растениями // Сельскохозяйственная биология. — 1994. — Т. 29. — № 1. — С. 13–37. [Geras'kin SA, Fesenko SV, Chernyaeva LG, Sanzharova NI. Statistical methods for the analysis of empirical distributions of the coefficients of accumulation of radionuclides by plants. *Agricultural Biology.* 1994;29(1):13-37. (In Russ.)]
18. Дикарев В.Г., Гераськин С.А., Дикарев А.В., Дикарева Н.С. Сравнительный анализ эффективности использования интеркалярных и апикальных меристем ячменя для биоиндикации генотоксического действия свинца // Экологическая генетика. — 2018. — Т. 16. — № 3. — С. 37–46. [Dikarev VG, Geras'kin SA, Dikarev AV, Dikareva NS. The comparative analysis of effectiveness of barley intercalary and apical meristems applying for bioindication of lead influence genotoxicity. *Ecological genetics.* 2018;16(3):37-46. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.17816/ecogen16337-46>.
19. Гераськин С.А., Зими́на Л.М., Дикарев В.Г., и др. Сравнительный анализ методами биоиндикации антропогенного загрязнения района расположения предприятия по переработке и хранению радиоактивных отходов и 30-км зоны ЧАЭС // Экология. — 2000. — № 4. — С. 300–303. [Geras'kin SA, Zimina LM, Dikarev VG, et al. Comparative analysis by methods of bioindication of anthropogenic pollution of the area where the enterprise for the processing and storage of radioactive waste and the 30-km zone of the Chernobyl nuclear power plant. *Rus J Ecology.* 2000;(4):300-303. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.1007/bf02764060>.
20. Фогель Ф., Мотульски А. Генетика человека. Т. 2. — М.: Мир, 1990. — 378 с. [Fogel F, Motul'ski A. *Human genetics.* Vol. 2. Moscow: Mir; 1990. 378 p. (In Russ.)]

21. Streffer C, Bolt H, Follesdal D, et al. Low dose exposures in the environment. Dose-effect relations and risk evaluation. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag; 2004. 476 p. https://doi.org/10.1007/978-3-662-08422-9_9.
22. Гудков И.Н. Основы общей и сельскохозяйственной радиобиологии. — Киев: УСХА, 1991. — 328 с. [Gudkov IN. Fundamentals of general and agricultural radiobiology. Kiev: Publishing house of USKHA; 1991. 328 p. (In Russ.)]

✿ Информация об авторах

Денис Владимирович Васильев — канд. биол. наук, старший научный сотрудник, лаборатория № 6. ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии», Обнинск. E-mail: treworqwert@mail.ru.

Станислав Алексеевич Гераскин — д-р биол. наук, руководитель лаборатории № 6. ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии», Обнинск. E-mail: stgeraskin@gmail.com.

Василий Иванович Йощенко — канд. биол. наук, профессор проекта. Институт радиоактивности окружающей среды, Университет г. Фукусимы, Япония. E-mail: r705@ipc.fukushima-u.ac.jp.

Мария Александровна Лыченкова — младший научный сотрудник лаборатории № 6. ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии», Обнинск, Россия. E-mail: lychenkovamariya@gmail.com.

Кенджи Нанба — канд. с.-х. наук, профессор, факультет наук о симбиотических системах. Институт радиоактивности окружающей среды, Университет г. Фукусимы, Япония. E-mail: nanba@sss.fukushima-u.ac.jp.

✿ Authors and affiliations

Denis V. Vasiliev — Cand. Sci. (Biol.), Senior Scientific Researcher, Laboratory No. 6. Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia. E-mail: treworqwert@mail.ru.

Stanislav A. Geraskin — Dr. Sci. (Biol.), Head of Laboratory No. 6. Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia. E-mail: stgeraskin@gmail.com.

Vasyl I. Yoschenko — Project Professor, PhD in B.S. Institute of Environmental Radioactivity at Fukushima University, Fukushima, Japan. E-mail: r705@ipc.fukushima-u.ac.jp.

Maria A. Lychenkova — ml. scientific al. Laboratory No. 6. Russian Institute of Radiology and agroecology, Obninsk, Russia. E-mail: lychenkovamariya@gmail.com.

Kenji Nanba — PhD in A.S., Professor, Faculty of Symbiotic Systems Science. Institute of Environmental Radioactivity at Fukushima University, Fukushima, Japan. E-mail: nanba@sss.fukushima-u.ac.jp.