

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ ГЕНЕТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ СУБПОПУЛЯЦИЙ ДУБА ЧЕРЕШЧАТОГО И СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ В УСЛОВИЯХ ДЛИТЕЛЬНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ МАЛЫХ ДОЗ РАДИАЦИИ

В.А. Сиволапов, Л.А. Логинова, Е.А. Воробьева,
В.Н. Вепринцев[✉], С.В. Щетинкин

ФБУ «Рослесозащита» — «ЦЗЛ Воронежской области», 394000, г. Воронеж, ул. Ломоносова, д. 105

vprintsevvn@rcfh.ru

Рассмотрена вероятность возникновения популяционно-значимых изменений генома в результате длительного воздействия повышенного радиационного фона среды обитания основных лесобразующих пород. Размер загрязнения на стационарных участках соотнесен с уровнем гетерозиготности выборок сосны и дуба.

Ключевые слова: радиоактивное загрязнение, сосна, дуб, радиационное воздействие, ПЦР, ДНК, гетерозиготность

Ссылка для цитирования: Сиволапов В.А., Логинова Л.А., Воробьева Е.А., Вепринцев В.Н., Щетинкин С.В. Оценка изменений генетической структуры субпопуляций дуба черешчатого и сосны обыкновенной в условиях длительного воздействия малых доз радиации // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2022. Т. 26. № 3. С. 14–20. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-14-20

Еще в XIX в. было обнаружено, что рентгеновские лучи вызывают повышенную частоту появления мутантных потомков у насекомых, родителей которых подвергали облучению, и сформулированы некоторые общие принципы действия радиации на живые системы. Принцип отсутствия пороговой дозы свидетельствует о том, что абсолютно безопасных для живых организмов доз излучения не существует и любое радиационное воздействие может вызвать генетические изменения у потомков облученного родителя. Суть принципа «накопления дозы» состоит в том, что дозы, полученные организмом в течение жизни аккумулируются, поэтому чем больше продолжительность жизни, тем более вероятны последствия как для организма, так и для его потомства. Принцип удваивающей дозы введен для сопоставления относительного эффекта генетических нарушений, возникших в результате естественного мутационного процесса и индуцированного радиационным воздействием. Так, для растений количество энергии, необходимое для удвоения количества мутаций по сравнению с естественным уровнем мутирования, лежит в широком диапазоне — 8...390 рад [1].

После открытия повреждающего действия ионизирующих излучений, выражающегося в гибели клеток различных тканей, или всего организма было обнаружено, что величины доз, приводящие к летальным эффектам, различаются в широких пределах, порой на несколько порядков. Другими словами, каждому биологическому

объекту свойственна своя мера восприимчивости к воздействию ионизирующей радиации, т. е. видовая радиочувствительность.

Радиочувствительность может сильно варьировать даже в пределах одного вида и определяется понятием «индивидуальная радиочувствительность» [2].

Среди прочих радиоактивных изотопов, длительно присутствующих в местах загрязнения после произошедших на объектах атомного профиля аварий, особому учету подлежат цезий-137 и стронций-90. Являясь, с точки зрения метаболических путей химическими аналогами калия и кальция, они представляют опасность для млекопитающих, в том числе для человека [3].

Радионуклиды (цезий-137, стронций-90) в дерново-подзолистых, оподзоленных супесчанно-песчаных (в меньшей степени суглинистых) почвах мигрируют ежегодно в более глубокие горизонты, попадая рано или поздно в корнеобитаемые слои почвы. Здесь они захватываются корневой системой растений и вновь выносятся растениями на поверхность. Поэтому поверхность почв на некоторое время в местах загрязнений ставшая менее радиоактивной, оказывается со временем более радиоактивной (за счет листового опада и пр.). Скорость вертикальной миграции различна для разных радионуклидов, видов растений и гранулометрического состава почв. Коэффициент перехода может отличаться на порядки [4].

В 2016 г. Научный комитет ООН по действию атомной радиации оценил эффекты радиационного воздействия на растения и животных и

обнаружил, что гипотетический диапазон доз облучения 1...10 Гр вряд ли приведет к эффектам в популяциях животных и растений, однако индивидуальные реакции на радиационное воздействие варьируют. Когда уровни радиационного воздействия являются низкими или очень низкими, что более характерно для среднего радиационного воздействия, возникновение отдаленных эффектов не подтверждается, с учетом статистических и других неопределенностей. Тем не менее вследствие возможных индивидуальных реакции организмов подобные эффекты нельзя исключать [5]. Исследования динамики изменения биометрических показателей древесных видов указывают на пропорциональный характер воздействия радиации [6]. Известно, что хвойные деревья более чувствительны и заметно дольше восстанавливаются после радиационного воздействия, чем лиственные, в том числе по причине отсутствия у первых сезонного листопада и возможности быстро избавиться от зараженной биомассы.

На молекулярном уровне ионизирующее излучение может приводить к одно- и двуцепочечным разрывам ДНК, а также сшивкам между азотистыми основаниями, белками матрикса и гистонами [7]. Подобные процессы по своей природе носят случайный характер локализации и выше упомянутые перестройки имеют место как в интронной, так и в экзонной (значимой) части генома.

Перестройки, сопровождающиеся перемещением только поврежденных участков хромосом, когда весь генетический материал остается связанным с центромерой и может равномерно распределяться между дочерними клетками, относятся к стабильным, так как они могут передавать генетический материал из поколения в поколение, сохраняясь в организме в течение многих лет. Примером могут служить транслокации, при которых участок генома перемещается в новое для него место в молекуле ДНК, но продолжает функционировать [2].

Такая хромосомная абберрация, как потеря гетерозиготности генов-супрессоров опухолевого роста, часто приводит к онкологии у млекопитающих [8]. Для сосны повышенная частота хромосомных абберраций также свойственна фенотипически мутантным формам. Причины подобных нарушений связывают преимущественно со стрессовыми условиями или длительным воздействием неблагоприятных факторов окружающей среды. К ним можно отнести и облучение в местах радиационного загрязнения. Сосна обыкновенная в силу высокой видовой адаптивности может служить, таким образом, цитогенетическим маркером экстремальности условий среды обитания [9].

Защитные механизмы, имеющиеся в арсенале клеток, позволяют в некоторых случаях противостоять негативным факторам среды, непосредственно воздействующим на геном, в частности, наличие различных систем репарации ДНК [10]. Большим числом работ с применением радиобиологических исследований показано, что создание условий для возможности восстановления поврежденной структуры ДНК после воздействия гамма- или рентгеновского излучения, приводит к значительному увеличению доли выживших клеток. Это явление, обусловленное созданием условий для активизации ферментативных систем репарации и увеличением времени восстановления структур ДНК до начала синтеза и вступления клеток в митоз, было названо восстановлением потенциально летальных повреждений. В зависимости от условий скорость восстановления определяется характеристическим промежутком времени — от 1 до 10 ч [2].

В отличие от морфологических аномалий, ростовых показателей и уровня выживаемости сохранившиеся генетические мутации носят зачастую скрытый характер, проявляют себя не в первом поколении и накапливаются со временем.

Степень гетерозиготности, как известно, является хорошей предпосылкой генетической изменчивости и, в свою очередь, обуславливает потенциал адаптации. Адаптивные же качества популяции и вида определяют его сохранность, иными словами, эволюционную успешность.

Исследования с направленным искусственным гамма-облучением семян сосны позволили установить, что частота аномалий морфогенеза сильнее развита у сеянцев в первые несколько лет, нежели у взрослых плодоносящих деревьев. Дополнительное острое гамма-облучение семян сосны обыкновенной выявило возрастание радиостойкости растений из хронически облучаемых популяций на 20 % по сравнению с контролем. Аномалии строения взрослых деревьев связаны с пороговой дозой 7 Гр/год [11].

Цель работы

Цель работы — оценка вклада радиационной нагрузки как фактора внешней среды в изменение генетической структуры субпопуляций сосны и дуба.

Объекты и методы

Работы по радиологическому исследованию земель лесного фонда выполняли специалисты филиала ФБУ «Рослесозащита» — «Центр защиты леса Воронежской области», имеющие соответствующее профильное образование и опыт работ.

Для изучения были заложены стационарные участки. Размер стационарных участков, заложенных в типичных для лесничества лесорастительных условиях, составил 50×50 м. На стационарных участках осуществляли отбор проб древесины без коры, древесины с корой и коры без древесины для последующих измерений. Кроме того, на стационарных участках закрепляли пять постоянных точек и выполняли дозиметрию. При дозиметрии на постоянных точках проводили замеры мощности дозы гамма-излучения.

Для определения средней фактической плотности загрязнения были проведены измерения удельной активности цезия-137 в пробах почвы из стационарных участков.

Подготовку счетных образцов проводили в лаборатории радиационного контроля в соответствии с принятыми методиками, утвержденными и введенными в действие приказом Рослесхоза от 05.09.1994 г. № 192.

В зоне наибольшего радиоактивного загрязнения проводили отбор образцов древесины основных лесообразующих пород (дуба черешчатого и сосны обыкновенной) с целью исследования биологической устойчивости генетического аппарата к постоянно повышенному радиационному фону.

Данный вид исследования включает в себя:

- отбор образцов вегетативных частей растений (листья, хвоя, древесины);
- выделение ДНК;
- постановку полимеразной цепной реакции (ПЦР);
- проведение электрофореза;
- визуализацию результатов;
- анализ полученных данных.

Для оценки состояния лесных генетических ресурсов специалисты центра защиты леса Воронежской обл. провели молекулярно-генетический анализ 24 образцов растительного материала сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* — 10 шт.) и дуба черешчатого (*Quercus robur* — 14 шт.), собранных с загрязненных территорий Белгородской обл. — Алексеевского и Красненского лесничеств. Для оценки степени устойчивости и дефицита гетерозигот результаты ДНК-анализа сравнили с генетическими показателями нормальных (контрольных) насаждений из Белгородской обл. Шебекинского лесничества (в том же количестве по породам).

Исследование степени гетерозиготности выборок сосны обыкновенной и дуба черешчатого проводили с использованием метода SSR-анализа [12], показавшего свою эффективность при изучении генотипа на популяционном уровне [13–16]. Выделение ДНК проведено СТАВ-методом [17]. Концентрацию ДНК после выделения измеряли с помощью спектрофотометра

NanoPhotometer® P-Class P 330. ПЦР проводили на амплификаторе T100 Thermal Cycler фирмы Bio-Rad. В работе использовали пять SSR-праймеров для сосны обыкновенной: lw_isotig21953, Psy142, Psy144, psy 117, lw_isotig04306, и восемь SSR-праймеров для дуба черешчатого: QrZAG112, QrZAG7, QrZAG87, QrZAG96, QrZAG39, QrZAG11, QrZAG20, QrZAG110. Продукты амплификации разделяли в 6 % ПААГ (трис-ЭДТА-ацетатная буферная система) вертикальной электрофоретической камере VE-20 фирмы Helicon. Гели окрашивали в растворе бромистого этидия, далее визуализировали результаты с помощью системы гель документации. В качестве стандартного маркера длины использовали ДНК плазмиды pBR322 *E. coli*, обработанную эндонуклеазой рестрикции *HpaII*. Молекулярный вес ампликонов определяли с помощью программного обеспечения Photo-Capt.

Каждый SSR-фрагмент рассматривали как генетический локус. Генетические параметры образцов оценивали на основании полиморфизма между микросателлитными локусами. В каждом локусе определяли количество четких ярких воспроизводимых полос, которые принимали за доминантные аллели, а отсутствие полос — за рецессивные. Биологическая устойчивость геномов двух видов была опосредованно определена на молекулярном уровне через процент гетерозиготности выборок по сравнению с радиационно «чистыми» насаждениями.

Результаты и обсуждение

У исследованных образцов сосны обыкновенной всего выявлено 17 аллельных вариантов, у дуба черешчатого — 26. Уровень полиморфизма обеих пород составляет 100 %. Основная зона фрагментов для сосны обыкновенной распределялась в диапазоне 153...262 п. н., для дуба черешчатого — 84...296 п. н. Каждый из образцов имел индивидуальный спектр амплифицируемых фрагментов, отличающийся от других образцов количеством, размером и степенью выраженности. Число локусов сосны обыкновенной, полученных при амплификации ДНК исследованных образцов с загрязненной территории с каждым из праймеров, изменялось от 1 до 7, у дуба черешчатого — от 2 до 6. Число локусов в нормальных (контрольных) насаждениях дуба черешчатого варьировали в диапазоне 4–8 для дуба черешчатого и 3–9 для сосны обыкновенной. Среднее их число на праймер составило 4. Для сосны обыкновенной максимальное количество полиморфных фрагментов получено в результате амплификации с праймером lw_isotig21953 и составило 7 шт., минимальное с праймерами psy 144 и psy 142 — 1 шт. Максимальное количество полиморфных фраг-

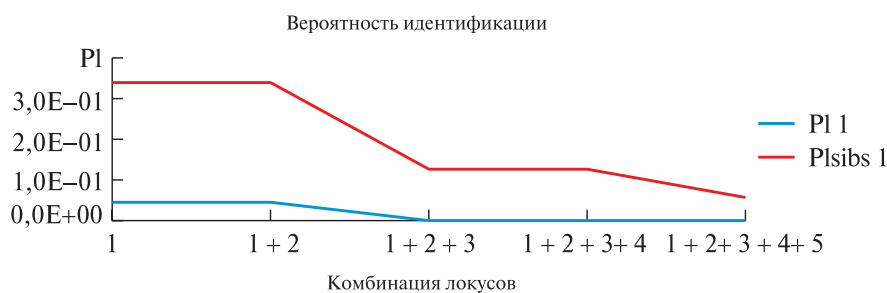


Рис. 1. Вероятности совпадений двух особей из исследуемых образцов сосны обыкновенной Областного казенного учреждения «Красненское лесничество»

Fig. 1. Match probabilities of two individuals from the studied samples of Scots pine of the Regional State Institution «Krasnenskoye Forestry»

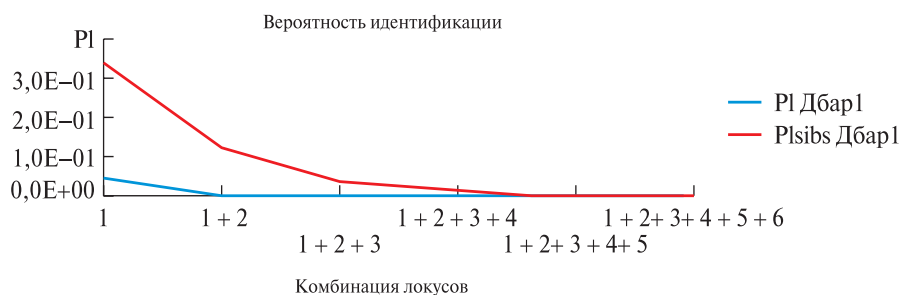


Рис. 2. Вероятности совпадений двух особей из исследуемых образцов дуба черешчатого Областного казенного учреждения «Алексеевское лесничество»

Fig. 2. Match probabilities of two individuals from the studied samples of Common oak of the Regional state institution «Alekseevskoye forestry»

ментов для дуба черешчатого из зоны радиационного обсеждения получено в результате асплификации с праймером QrZAG39 — 7 шт., минимальное с праймером QrZAG96 — 2 шт. Однако следует помнить, что при генетической паспортизации могут не учитываться уникальные аллели. У образцов из нормальных насаждений количество аллелей больше, для локуса QrZAG5b выявлено 8 аллелей, менее полиморфными оказались локусы QrZAG96, QrZAG110 (4 аллеля).

Полученные значения F -статистик Райта показывают, что каждое отдельное дерево в нормальных насаждениях в среднем обнаруживает 15%-й дефицит гетерозигот относительно популяции и около 27 % составляет дефицит гетерозиготных генотипов относительно вида *Quercus robur*. Для образцов из зон с радиационным загрязнением 0...0,99 Ки/км² дефицит гетерозигот выше на 7 %, а зон загрязнения 1...4,99 Ки/км² — на 12 % относительно нормальных насаждений, что является указанием на снижение их устойчивости к неблагоприятным факторам окружающей среды.

По мнению некоторых авторов, радиоактивное загрязнение произошедшее в результате аварии на Чернобыльской атомной электростанции в 1986 г. не могло не отразиться на генетической структуре субпопуляций сосны и дуба, что следует учитывать в мониторинге лесные экосистем [4, 6, 9, 11, 12, 18].

Увеличенная доля гомозигот обусловлена превышением естественной скорости накопления генетических изменений в субпопуляциях, что указывает на искусственные причины, наиболее вероятной из которых в данном случае является постоянно повышенный радиационный фон.

В рамках исследований была проведена оценка вероятности совпадения каждого генотипа (происхождения). При установлении различий в локусах достаточно обнаружить несовпадение в одном исследованном аллеле исследуемых частей ДНК для исключения второй степени родства (сиссов) геномов растений. Эта проверка целесообразна по причине вероятности ложного генотипирования отдельных локусов. Вероятность совпадения рассчитывалась на основе данных о выявленных частотах встречаемости аллелей в исследуемых образцах. Все исследованные особи не имеют сходных аллелей в исследуемых локусах (рис. 1, 2).

Выводы

Молекулярно-генетический анализ 10 образцов сосны обыкновенной и 14 образцов дуба черешчатого показал, что полиморфизм SSR-маркеров у исследуемых образцов составил 100 %. Используемые в исследовании маркеры позволяют проводить мониторинг состояния популяций видов родов *Pinus* и *Quercus*. Полученные

значения F -статистик Райта выявили высокий дефицит гетерозиготных генотипов в насаждениях с радиационно-загрязненных территорий. Это состояние может найти отражение в снижении продуктивности насаждений рассмотренных лесообразующих видов.

Список литературы

- [1] Плющиков В.Г., Семенов О.Г. Физические и биологические основы действия ионизирующих излучений. М.: РУДН, 2006. 64 с.
- [2] Шафиркин А.В., Бенгин В.В. Особенности действия космической радиации на биологические объекты и радиационный риск длительных космических полетов. URL: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/cosmrad/cosmrad1.htm> (дата обращения 30.10.2021).
- [3] Карова И.А., Шаваев М.А. Концентрация радионуклидов в почве и степень накопления их в почве // Агробиологический вестник, 2006, № 6. С. 29–30.
- [4] Яблоков А.В., Нестеренко В.Б., Нестеренко А.В. Чернобыль: последствия катастрофы для человека и природы. СПб.: Наука, 2007. 376 с.
- [5] Радиация: эффекты и источники. Программа ООН по окружающей среде, 2016. [электронная версия] URL: wedocees.unep.org (дата обращения 30.10.2021).
- [6] Щетинкин С.В., Щетинкина Н.А. Некоторые аспекты влияния радиоактивного загрязнения на генеративную сферу сосны обыкновенной // Лесотехнический журнал, 2013. № 2. С. 168–172.
- [7] Осипов А.Н. Как радиация повреждает ДНК? URL: <https://postnauka.ru/wtf/155857> (дата обращения 22.10.2021).
- [8] Залетаев Д.В. Мастер-класс. Онкогеномика. Генетические маркеры. Аллельные делеции или потеря гетерозиготности. URL: http://www.oncology.ru/specialist/oncogenomicesij/genetic_markers/deletions/ (дата обращения 30.10.2021).
- [9] Муратова Е.Н., Седельникова Т.С. Геномные и хромосомные мутации у сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в экстремальных условиях произрастания // Хвойные бореальные зоны, 2004. Т. 22. № 1–2. С. 143–148.
- [10] Vilenchik M.M., Knudson A.G. Inverse radiation dose-rate effects on somatic and germ-line mutations and DNA damage rates (англ.) // Proceedings of the National Academy of Sciences, 2000, v. 97, no. 10, pp. 5381–5386.
- [11] Игонина Е.В. Изучение мутационного процесса в хронически облучаемых популяциях *Pinus sylvestris* L. (Сосна обыкновенная), произрастающих в зоне аварии на Чернобыльской атомной электростанции: автореф. дис.... канд. биол. наук. М., 2010. 110 с.
- [12] Lepais O., Leger V., Gerber S. Short Note: High Throughput Microsatellite Genotyping in Oak Species // *Silvae Genetica*, 2006, v. 55, no. 4–5, pp. 238–240.
- [13] Боронникова С.В. Молекулярно-генетический анализ и оценка состояния генофондов ресурсных видов растений Пермского края. Пермь: Изд-во Пермского ГНИУ, 2013. 223 с.
- [14] Боронникова С.В. Молекулярное маркирование и генетическая паспортизация ресурсных и редких видов растений с целью оптимизации сохранения их генофондов // Аграрный вестник Урала, 2009. № 2 (56). С. 57–59.
- [15] Боронникова С.В. Популяционно-генетический мониторинг генофондов редких ресурсных видов растений Пермского края // Флора Урала в пределах бывшей Пермской губернии и ее охрана: Материалы межрегион. конф., посвященной 140-летию со дня рождения П.В. Сюзева / под ред. Е.И. Демьяновой, С.А. Овеснова, Л.Г. Переведенцевой. Пермь: Изд-во Пермского ГНИУ, 2007. С. 37–43.
- [16] Svetlakov T.N., Boronnikova S.V., Yanbaev Y.A. Genetic diversity and differentiation in Ural populations of the aspen, *Populus tremula* L., as revealed by inter-simple sequence repeat (ISSR) markers // *Silvae Genetica*, 2014, no. 1, pp. 39–41.
- [17] Программа и методика по пункту 59. План мероприятий (дорожной карты) «Развитие биотехнологии и генной инженерии». Пушкино: Изд-во ФБУ «Рослесозащита», 2014. 205 с.
- [18] Щетинкин С.В., Щетинкина Н.А. Особенности динамики радиального прироста дуба черешчатого в условиях радиоактивного загрязнения лесов Центральной лесостепи // Лесотехнический журнал, 2014. Т. 4. № 3 (15). С. 130–139.

Сведения об авторах

Сиволапов Владимир Алексеевич — канд. с.-х. наук, директор филиала ФБУ «Рослесозащита» — «ЦЗЛ Воронежской области», sivalapovva@rcfh.ru

Логина Людмила Александровна — канд. биол. наук, зам. директора филиала ФБУ «Рослесозащита» — «ЦЗЛ Воронежской области», loginova@rcfh.ru

Воробьева Елена Анатольевна — нач. отдела мониторинга состояния лесных генетических ресурсов филиала ФБУ «Рослесозащита» — «ЦЗЛ Воронежской области», vorobyeva@rcfh.ru

Вепринцев Владислав Николаевич — зам. начальника отдела мониторинга состояния лесных генетических ресурсов филиала ФБУ «Рослесозащита» — «ЦЗЛ Воронежской области», veprintsevvn@rcfh.ru

Щетинкин Сергей Васильевич — канд. биол. наук, нач. отдела радиологии филиала ФБУ «Рослесозащита» — «ЦЗЛ Воронежской области», chetinkinsv@rcfh.ru

Поступила в редакцию 17.01.2022.

Одобрено после рецензирования 22.03.2022.

Принята к публикации 13.05.2022.

COMMON OAK AND SCOTS PINE SUBPOPULATIONS GENETIC CHANGES UNDER PROLONGED EXPOSURE TO LOW DOSES OF RADIATION

V.A. Sivolapov, L.A. Loginova, E.A. Vorob'eva, V.N. Veprintsev✉, S.V. Shchetinkin

FBU «Roslesozaschita» — «CFP of Voronezh region», 105, Lomonosov st., 394000, Voronezh, Russia

veprintsevvn@rcfh.ru

The probability of population significant changes as a result of prolonged exposure to increased radiation in the habitat of the main forest-forming species is considered. The amount of contamination at stationary sites is correlated with the level of heterozygosity of pine and oak samples.

Keywords: radioactive contamination, pine, oak, radiation exposure, PCR, DNA, heterozygosity

Suggested citation: Sivolapov V.A., Loginova L.A., Vorobyova E.A., Veprintsev V.N., Shchetinkin S.V. *Otsenka izmeneniy geneticheskoy struktury subpopulyatsiy duba chereschatogo i sosny obyknovnoy v usloviyakh dlitel'nogo vozdeystviya malyykh doz radiatsii* [Common oak and scots pine subpopulations genetic changes under prolonged exposure to low doses of radiation]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 3, pp. 14–20. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-14-20

References

- [1] Plyushchikov V.G., Semenov O.G. *Fizicheskie i biologicheskie osnovy deystviya ioniziruyushchikh izlucheniy* [Physical and biological bases of the action of ionizing radiation]. Moscow: RUDN, 2006, 64 p.
- [2] Shafirkin A.V., Bengin V.V. *Osobennosti deystviya kosmicheskoy radiatsii na biologicheskie ob'ekty i radiatsionnyy risk dlitel'nykh kosmicheskikh poletov* [Features of the effect of cosmic radiation on biological objects and the radiation risk of long-term space flights]. Available at: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/cosmrad/cosmrad1.htm> (accessed 30.10.2021).
- [3] Karova I.A., Shavaev M.A. *Kontsentratsiya radionuklidov v pochve i stepen' nakopleniya ikh v pochve* [The concentration of radionuclides in the soil and the degree of their accumulation in the soil]. *Agrokhimicheskii vestnik [Agrochemical Bulletin]*, 2006, no. 6, pp. 29–30.
- [4] Yablokov A.V., Nesterenko V.B., Nesterenko A.V. *Chernobyl': posledstviya katastrofy dlya cheloveka i prirody* [Chernobyl: consequences of the catastrophe for man and nature]. St. Petersburg: Nauka. Leningradskoe otdelenie, 2007, 376 p.
- [5] *Radiatsiya: efekty i istochniki / Nauchnyy komitet OON po deystviyu atomnoy radiatsii (NKDAR)* [Radiation: Effects and Sources / UN Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (NCDAR)]. 2016. Available at: wedoцезий.unep.org
- [6] Shchetinkin S.V., Shchetinkina N.A. *Nekotorye aspekty vliyaniya radioaktivnogo zagryazneniya na generativnyuyu sferu sosny obyknovnoy* [Some aspects of the influence of radioactive contamination on the generative sphere of scots pine]. *Lesotekhnicheskii zhurnal [Forestry Journal]*, 2013, no. 2, pp. 168–172.
- [7] Osipov A.N. *Kak radiatsiya povrezhdaet DNK?* [How does radiation damage DNA?]. Available at: <https://postnauka.ru/wtf/155857> (accessed 22.10.2021).
- [8] Zaletaev D.V. *Master-klass. Onkogenomika. Geneticheskie markery. Allel'nye deletsii ili poterya geterozigotnosti* [Master class. Oncogenomika. Genetic markers. Allelic deletions or loss of heterozygosity]. Available at: http://www.oncology.ru/specialist/oncogenomiceзий/genetic_markers/deletions/ (accessed 30.10.2021).
- [9] Muratova E.N., Sedel'nikova T.S. *Genomnye i khromosomnye mutatsii u sosny obyknovnoy (Pinus sylvestris L.) v ekstremal'nykh usloviyakh proizrastaniya* [Genomic and chromosomal mutations in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) under extreme growing conditions]. *Khvoynye boreal'nye zony [Coniferous boreal zones]*, 2004, t. 22, no. 1–2, pp. 143–148.
- [10] Vilenchik M.M., Knudson A.G. *Inverse radiation dose-rate effects on somatic and germ-line mutations and DNA damage rates (angl.)*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2000, v. 97, no. 10, pp. 5381–5386.
- [11] Igonina E.V. *Izuchenie mutatsionnogo protsessa v khronicheski obluchaemykh populyatsiyakh Pinus sylvestris L. (Sosna obyknovennaya), proizrastayushchikh v zone avarii na chernobyl'skoy atomnoy elektrostantsii* [Study of mutation process in chronically irradiated populations of *Pinus sylvestris* L. (Common pine) growing in the Chernobyl nuclear power plant accident zone]. *Dis. Cand. Sci. (Biol.)*. Moscow, 2010, 110 p.
- [12] Lepais O., Leger V., Gerber S. *Short Note: High Throughput Microsatellite Genotyping in Oak Species*. *Silvae Genetica*, 2006, v. 55, no. 4–5, pp. 238–240.
- [13] Boronnikova S.V. *Molekulyarno-geneticheskii analiz i otsenka sostoyaniya genofondov resursnykh vidov rasteniy Permskogo kraya* [Molecular genetic analysis and assessment of gene pools of resource species of plants in Perm Krai]. Perm': Perm State University, 2013, 223 p.
- [14] Boronnikova S.V. *Molekulyarnoe markirovanie i geneticheskaya pasportizatsiya resursnykh i redkikh vidov rasteniy s tsel'yu optimizatsii sokhraneniya ikh genofondov* [Molecular labeling and genetic certification of resource and rare plant species in order to optimize the conservation of their gene pools]. *Agrarnyy vestnik Urala [Agrarian Bulletin of the Urals]*, 2009, no. 2 (56), pp. 57–59.
- [15] Boronnikova S.V. *Populyatsionno-geneticheskii monitoring genofondov redkikh resursnykh vidov rasteniy Permskogo kraya* [Population-genetic monitoring of gene pools of rare resource plant species of Perm Krai]. *Flora Urala v predelakh byvshey Permskoy gubernii i ee okhrana: materialy mezhhregional'noy konferentsii, posvyashchennoy 140-letiyu so dnya rozhdeniya P.V. Syuzeva* [Flora of the Urals within the former Perm province and its protection: materials of the interregional conference dedicated to the 140th anniversary of the birth of P.V. Syuzeva]. Ed. E.I. Demyanova, S.A. Ovesnov, L.G. Perevedentseva. Perm', 2007 pp. 37–43.

- [16] Svetlakova T.N., Boronnikova S.V., Yanbaev Y.A. *Genetic diversity and differentiation in Ural populations of the aspen, Populus tremula L., as revealed by inter-simple sequence repeat (ISCTPONЦИЙ) markers* [Genetic diversity and differentiation in Ural populations of the aspen, Populus tremula L., as revealed by inter-simple sequence repeat (ISCTPONЦИЙ) markers]. *Silvae Genetica*, 2014, no. 1, pp. 39–41.
- [17] *Programma i metodika po punktu 59. Plan meropriyatiy (dorozhnoy karty) «Razvitie biotekhnologii i gennoy inzhenerii»* [Program and methodology under item 59. The Action plan (roadmap) «Development of biotechnology and genetic engineering»]. Pushkino: Roslesozashchita, 2014, 205 p.
- [18] Shchetinkin S.V., Shchetinkina N.A. *Osobennosti dinamiki radial'nogo prirosta duba chereschatogo v usloviyakh radioaktivnogo zagryazneniya lesov Tsentral'noy lesostepi* [Features of the dynamic of radial growth of the pedunculate oak in the conditions of radioactive contamination of forests of the Central forest-steppe]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Journal], 2014, t. 4, no. 3 (15), pp. 130–139.

Authors' information

Sivolapov Vladimir Alekseevich — Cand. Sci. (Agriculture), Director of the Branch of the FBU «Roslesozashchita» — «CPF of the Voronezh region», sivalapovva@rcfh.ru

Loginova Liudmila Aleksandrovna — Cand. Sci. (Biology), Deputy Head of the Director of the Branch of the FBU «Roslesozashchita» — «CPF of the Voronezh region», loginovala@rcfh.ru

Vorob'eva Elena Anatol'evna — Head of the Department of Monitoring the state of forest genetic resources of the Branch of FBU «Roslesozashchita» — «CPF of the Voronezh region», vorobyevaea@rcfh.ru

Veprintsev Vladislav Nikolaevich — Deputy Head of the Department of Monitoring the state of forest genetic resources of the Branch of the FBU «Roslesozashchita» — «CPF of the Voronezh region», veprintsevvn@rcfh.ru

Shchetinkin Sergei Vasilevich — Cand. Sci. (Biology), Head of the Radiology Department of the Branch of the FBU «Roslesozashchita» — «CPF of the Voronezh region», chetinkinsv@rcfh.ru

Received 17.01.2022.

Approved after review 22.03.2022.

Accepted for publication 13.05.2022.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article
The authors declare that there is no conflict of interest