

## БИОТЕСТИРОВАНИЕ РАДОНА, ВЫДЕЛЯЕМОГО ИЗ ПОЧВОГРУНТА ЦИТОЛОГИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

А. И. Федорова, В. Н. Калаев, Ю. Н. Пойманова, А. Б. Коротков

*Воронежский государственный университет*

В статье представлены результаты биотестирования радона, выделяемого из почвогрунта на территории санатория «Радон» и прилегающей зоны над тектоническим разломом, расположенным в Лискинском районе Воронежской области с использованием ядрышковых характеристик клеток корней зебрины повислой (*Zebrina pendula Schniz.*). Установлены ореолы максимального и минимального выделения радона.

Радон – природный газ, в 7,5 раз тяжелее воздуха, продукт распада урана и радия, относится к инертным газам, содержится в земной коре, количество его определяется мощностью залежей урана, их близостью к земной поверхности, характером грунтов. Известно три изотопа естественного радона: радон-222 (с периодом полураспада  $T_{1/2}=3,8$  сут.), торон – радон-220 ( $T_{1/2}=55$  сек) и актинон – радон-219 ( $T_{1/2}=19$  сек). Все изотопы радона распадаются, испуская преимущественно альфа-частицы, и превращаются в изотопы полония, висмута, свинца [10, 15]. Конечным продуктом распада радона являются стабильные изотопы свинца. Поэтому в радиоопасных районах следует ожидать «освинцовывания» верхних горизонтов почв, особенно глинистых, которые обладают наиболее высокой адсорбирующей способностью.

Радон распространяется в почвогрунте по законам диффузии. Его выделение (эмансация) зависит от величины порового пространства, проницаемости и трещиноватости почвогрунта. Выделение радона повышается летом с увеличением температуры воздуха, при ветре, в годы с повышенной солнечной активностью [15, 16]. Радон обычно скапливается в подвальных помещениях домов, выделяется из некоторых строительных материалов (кирпич из красной глины – отходов алюминиевого производства), доменного шлака (отходы металлургической промышленности), зольной пыли (отходы, образующиеся в результате сжигания угля). Радон хорошо растворим в воде, но радионевые воды опасны для употребления. В природных условиях радон может накапливаться в кристаллической решетке некоторых минералов,

в пустотах и поровых пространствах, откуда диффундирует в окружающую среду.

Первичные радиационно-химические изменения биомолекул под влиянием радионовой радиации, как и под влиянием любого другого вида ионизирующей радиации, могут быть связаны с двумя механизмами: 1) прямое действие, когда биологически важная макромолекула (ДНК, РНК, белок и др.) испытывает изменения непосредственно при взаимодействии с излучением; 2) косвенное действие – изменяемая молекула непосредственно не поглощает энергию падающего излучения, а получает ее путем передачи от другой молекулы.

Радон широко используется для лечения различных заболеваний (радонотерапия). Так, например, радионевые ванны благотворно влияют на опорно-двигательный аппарат, нормализуют артериальное давление, улучшают обмен веществ, функцию почек и печени, успокаивают нервную систему; радионевые воды применяют для орошения внутренних структур (лечение заболеваний верхних дыхательных путей, бесплодия др.).

Однако, несмотря на применение радона в терапевтических целях, по данным разных авторов, он ответственен за 6-20% случаев рака легких [20, 22, 24]. Известны работы о мутагенных эффектах радона [21]. Согласно исследованиям Н.П. Дубинина, радон дает дозу на гонады в год 0,002 рад [3]. Проведенный в Швеции анализ выявил слабую корреляцию между уровнем радона в жилых помещениях и встречаемостью случаев заболевания раком легких у молодежи [23]. В литературе приводятся многочисленные факты возможного неблагоприятного воздействия радона на другие, кроме органов дыхания, системы человеческого

© Федорова А.И., Калаев В.Н., Пойманова Ю.Н., Коротков А.Б., 2007

организма [11, 21]. С влиянием радона связывают заболевания системы крови, в частности, развитие лейкоза – рака крови, некоторых нарушений генетического аппарата. В настоящее время трудно дать однозначную оценку этим фактам, но, по нашему мнению, они нуждаются в детальной проверке. Однако любые другие канцерогенные эффекты радона по крайней мере на порядок менее вероятны, чем рак легких [19].

Вклад радона в суммарную эффективную эквивалентную дозу облучения для населения России ( $4\text{-}5 \text{ м}^3/\text{год}$ ) составляет 40–50% [7]. Кроме того, эффективная эквивалентная доза, созданная им, значительно варьирует для жителей различных регионов. За счет этого значение средней дозы лежит в диапазоне от 2,6 до 20  $\text{м}^3/\text{год}$ , т.е. может превышать предел дозы профессионального облучения, установленный НРБ-96. Вклад радона в суммарную дозу облучения для жителей регионов России составляет от 40 до 92%. Облучение отдельных групп населения может превышать среднее для региона значение в 10 и более раз. Таким образом, радон вносит не только наибольший вклад в радиоактивное облучение населения России в целом (примерно в 100 раз превышающий облучение, обусловленное аварией на Чернобыльской АЭС), но в ряде регионов ответственен за формирование повышенного радиационного фона [7].

Приведенные выше факты свидетельствуют о том, что проблемы учета вклада радона в формирование радиационного фона и разработка мер защиты от его избыточного воздействия являются одними из главных в обеспечении радиационной безопасности населения. В связи с этим определенную теоретическую и практическую значимость представляют исследования по определению выделения радона в радиоопасных районах, которыми часто являются зоны тектонических разломов. Это позволит оценить возможные риски проживания на указанных территориях для человека.

Нами была предпринята попытка провести биотестирование выделения радона из почвогрунта цитологическим методом в районе тектонического разлома вблизи озера Богатое Лискинского района Воронежской области. Ранее нами было проведено биотестирование радона в рабочих помещениях санатория «Радон», а также в жилых зданиях, расположенных вблизи зоны тектонического разлома [5]. Подобная работа была осуществлена также в частных домах, расположенных вбли-

зи минерального источника «Белая горка» Богучарского района Воронежской области [17].

### **Район проведения исследования**

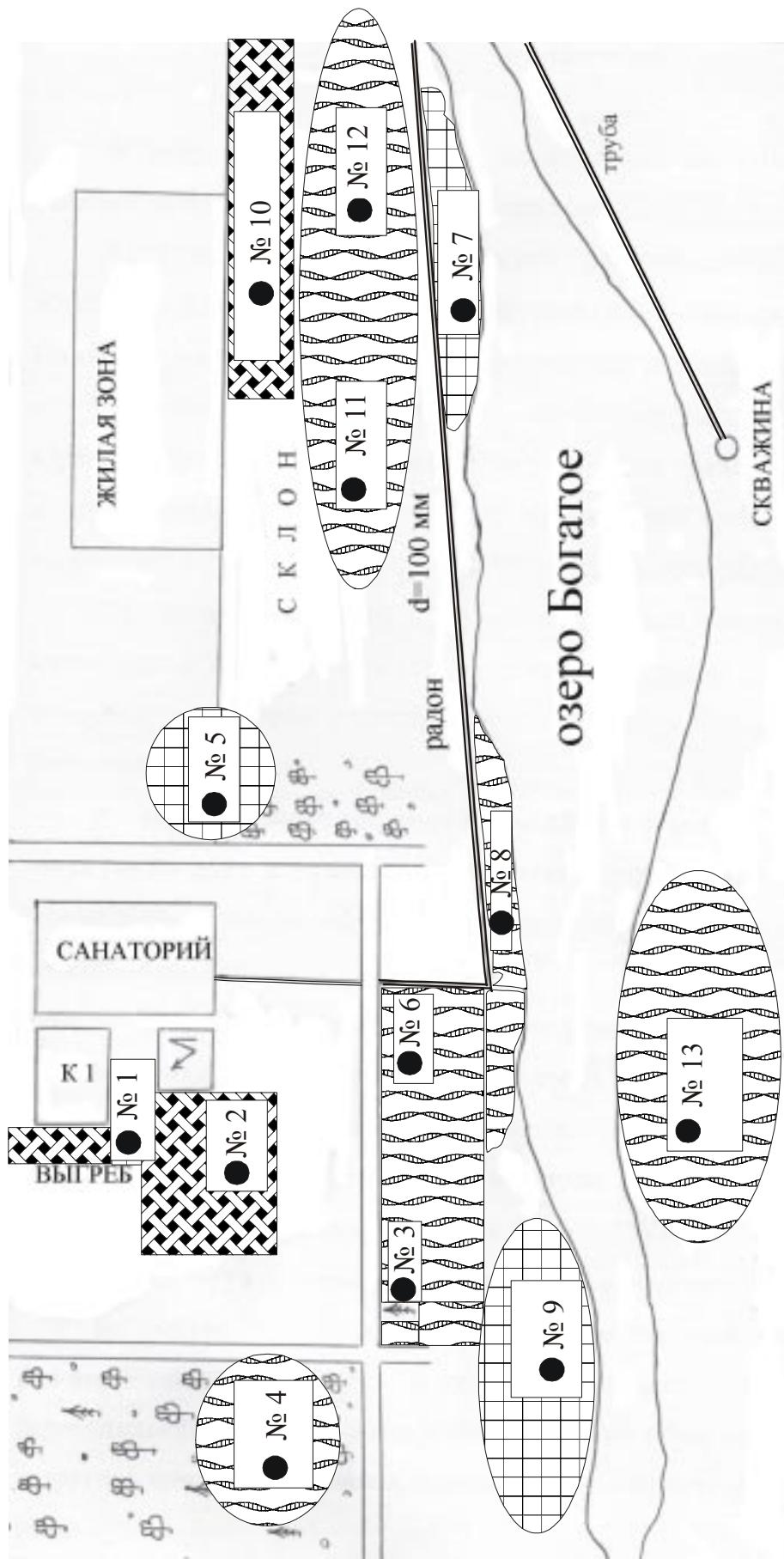
Радон и радионовые воды были обнаружены в южной части г. Лиски Воронежской области на левом берегу р. Дон в ходе геологоразведочных работ по изысканию уранового сырья. Специальное изучение подземных вод, произведенное геологоразведкой г. Воронежа в 1970 г., позволило обнаружить в чернокварцевых гранитах архея и протерозоя две обводненные зоны трещиноватости, приуроченные к Богатовскому тектоническому глубинному разлому субширотного простирания [12, 13]. Верхняя зона залегала на глубине 75–120 м и нижняя – 230–280 м. Воды оказались напорными, величина напора достигает 75–200 м, что очень удобно для эксплуатации. По величине концентрации радона ( $\text{Бк}/\text{дм}^3$ ) выделяют следующие разновидности вод [13]: очень слаборадоновые (185–740); слаборадоновые (740–1480); среднерадоновые (1480–7400); высокорадоновые ( $>7400$ ).

Верхний уровень концентрации радона в водах Лискинского месторождения составляет 5503,35  $\text{Бк}/\text{дм}^3$ , они характеризуются как среднерадоновые и при использовании в лечебных целях не разбавляются.

Помимо радона, в водах верхней и нижней зоны отмечается присутствие микроэлементов: брома, бора, стронция, меди, в незначительных количествах содержатся свинец, цинк, молибден. Из радиоактивных элементов обнаруживаются уран и радий. На базе этого месторождения в 1984 г. был открыт круглогодичный санаторий «Радон». Он расположен на берегу озера Богатое. По уступу нижних надпойменных террас созданы искусственные посадки в основном из сосны обыкновенной, меньше – из вяза и бересклета. Берега озера окружены кустарниковыми зарослями из различных видов ив. Встречается ольха черная.

Радоновые воды поступают из скважины, расположенной на противоположной от санатория (южной) стороне озера Богатое, и нагнетательным методом подаются в процедурные кабинеты по трубопроводу диаметром 100 мм. Несмотря на соблюдение правил эксплуатации вод, возможна утечка радона из технических сооружений. К тому же не исключено выделение радона по геологическим пустотам, скважинам почвы, пустотам от отмерших корней деревьев и трав.

Исследование выделений радона из почвогрунта проводилось в течение двух лет в местах



Обозначения:

№1 – опытная точка у здания, где вытапают лечебную грязь; №2 – опытная точка вблизи подстанции; №3 – опытная точка, расположенная вблизи отдельно стоящего дерева сосны; №4 – опытная точка, расположенная вблизи отдельно стоящего дерева березы; №5 – опытная точка, расположенная около тропинки вблизи лесонасаждений; №6 – опытная точка, расположенная в низине, в месте прохождения трубопровода с радоновой водой; №7 – опытная точка, расположенная с северной стороны озера «Богатое»; №8 – опытная точка, расположенная на берегу озера «Богатое» (в 500 м от точки №8); №9 – опытная точка, расположенная на возвышенности; №11, №12 – опытные точки, расположенные по склону жилой зоны; №13 – опытная точка, расположенная на южном берегу озера «Богатое».

Рис. 1. Карта-схема загрязненности исследованной территории

предполагаемого выхода этого радиоактивного газа на земную поверхность: в июле 2004 г. – на территории санатория «Радон» (точки №№ 1-6) и в июле 2005 г. – в жилой зоне, примыкающей к санаторию, на уступах речных террас, где в почвогрунте проходит трубопровод с радоновой водой, а также на северном и южном берегах озера Богатое в зонах тектонического разлома и водозабора (точки №№ 7-13). Схема расположения опытных территорий представлена на рис. 1.

### **Материалы и методы исследования**

Биотестирование выделения радона проводилось по запатентованной нами ранее методике [9]. Были исследованы ядрышковые характеристики клеток апикальной меристемы корней комнатного растения – традесканции зебровидной, или зебрины повислой (*Zebrina pendula* Schnizl.).

В экспериментах использовали вегетативное потомство (клон) одного растения, 4-5 черенков которого длиной 10-12 см погружали в банки объемом 0,75 л. Дистиллиированную воду в банке отделяли от окружающего воздуха двумя плотно подогнанными слоями полиэтиленовой пленки, что исключало подсос воздуха через отверстия. Сосуды с отростками вкалывали в опытных точках в почвогрунт так, чтобы их верхний край не выступал над поверхностью земли. На высоте 0,5 м над опытными образцами делали навес из полиэтиленовой пленки для защиты от дождя. Банки ставили на рассеянный свет (в тень деревьев, кустарников или высокой травы) во избежание солнечных ожогов у тест-растений. Время экспозиции составляло 14 суток, после чего в 15 часов по летнему времени проводили фиксацию появившихся придаточных корней длиной 3-4 см в ацетоалкоголе (3 части 96%-ного этилового спирта и 1 часть ледяной уксусной кислоты), в нем же материал хранили при температуре +4°С. Для фиксации использовали плоскодонные емкости диаметром 1-1,5 см и полезным объемом 7-10 мл. Для получения контрольных результатов параллельно проводили эксперимент в лаборатории, где в контролируемых условиях (активность радона не превышала 24 Бк/м<sup>3</sup>) находились черенки идентичного клона традесканции.

Изготовление микропрепаратов осуществляли по следующей схеме: 1) кончики корешков традесканции помещали в 18%-ную соляную кислоту и подогревали (несколько раз) до температуры 60° С для мацерации тканей; 2) материал ополаскивали 45%-ной уксусной кислотой; 3) корни традесканции заливали красителем ацетогематоксилином на

25 минут при комнатной температуре (для приготовления красителя 4 г гематоксилина и 1 г железо-аммонийных квасцов, тщательно размельченных в ступке, растворяли в 100 мл 45%-ной уксусной кислоты, а раствор закрывали ватным тампоном, чтобы обеспечить доступ кислорода, выдерживали в термостате при температуре +36° С в течение 7-14 суток при обязательном взбалтывании, после фильтрации краситель готов к употреблению); 4) материал отмывали от избытка красителя дистиллированной водой; 5) отрезали кончик корешка и помещали его на предметное стекло в каплю жидкости Гойера. В состав жидкости Гойера входят 50 мл воды, 30 мг гуммиарабика, 16 мл глицерина, 200 г хлоральгидрата. При отсутствии гуммиарабика его можно заменить камедью вишни. Просушенную камедь тщательно растирают в ступке, заливают дистиллированной водой на 30 мин, кипятят на водяной бане 5 мин. После добавления в нее глицерина и хлоральгидрата смесь фильтруют несколько раз через батист, затем ее помещают в темный, плотно закрытый сосуд и хранят в холодильнике. Нанесенный на стекло корешок раздавливают препарovalной иглой и накрывают покровным стеклом. Препарат подогревали (но не сильно!) над пламенем горелки и, постукивая спичкой поверх покровного стекла, добивались равномерного распределения клеток на микропрепарате. Изготовленный постоянный давленый микропрепарат можно хранить в закрытой коробке в течение 2-3 лет.

Просмотр микропрепаратов осуществляли на микроскопе PZO SP14, при общем увеличении 40x2,5x12. Вели подсчет общего количества просмотренных клеток (не менее 200 с каждого микропрепарата), учитывали количество клеток с 1, 2, 3 ... п ядрышками в ядре. На основании полученных данных рассчитывали среднее число ядрышек на клетку (сумма всех обнаруженных на микропрепарате ядрышек к общему числу проанализированных клеток), определяли ядрышковую активность, под которой понимали долю клеток (%) с 1, 2, 3 ... п ядрышками в ядре. Под термином «увеличение ядрышковой активности» подразумевали возрастание доли клеток с большим количеством ядрышек, а под термином «уменьшение ядрышковой активности» – возрастание количества клеток с меньшим числом ядрышек по сравнению с контролем.

Нами были определены типы обнаруженных ядрышек (по классификации Челидзе и Зацепиной [18]), поскольку преобладание ядрышек опреде-

ленного типа может свидетельствовать о степени стрессового воздействия на клетку. По данным ряда авторов [18], при слабом стрессовом воздействии у живых организмов происходит увеличение доли высокоактивных ядрышек и уменьшение доли малоактивных и умеренноактивных ядрышек. При сильном неблагоприятном воздействии в клетках происходит ингибирование синтеза РНК, и в тканях преобладают малоактивные ядрышки.

Изменение ядрышковых характеристик (число ядрышек, их тип) является наиболее чувствительным и информативным критерием цитогенетического метода биоиндикации [2, 14 и др.]

Статистическую обработку результатов проводили с использованием статистического пакета программ «Stadia». Процедура группировки данных и их обработка изложены в работе Кулаичева [8]. Сравнение контрольной и опытной выборок по показателю «ядрышковая активность» проводили по t-критерию Стьюдента. Для выяснения влияния фактора места постановки пробы на ядрышковые характеристики зебрины повислой использовали однофакторный дисперсионный анализ. Кластерный анализ проводили с использованием метрики нормированный Эвклид, стратегия группировки данных – группового соседа.

### **Результаты биотестирования радона, выделяемого из почвогрунта на территории санатория «Радон»**

В результате проведенных исследований было выявлено, что на опытных точках, расположенных

на территории санатория «Радон», происходило изменение ядрышковых характеристик у тест-растения (таблица 1).

Дисперсионный анализ показал достоверное влияние фактора места постановки пробы на частоту встречаемости клеток с разным числом ядрышек. Это свидетельствует о том, что на опытных территориях зебрина повислая подверглась стрессовому воздействию, которое можно связать с выделением из почвы радона. Статистически достоверное влияние фактора места расположения образца на частоту встречаемости клеток с 3-мя ядрышками в ядре (при проведении анализа без учета контрольных данных) указывало на неодинаковую интенсивность выделения радона на обследованных опытных точках и, следовательно, на наличие «чистых» и «грязных» территорий.

В клетках апикальной меристемы корешков зебрины повислой на опытных территориях возрастало среднее число ядрышек по сравнению с контролем (наибольшего значения данный показатель достигал в точках №№ 1, 2, 3, 6), снижалась частота клеток с 1-м ядрышком в ядре (наименьшие значения отмечались на опытных площадях №№ 1, 4, 6) и увеличивалась доля клеток с 2-мя и 3-мя ядрышками в ядре (наибольшие значения этих показателей были выявлены в опытных точках №№ 1, 6 и №№ 1, 3, 4, 5, соответственно). На всех опытных территориях у *Zebrina pendula* выявлялись клетки с 4-мя ядрышками в ядре, на опытных территориях №№ 1-5 – с 5-ю ядрышками в ядре, а в точках №№ 1 и 3 – клетки

*Таблица 1*

Ядрышковые характеристики в клетках апикальной меристемы корней *Zebrina pendula Schnizl.* на опытных территориях, расположенных в районе санатория «Радон», в 2004 году

№ опыт- ной точки	% клеток с n ядрышками в ядре						Среднее число ядрышек на клетку
	n=1	n=2	n=3	n=4	n=5	n=6	
1	47,6±2,8**	37,8±4,9*	12,6±0,4***	1,6±0,4	0,4±0,2	0,1±0,1	1,70±0,04***
2	55,6±6,1*	34,3±4,9*	7,7±1,3**	2,2±0,9	0,2±0,2	–	1,34±0,97
3	55,6±2,7**	28,8±4,2	14,5±2,1**	0,9±0,4	0,2±0,1	0,01±0,01	1,59±0,05**
4	48,7±2,2**	35,0±4,0*	14,7±2,2**	1,4±0,6	0,2±0,2	–	1,60±0,03**
5	53,6±3,2	35,3±4,0*	10,3±1,3***	0,7±0,4	0,01±0,01	–	1,54±0,04*
6	46,4±4,0**	41,0±3,5**	12,3±1,1***	0,4±0,2	–	–	1,74±0,09***
Конт- роль	76,8±4,5	21,3±4,1*	1,9±0,4	–	–	–	1,27±0,04

Обозначения:

\* – различия с контролем достоверны ( $P<0,05$ );

\*\* – различия с контролем достоверны ( $P<0,01$ );

\*\*\* – различия с контролем достоверны ( $P<0,001$ ).

с 6-ю ядрышками в ядре. Это указывает на активацию в клетках растительного тест-объекта латентных ядрышкообразующих районов, что является, по мнению ряда авторов [4, 6], адаптивной реакцией на стрессовые воздействия, которые в нашем случае могут быть обусловлены выделением радона из почвы и облучением тест-растений.

Исследование типов ядрышек также показало изменение соотношения частот их встречаемости на опытных территориях по сравнению с контролем (таблица 2). Дисперсионный анализ подтвердил влияние фактора места положения опытного образца на встречаемость различных типов ядрышек как при обработке данных с учетом контроля, так и без учета контроля. Полученные результаты подтверждают высказанное выше предположение о неоднородности загрязнения радоном исследованной территории и указывают на то, что изменение типа ядрышка – более чувствительный к стрессовому воздействию показатель, чем изменение их числа.

На опытных территориях отмечалось увеличение частоты встречаемости высокоактивных «компактных» ядрышек (максимальных значений этот показатель достигал на опытной территории №2) и снижение частоты встречаемости менее транскрипционноактивных ядрышек «кора-сердцевина» (минимальное число таких ядрышек было выявлено на опытной территории №3). Уменьшение частоты встречаемости ядрышек типа «кора-сердцевина» скорее всего, обусловлено их переходом в «компактную» форму, т.е. имело место явление компенсации меньшего количества транскрипционноактивных ядрышек их качественными изме-

нениями (переход в высокотранскрипционноактивную форму). На опытных территориях происходило также возрастание числа умеренноактивных ядрышек «кора-сердцевина вакуолизированные» и появлялся другой тип умереннотранскрипционноактивных ядрышек – «вакуолизированные», которые не встречаются в контрольных образцах.

Приведенные данные не позволяют по какой-либо одной из изученных ядрышковых характеристик выделить территорию, на которой отмечались бы наиболее значимые цитогенетические эффекты и, соответственно, определить, на какой территории наблюдались наибольшие выделения радона из почвы. Так, если судить по показателю «среднее число ядрышек на клетку», то наибольшие выделения радона отмечались на опытной территории №1, если по количеству клеток с 2-мя ядрышками в ядре, то на опытной территории №6, если по количеству клеток с 3-мя ядрышками в ядре, то на опытных территориях №№3, 4 и т.д.

Для решения возникшей проблемы мы воспользовались методами кластерного анализа, которые позволяют дать оценку загрязнения, учитывая сразу несколько цитогенетических показателей. На наш взгляд, метод оценки загрязнения по нескольким цитогенетическим параметрам имеет преимущества по сравнению с оценкой загрязнения территории по одному показателю, т.к. изменения значений той или иной цитогенетической характеристики ограничены ее чувствительностью как к уровню, так, возможно, и к типу загрязнения. Взаимная компенсация этих показателей, приводящая в общем итоге к нормальному результату (канализованность признака), не позволяет дать

Таблица 2  
Встречаемость различных типов ядрышек в клетках апикальной меристемы корней *Zebrina pendula* Schnizl. на опытных территориях, расположенных в районе санатория «Радон», в 2004 году

№ точки	% ядрышек различного типа			
	кора-сердцевина	кора-сердцевина вакуолизированные	компактные	вакуолизированные
№ 1	51,1±3,4**	43,4±3,3*	4,5±0,6**	1,0±0,3
№ 2	47,8±5,1**	29,2±2,0	15,2±3,0**	7,8±1,6
№ 3	42,6±2,9**	52,6±3,0**	3,2±0,8**	1,6±0,4
№ 4	49,4±2,3**	47,0±1,6**	2,4±1,0*	1,2±0,5
№ 5	51,7±5,7**	45,9±5,5*	1,9±0,4**	0,5±0,2
№ 6	52,1±2,8**	46,0±3,0**	1,4±0,4*	0,6±0,2
Контроль	69,1±3,9	30,7±3,9	0,1±0,1	-

#### Обозначения:

\* – различия с контролем достоверны ( $P<0,05$ );

\*\* – различия с контролем достоверны ( $P<0,01$ );

\*\*\* – различия с контролем достоверны ( $P<0,001$ ).

точную оценку степени загрязнения по единственному цитогенетическому показателю и построить схему, отражающую распределение поллютантов на данной территории. Ранее нами были проведены работы по составлению карт загрязненности по совокупности цитогенетических показателей растительных тест-объектов с использованием кластерного анализа для территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате аварии на Чернобыльской АЭС [1].

Результаты кластерного анализа ядрышковых характеристик растительного тест-объекта на опытных площадях в районе санатория «Радон» представлены на рис. 2. Как видно, наибольшее сходство с контролем (наименьшее кластерное расстояние) выявлено на опытной территории № 5, самые большие различия ядрышковых характеристик (наибольшие кластерные расстояния) наблюдались между опытной территорией № 1 и контролем. На основании результатов кластерного анализа можно сделать заключение, что из шести обследованных точек самой «чистой» являлась точка № 5 (около тропинки вблизи лесонасаждений), самыми «грязными» (значительное выделение радона) – точки № 1 (у здания, где выгружают лечебную грязь), № 2 (вблизи подстанции). Точки № 3 (вблизи отдельно стоящей сосны), № 4 (вблизи отдельно стоящей березы), № 6 (в низине, в месте прохождения трубопровода с радоновой водой) являются по результатам анализа среднезагрязненными.

#### **Результаты биотестирования радона, выделенного из почвогрунта на берегу озера Богатое и в жилой зоне, примыкающей к территории санатория «Радон»**

Результаты исследования ядрышковых характеристик клеток корневой меристемы *Z. pendula* в

2005 году представлены в таблице 3. Дисперсионный анализ позволил выявить влияние местоположения пробы на изучаемые показатели. Обнаружение статистически достоверного эффекта положения как при обработке данных с учетом контроля, так и без него свидетельствует о неоднородности загрязнения обследуемой территории. Сила влияния фактора местоположения пробы на ядрышковые характеристики была больше, чем в 2004 году, что указывало на высокую неоднородность в выделении радона из грунта на опытных точках.

На большинстве опытных территорий происходило возрастание среднего числа ядрышек в клетке по сравнению с контрольными данными (максимального значения указанный показатель достигал в точке № 13), снижалась частота встречаемости клеток с 1-м ядрышком в ядре (наименьшие значения отмечались на опытной площади № 12) и увеличивалась доля клеток с 2-мя, 3-мя и 4-мя, 5-ю, 6-ю ядрышками в ядре (наибольших значений данный показатель достигал в точках №№ 11, 12; №№ 12, 13 и № 10 соответственно). На опытных территориях №№ 8-13 в 2005 году у *Zebrina pendula* выявлялись клетки с 7-ю ядрышками в ядре, а в точках №№ 9-11 и № 13 – клетки с 8-ю ядрышками в ядре. Возрастание числа ядрышек является «репером» активации ядрышкообразующих районов, которая происходит в условиях воздействия на тест-растение радона.

Для выявления территорий с наиболее значимыми цитогенетическими эффектами мы воспользовались методами кластерного анализа. Результаты представлены на рис. 3.

По данным кластерного анализа, наибольшие различия выявлены между контролем и опытной территорией № 10 (точка, расположенная в жилой

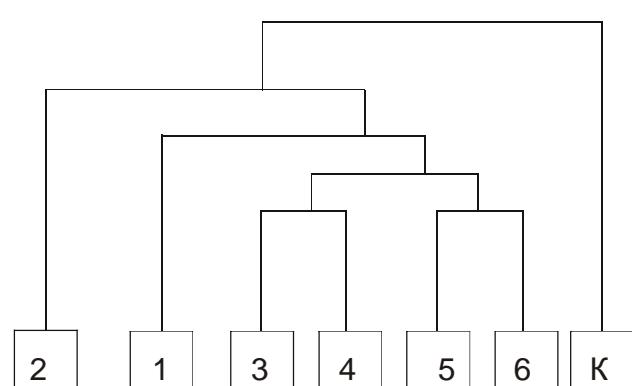


Рис. 2. Дендрограмма кластерных расстояний между опытными территориями и контролем (К) в 2004 году

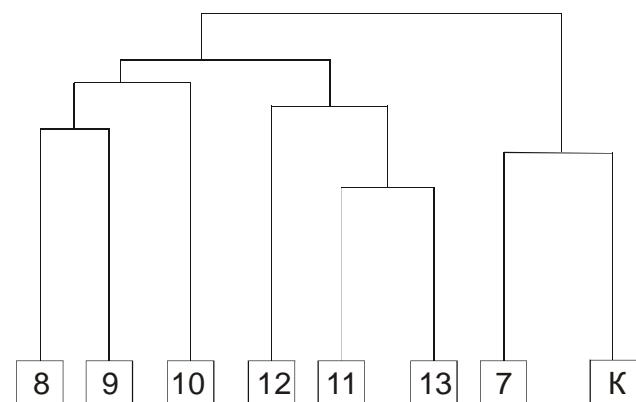


Рис. 3. Дендрограмма кластерных расстояний между опытными территориями и контролем (К) в 2005 году

Таблица 3

Ядрышковые характеристики в клетках апикальной меристемы корней *Zebina pendula Schnizl.* на опытных территориях, расположенных в жилой зоне, примыкающей к санаторию «Радон», и в районе озера Богатое в 2005 году

№ опытной точки	% клеток с п ядрышками в ядре						Среднее число ядрышек на клетку
	n=1	n=2	n=3	n=4	n=5	n=6	
7	55,7±2,6*	31,4±2,5	9,3±1,2**	3,1±0,8	0,4±0,1	—	—
8	42,3±3,2	36,1±2,1	14,8±2,4	5,2±1,3*	1,5±0,5*	0,4±0,1*	—
9	46,0±2,5	37,7±2,3	12,3±1,0*	3,0±0,6	0,6±0,1*	0,4±0,2	0,1±0,1
10	40,4±4,3	30,0±1,3	18,1±2,5	8,0±1,8*	2,6±0,8*	0,5±0,2*	0,3±0,2
11	31,0±1,4*	43,8±1,5*	19,4±0,8	4,4±0,9*	1,0±0,5	0,3±0,1	0,1±0,1
12	27,9±2,3*	46,4±1,4*	22,8±2,0	2,7±0,3	0,1±0,1	0,1±0,1	—
13	29,8±0,8*	38,8±1,6*	24,3±1,1	5,0±0,5**	1,7±0,6*	0,3±0,1	0,2±0,2
Контроль	44,2±5,3	35,4±3,7	18,1±2,4	2,0±0,5	0,2±0,1	0,1±0,1	—
							1,79 ±0,07

Обозначения:

\* – различия с контролем достоверны ( $P<0,05$ );  
\*\* – различия с контролем достоверны ( $P<0,01$ ).

зоне на возвышенности). Соответственно, можно предположить, что здесь происходит наиболее интенсивное выделение радона из почвы. Это можно объяснить тем, что фундамент дома увеличивает порозность почвогрунта, что обеспечивает возможность легкого проникновения радона и накопления его (скопление радона в подвалах домов широко известно). Наименьшие различия по совокупности цитогенетических показателей установлены между контролем и опытными точками № 7 (с северной стороны озера Богатое) и № 9 (на берегу озера Богатое в 500 м от точки № 8). Это можно объяснить тем, что точки находились на берегу озера Богатое, экранировались растительностью, и температура воздуха на указанных территориях была значительно ниже, чем на склонах и возвышенности, что приводило к уменьшению эманации радона. Можно предположить, что диффузии радона препятствовали прослойки глинистых пород, характерные для легкосуглинистого почвогрунта окружающей местности и способные выполнять роль своеобразных экранов.

Опытные точки №№ 8, 11-13, судя по ядрышковым показателям растительного тест-объекта, занимали промежуточное положение по степени выделения радона между опытными точками №№ 7, 9 и опытной точкой № 10.

Таким образом, на основании проведенного исследования по определению радона, выделяемого из почвогрунта, с использованием ядрышковых характеристик растительного тест-объекта на территории санатория «Радон», в жилой зоне, примыкающей к санаторию, и вблизи озера Богатое можно сделать следующие выводы. На опытных территориях происходит возрастание числа ядрышек в ядре и появляются высокоактивные типы ядрышек в клетках, что обусловлено воздействием радионовой радиации. Основными источниками радона на обследованной территории, являются лечебная грязь и газ, скапливающийся в подвалах жилых домов, что согласуется с результатами физико-химических исследований, выполненных в радиоопасных районах в России и за рубежом [7, 11, 23]. Выделения радона из почвогрунта в зоне рекреации (северный берег озера Богатое) незначительны и не оказывают существенного влияния на ядрышковые характеристики зебрины повислой.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артюхов В. Г. Цитогенетический мониторинг состояния окружающей среды на территориях, подверг-

шихся радиоактивному загрязнению в результате аварии на Чернобыльской АЭС (на примере поселка Уразово Белгородской области) / В. Г. Артюхов, В. Н. Калаев // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2006. – Т. 46, № 2. – С. 248-255.

2. Архипчук В. В. Использование ядрышковых характеристик в биотестировании / В. В. Архипчук // Цитология и генетика. – 1995. – Т. 29, № 3. – С. 6-9.

3. Дубинин Н. П. Некоторые проблемы радиационного мутагенеза / Н. П. Дубинин, В. А. Тарасов // Успехи современной генетики. – М., 1969. – С. 3-95.

4. Дуброва А. Н. Ядрышковые организаторы хромосом как адаптивный элемент вида / А. Н. Дуброва // Журнал общей биологии. – 1989. – Т. 50, № 2. – С. 213-217.

5. Калаев В. Н. Биоиндикация загрязнения радоном жилых помещений вблизи источника минеральных вод «Белая горка» с использованием цитогенетического метода / В. Н. Калаев, А. И. Федорова, И. С. Супрычева // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Химия. Биология. Фармация. – Воронеж, 2005. – № 1. – С. 116-121.

6. Калашник Н. А. Ядрышковые организаторы хромосом как адаптивные элементы хвойных видов / Н. А. Калашник, Т. Г. Хайдарова // Методы оценки состояния и устойчивости лесных экосистем : тез. докл. междунар. совещ., 8–13 авг., 1999, Красноярск. – Красноярск, 1999. – С. 79-80.

7. Крисюк Э. М. Проблема радона – ведущая проблема обеспечения радиационной безопасности / Э. М. Крисюк // АНРИ. – 1996. – Вып. 3. – С. 13-16.

8. Кулаичев А. П. Методы и средства анализа данных в операционной среде Windows. Stadia 6.0. / А. П. Кулаичев. – М.: Информатика и компьютеры, 1996. – 257 с.

9. Пат. 2237914 Российская Федерация, МПК G 10 V 9/00. Способ оценки радонового загрязнения помещений и способ подготовки проб / В. Н Калаев, В. М. Вахтель, А. Г. Бабенко; заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. ун-т. – № 2003107512; заявл. 18.03.03; опубл. 10.10.04, Бюл. № 28. – 22 с.

10. Радиация. Дозы, эффекты, риск. – М.: Мир, 1988. – 79 с.

11. Сансони Б. Радон в доме и продолжительность жизни людей / Б. Сансони, К. Отт // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физкультуры. – 1993. – № 2. – С. 14-17.

12. Смирнова А. Я. Минеральные воды Воронежской области: Лечебные и лечебно-столовые / А. Я. Смирнова, В. Л. Бочаров, В. Ф. Лукьянов. – Воронеж: Издво Воронеж. ун-та, 1995. – 180 с.

13. Смирнова А. Я. Экология подземных вод бассейна верхнего Дона / А. Я. Смирнова, А. И. Бородкин. – Воронеж: Воронеж. гос. ун-т, 2003. – 180 с.

14. Соболь М. А. Роль ядрышка в реакциях растительных клеток на действие физических факторов окружающей среды / М. А. Соболь // Цитология и генетика. – 2001. – Т. 35, № 3. – С. 72-84.

15. Усманов С. М. Радиация: справ. материалы / С. М. Усманов. – М.: ВЛАДОС, 2003. – 173 с.
16. Уткин В. Н. Радоновые проблемы в экологии / В. Н. Уткин // Соросовский образоват. журнал. – 1997. – № 1. – С. 57-64.
17. Федорова А. И. Биоиндикация мутагенного эффекта радона с использованием ядрышкового теста в клетках корней традесканции / А. И. Федорова, В. Н. Калаев, А. Ю. Плахотина // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Химия. Биология. Фармация. – Воронеж, 2004. – № 2. – С. 151-156.
18. Челидзе П. В. Морфофункциональная классификация ядрышек / П. В. Челидзе, О. В. Зацепина // Успехи современной биологии. – 1988. – Т. 105, вып. 2. – С. 252-268.
19. BEIR. Health Risks of Radon and Other Internally Deposited Alpha-Emitters BEIR IV. – Washington: Acad. Press, 1988. – 100 p.
20. Lung Cancer Deaths Attributable to Indoor Radon Exposure in West Germany / K. Steindorf [et al.] // Inter. J. Epidemiol. – 1995. – V. 24, № 3. – P. 435-492.
21. Possible association between mutant frequency in periphery lymphocytes and dosimetric radon concentrations / B. A. Brydges [et al.] // Lancet. – 1991. – № 8751. – P. 1187-1189.
22. Residential radon exposure and Lung Cancer in Schweden / G. Pershagen [et al.] // M. Engl. Med. – 1991. – V. 330, № 3. – P. 159-164.
23. Volkle H. Lungenkrebs und Radon in Wohnraumen / H. Volkle, Ch.E. Minder // Umweltradioaktivitat, Radioekologie, Strahlenwirkung. – Koln, 1993. – S. 933-938.
24. Volkle H. Umweltradioaktivitat und Strahlendosen im Uberblick / H. Volkle // Umweltradioaktivitat und Strahlendosen in der Schweiz 1993. – Friborg, 1994. – S. A.1. – A.19.