

УДК 504.055:582.711:581.45

**ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
POTENTILLA FRUTICOSA L. (ROSACEAE, MAGNOLIOPSIDA)
ДЛЯ БИОИНДИКАЦИИ СОСТОЯНИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ
НА ТЕРРИТОРИИ ВОСТОЧНО-УРАЛЬСКОГО
РАДИОАКТИВНОГО СЛЕДА**

Е. П. Храмова¹, А. Ю. Луговская², О. В. Тарасов³

¹ *Центральный сибирский ботанический сад СО РАН
Россия, 630090, Новосибирск, Золотодолинская, 101
E-mail: khramova@ngs.ru*

² *Сибирский государственный университет геосистем и технологий
Россия, 630108, Новосибирск, Плеханового, 10
E-mail: aulyg@mail.ru*

³ *ПО «Маяк»
Россия, Челябинская область, Озёрск, Ленина, 21
E-mail: o_tarasov@mail.ru*

Поступила в редакцию 16.04.2018 г., после доработки 1.11.2018 г., принята 27.12.2018 г.

*Храмова Е. П., Луговская А. Ю., Тарасов О. В. Оценка возможности использования *Potentilla fruticosa* L. (Rosaceae, Magnoliopsida) для биоиндикации состояния природной среды на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа // Поволжский экологический журнал. 2019. № 1. С. 90 – 105. DOI: <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2019-1-90-105>*

Предпринята попытка оценить состояние природной среды в зоне Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРС) методами биоиндикации. На примере растений *Potentilla fruticosa*, высаженных на трех участках в градиенте радионуклидного загрязнения ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs, в ходе многолетнего (2005 – 2013 гг.) исследования установлено, что с повышением уровня облучения уменьшается листовая пластинка, длина черешка, увеличивается индекс флуктуирующей асимметрии конечной доли листа вне зависимости от периода вегетации и года наблюдения. Морфологические параметры (площадь, длина и ширина листовой пластинки; площадь, длина и ширина конечной доли, длина черешка) определяли методом компьютерного анализа изображений, используя программу MapInfo. Статистически значимые различия морфологических показателей листа с контролем отмечены только у растений из наиболее загрязненной выборки. По мере повышения радиационной нагрузки межгодовая изменчивость длины черешка возрастала от низкого до высокого уровня вне зависимости от периода вегетации. При оценке флуктуирующей асимметрии конечной доли листа статистически значимые различия с контролем были обнаружены у растений из выборки, подвергшихся радиационному воздействию. С использованием индекса флуктуирующей асимметрии качество окружающей среды импактных участков ВУРС оценивалось как критическое, фонового участка – как норма.

Ключевые слова: биоиндикация, радионуклидное загрязнение, Восточно-Уральский радиоактивный след, *Potentilla fruticosa*, морфометрические показатели листа, флуктуирующая асимметрия.

DOI: <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2019-1-90-105>

ВВЕДЕНИЕ

Современная радиационная обстановка в Уральском регионе в значительной степени определяется деятельностью ФГУП «ПО «Маяк». Сформировавшийся в 1957 г. в результате аварии на ФГУП «ПО «Маяк» Восточно-Уральский радиоактивный след (ВУРС) уже более 60 лет является уникальным полигоном для проведения экспериментальных работ в природе. За эти годы выполнены обширные исследования, накоплены уникальные данные как в научном, так и практическом плане. В 1966 г. на отчужденной территории в головной части ВУРС был организован Восточно-Уральский государственный заповедник (ВУГЗ) для осуществления научно-исследовательских работ по радиоэкологии и специальному природопользованию (Мартюшов и др., 1997; Позолотина, 2003; Позолотина и др., 2008, 2009; Pryakhin et al., 2016).

Радиационная обстановка в районе ФГУП «ПО «Маяк» остается стабильной, а радиоактивное загрязнение окружающей среды сохраняется на среднемноголетнем уровне. В настоящее время радиоактивное загрязнение территории в районе предприятия определяется в основном ^{90}Sr , ^{137}Cs и, в значительно меньшей степени, Pu, что обуславливает долговременный характер радиационного воздействия. Средняя плотность радиоактивного загрязнения почвенного покрова заповедника, входящего в головную часть ВУРС, с увеличением расстояния от ПО «Маяк» снижается: ^{90}Sr с 29.3 до 0.4 МБк/м², ^{137}Cs – с 0.90 до 0.02 МБк/м², что на два – четыре порядка превышает фоновый уровень. Плотность радиоактивного загрязнения почвенного покрова ^{90}Sr и ^{137}Cs на периферийных участках зоны наблюдения ФГУП «ПО «Маяк» соответствует региональным «фоновым» (глобальным) значениям и составляет для ^{90}Sr – 2.0 кБк/м², ^{137}Cs – 4.0 кБк/м² и Pu – 0.2 кБк/м² (Позолотина и др., 2008; Отчет по экологической безопасности..., 2014, 2017).

Однако необходимо учитывать, что подобные сведения не могут дать прямого ответа на вопрос о воздействии на живые организмы, в том числе человека, и о пригодности среды для их обитания. Использование методов биологического мониторинга позволяет получить интегральную оценку воздействия комплекса ряда внешних факторов на растительные организмы и ответную реакцию растений на них (Мэннинг, Федер, 1985; Захаров и др., 2000; Федорова, 2002; Позолотина и др., 2004; Горшкова и др., 2014; Захаров, 2014).

Для оценки стрессового воздействия техногенного характера на растения и проведения биологического мониторинга применяют различные подходы, в том числе определяют количественные изменения морфологических показателей и их асимметрию. Обнаружение и оценка этих изменений в сочетании с физико-химическими методами достоверно отражают состояние растений и окружающей среды (Горшкова и др., 2014; Луговская и др., 2015, 2018; Geras'kin et al., 2011).

Выбор в качестве модельного объекта исследования *Potentilla fruticosa* L. (лапчатки кустарниковой) из семейства Rosaceae обусловлен экологической пластичностью вида, его успешной интродукцией, а также использованием в качестве индикатора промышленно-транспортного загрязнения в г. Новосибирске (Храмова, Высочина, 2010; Луговская и др., 2018).

Цель работы заключалась в изучении временной изменчивости морфологических параметров листа и асимметрии *Potentilla fruticosa* в градиенте радионуклид-

ного загрязнения для выбора наиболее оптимального признака в качестве биоиндикатора состояния окружающей среды и определения уровня воздействия.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования проводились на территории Восточно-Уральского государственного заповедника с 2005 по 2013 г. В разные годы погодные условия в пределах региона варьируют, и для объективного анализа полученных данных наблюдений за один год недостаточно. Также необходимо принимать в расчет пределы изменчивости в ходе сезонной вегетации.

Объектами изучения были растения *P. fruticosa*, высаженные трехлетними саженцами в 2004 г. на трех импактных участках заповедника с разным уровнем загрязнения радионуклидами ^{90}Sr и ^{137}Cs . Участок И1 находится в головной части ВУРС в 6 км от места взрыва в 1957 г. емкости с радиоактивными отходами, участок И2 – на южном берегу оз. Бердениш в 12 км от места аварии, участок И3 – в окрестности оз. Урукуль в 15 км от места взрыва. В качестве условно «фонового» выбран участок (Ф), расположенный за пределами заповедника на окраине пос. Меглино. «Фоновый» участок сходен по основным параметрам с импактными, исключая радионуклидное загрязнение.

В почвах заповедника содержание ^{90}Sr снижается со 133.5 до 0.07 МБк/м² (табл. 1). Однако даже минимальное содержание ^{90}Sr в почвах третьего участка на порядок превышает контрольный уровень.

Таблица 1

Радиационная характеристика участков зоны ВУРС
(естественный радиационный фон на Урале составляет 0.11 мкЗв / ч)

Характеристики	Участки зоны ВУРС			
	И1	И2	И3	Ф
Средняя плотность загрязнения по ^{90}Sr , МБк/м ²	133.5±53.2 ¹	17±7	0.07±0.03	н.д. ²
Средняя плотность загрязнения по ^{137}Cs , кБк/м ²	8400±2520	900±270	160±48	н.д.
Мощность эквивалентной дозы на уровне почвы, мкЗв/ч	3.1±0.8	1.26±0.29	0.16±0.04	0.11±0.04
Плотность потока β-частиц на поверхности почвы, частиц/мин.см ²	2180±150	820±270	9±3	4±2

Примечание. ¹ – среднее значение ± стандартное отклонение; ² – н.д. – нет данных.

Средняя плотность загрязнения почвы первых двух участков ^{137}Cs в 20 раз меньше, чем ^{90}Sr , но на участке 3 содержание ^{137}Cs в 2 раза выше, чем ^{90}Sr . В зависимости от расстояния от источника радиации содержание ^{137}Cs снижается с 8400 до 160 кБк/м², что в 30 – 150 раз выше фонового уровня.

Ранее нами выявлено, что минеральный состав почвы из загрязненных и фонового участков практически не отличается, что можно объяснить естественной сложившейся почвенно-геохимической обстановкой. Установлено наличие 21 химического элемента методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения (РФА СИ), при этом их содержание в почве из всех точек отбора не превышает ПДК (Храмова, 2016; Chankina et al., 2007; Khramova et al., 2016).

В 2005, 2006 и 2008 гг. образцы отбирали в фазе плодоношения, в 2007 г. – в фазе бутонизации, в 2009 – 2013 гг. – в фазе начала вегетации. Для измерения морфологических показателей брали на каждом участке по 5 – 10 годичных побегов с каждой особи. С каждого побега отбирали нижний лист и формировали среднюю пробу из 10 – 12 листьев. Объем выборки на каждом участке составлял 25 – 30 особей.

Морфологические параметры – площадь, длина и ширина листовой пластинки; площадь, длина и ширина конечной доли, длина черешка – определяли методом компьютерного анализа изображений, используя программы MapInfo и Microsoft Excel 2003 (рис. 1) (Трубина, 2006; Трубина и др., 2016).

Для оценки индекса флуктуирующей асимметрии (ФА) конечной доли листовой пластинки *P. fruticosa* использовали набор из четырех морфологических признаков – ширина левой и правой половинок листа; длина жилки второго порядка, второй от основания листа; расстояние между основаниями первой и второй жилок второго порядка; расстояние между концами этих же жилок (рис. 2). Интегральный показатель ФА комплекса морфологических признаков листовой пластинки рассчитывали по известной формуле с использованием алгоритма нормированной разности (Захаров и др., 2000). Для оценки отклонений состояния организма по индексу ФА использовали балловую шкалу, предложенную М. Н. Кузнецовым и Л. В. Голышкиным (2008) для листьев яблони.

Измерения удельной активности радионуклидов – ^{90}Sr и ^{137}Cs – проводили в аккредитованной аналитической лаборатории Центральной заводской лаборатории ФГУП «ПО «Маяк» (г. Озерск, Челябинская область) стандартными методами бета- и гамма-спектрометрии и радиохимии (Стронций-90..., 2006; Цезий-137..., 2006).

При обработке данных использовали программы Statistica 8.0 и Excel. Математическую обработку полученных результатов проводили с использованием программ «STATISTICA 8.0» и Excel. Рассчитывали групповые показатели суммарной статистики – среднюю арифметическую величину (M) и стандартное отклонение (σ). Для выбора критерия оценки значимости парных различий проверяли соответствие формы распределения нормальному, используя критерий Колмогорова – Смирнова. Учитывая, что этим условиям удовлетворяла лишь часть эмпирических

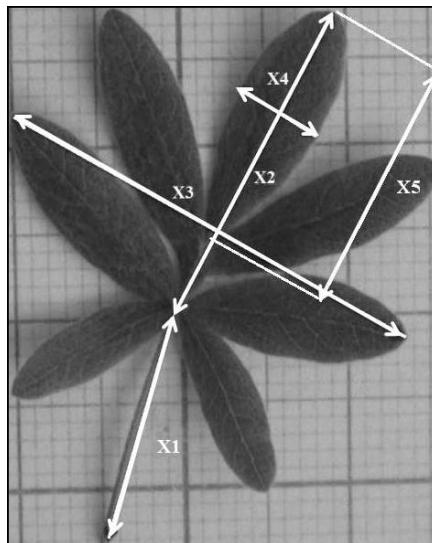


Рис. 1. Порядок измерения метрических характеристик листьев *Potentilla fruticosa*: X1 – длина черешка, X2 – длина листовой пластинки, X3 – ширина листовой пластинки, X4 – ширина конечной доли, X5 – длина конечной доли

распределений признаков, проверку гипотезы о равенстве генеральных средних во всех случаях проводили с помощью U-критерия Манна – Уитни для независимых переменных. Нулевую гипотезу отвергали в случае $p < 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Важным показателем радиоактивного загрязнения растений является содержание радионуклидов в различных органах растений (рис. 3). В результате исследования с 2005 по 2013 г. содержания радионуклидов в листьях и стеблях *P. fruticosa* установлено, что наибольшее количество ^{90}Sr обнаружено в растениях

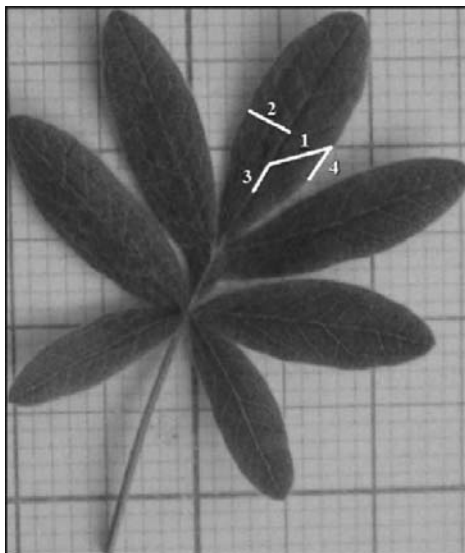


Рис. 2. Измерение показателей по четырем промерам левой и правой половинки конечной доли *Potentilla fruticosa*: 1 – длина второй жилки от основания листа, 2 – ширина половинки листа, 3 – расстояние между основаниями первой и второй жилкой, 4 – расстояние между концами этих же жилок

из участка И1, расположенного в непосредственной близости к месту аварии вне зависимости от фазы вегетации и года сбора образцов. На протяжении исследуемого периода содержание ^{90}Sr в листьях растений из участка И1 колеблется от 150 до 388 кБк/кг от сухой массы, в стеблях – от 162 до 269 кБк/кг. Наибольшее содержание ^{90}Sr в листьях обнаружено в 2013 г., в стеблях – в 2009 г. По мере удаления от источника радиации содержание ^{90}Sr в листьях и стеблях *P. fruticosa* из участков 2 – 3 снижается в 7 – 1400 раз соответственно. Отмечено, что содержание ^{90}Sr в листьях и стеблях растений в пределах одного участка сходно на протяжении всего периода наблюдения. Концентрация ^{137}Cs , как правило, выше в стеблях, чем в листьях, за исключением растений, собранных в 2006 и 2009 гг. на наиболее загрязненном участке И1. Наибольшее содержание ^{137}Cs наблюдалось в стеблях *P. fruticosa* в начале вегетации 2010 г. на участке И2 (2 кБк/кг).

Сравнительный анализ морфологических показателей листа в исследуемый период показал, что радиационное воздействие вызвало статистически значимое уменьшение поверхности листа и конечной доли, их длины и ширины, длины черешка листа у растений с наиболее загрязненного участка И1 по сравнению с фоновым участком при $p < 0.05$ (U – критерий Манна – Уитни). У растений из выборки 2 и 3 по мере снижения радиационной нагрузки наблюдалась тенденция к возрастанию поверхности конечной доли, длины и ширины, увеличению длины черешка листа, но различия между исследованными признаками не всегда статистически значимо отличались от контроля (табл. 2).

Таблица 2

Морфометрические показатели *Potentilla fruticosa*
из разных по уровню загрязнения участков ВУРС в различные фазы вегетации

Год	Участок	Площадь листа, мм ²	Длина листа, мм	Ширина листа, мм	Площадь конечной доли, мм ²	Длина конечной доли, мм	Ширина конечной доли, мм	Длина черешка, мм
Плодоношение								
2005	Ф	373±51 ¹	21±4	32±3	81±11	16±1	11±2	12±2
	И1	198±29	12±2	21±6	37±10	8±4	5±2	4±2
	И2	211±49	14±3	24±5	49±5	12±1	7±1	7±1
	И3	252±32	16±1	26±6*	62±3	14±3*	9±1*	10±1*
2006	Ф	630±204	30±6	40±6	97±46	22±5	7±2	12±3
	И1	260±130	19±4	25±6	47±25	15±4	5±12	8±3
	И2	314±151	21±5	29±74	62±29*	16±3*	6±2*	10±4*
	И3	449±141	28±4*	35±6*	73±31*	17±4*	6±1*	11±3*
2008	Ф	656 ±145	37±3	44±5	98±15	21±1	7±1	13±2
	И1	217±131	21±4	27±5	45±21	16±3	6±2*	9±22
	И2	578±122*	31±5	43±6*	74±19	18±2	7±1	11±2
Бутонизация								
2007	Ф	304±43	34±2	31±3	54±10	17± 1	5±1	12±2
	И1	194±44	16±2	23±3	36±9	12±2	5±1	9±1*
	И2	305±89*	19±3	28±4	56±18*	15±2*	6±1*	12±3*
	И3	302±92*	19±3	28±4	58±17*	15±2*	6±1*	12±2*
Начало вегетации								
2009	Ф	389±63	26±4	33±3	46±12	16±2	8±2	11±2
	И1	68±79	10±4	20±6	17±13	6±4	3±2	4±2
	И2	147±89	18±3	21±5	29±7	12±2	6±1	8±1
	И3	214±112	18±2	25±6	31±9	10±3	8±1*	10±1
2010	Ф	398±69	26±3	34±2	48±16	17±2	11±2	13±2
	И1	85±119	10±4	15±5	18±7	5±3	3±2	4±2
	И2	232±96	20±4	26±5	31±6	11±2	7±1	7±2
	И3	253±76	25±2*	30±4	34±6	13±5	9±1	9±1
2012	Ф	609±103	41±6	32±7	68±32	19±9	7±5	10±2
	И1	158±102	17±4	20±4	28±12	10±3	5±1	7±2
	И2	237±74	27±2	23±3	30±11	9±4	4±2	9±1
	И3	478±68	36±3*	29±2	44±10	14±3*	5±2*	9±1*
2013	Ф	366±79	22±6	30±5	48±21	18±7	8±4	12±2
	И1	112±47	12±5	10±7	27±8	7±4	4±3*	7±3
	И2	141±53	14±3	18±2	31±9	9±5	4±2	9±1
	И3	211±42	16±2	21±2	35±8*	13±2*	5±1*	10±1

Примечание. ¹ – среднее значение ± стандартное отклонение; * – различия от контрольного участка (Ф) статистически не значимы при $p \leq 0.05$.

Анализ изменчивости морфологических показателей в период плодоношения в течение 3 лет (2005, 2006 и 2008 гг.) показал, что эти признаки варьируют у растений из разных по уровню загрязнения участков от низкого до высокого (рис. 4). Изменчивость длины черешка у растений из фонового участка и И3 оценивалась как очень низкая ($C_v = 5 - 7\%$), у растений из участка И2 как средняя ($C_v = 22\%$) и очень высокая у растений из наиболее загрязненного участка И1 ($C_v = 38\%$) по шкале, предложенной С. А. Мамаевым (1975). В зависимости от уровня загрязнения участков радионуклидами признаки «площадь, длина, ширина листа»,

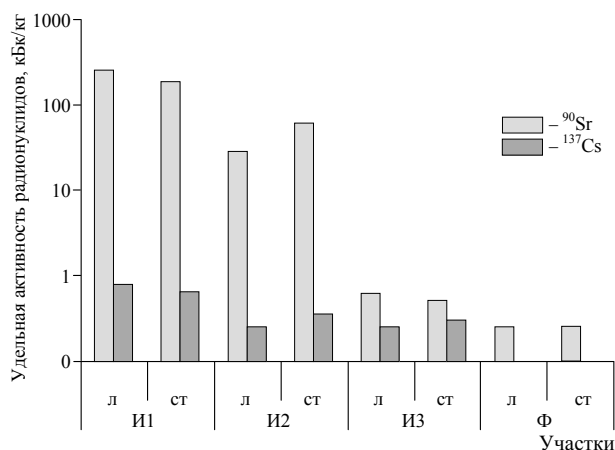


Рис. 3. Средняя удельная активность радионуклидов в листьях (л) и стеблях (ст) *Potentilla fruticosa* из разных участков ВУРС (кБк/кг на воздушно-сухую массу) за период 2005 – 2013 гг.

отметить, что наибольшие значения площади листа и его конечной доли, длины и ширины свойственны растениям, собранным в наиболее влажные вегетационные сезоны 2006 и 2008 гг. в отличие от наиболее теплого и сухого 2005 г. (Архивы погоды по городам России: <http://www.atlas-yakutia.ru/weather>).

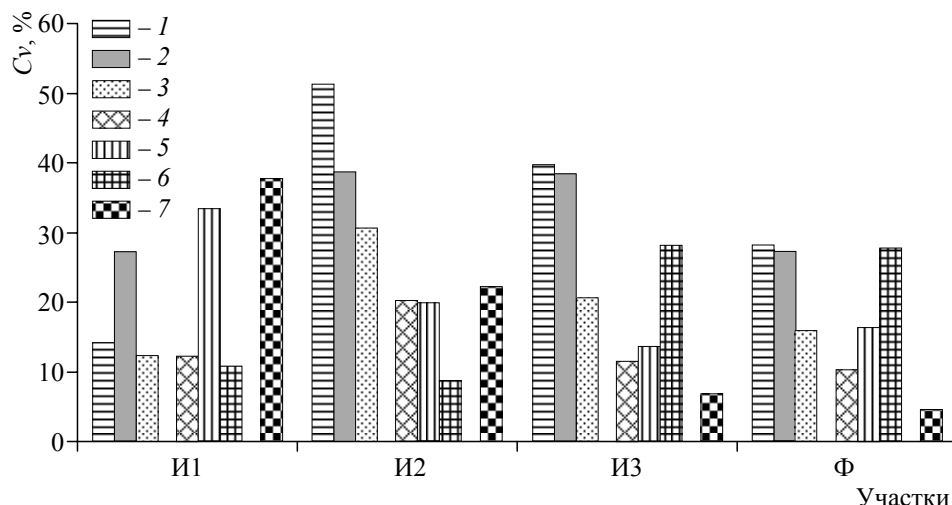


Рис. 4. Изменчивость морфологических показателей *Potentilla fruticosa* в условиях ВУРС в период 2005 – 2008 гг. (фаза плодоношения): 1 – площадь листа, мм²; 2 – длина листа, мм; 3 – ширина листа, мм; 4 – площадь конечной доли листа, мм²; 5 – длина конечной доли листа, мм; 6 – ширина конечной доли листа, мм; 7 – длина черешка, мм

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ *POTENTILLA FRUTICOSA*

В фазе начала вегетации на протяжении 4 лет (2009, 2010, 2012, 2013 гг.) вариабельность изучаемых морфологических показателей листа оценивалась как высокая у растений из наиболее загрязненного участка И1) ($25\% < C_v < 37\%$) (рис. 5). У особей из других участков площадь и длина листа, ширина конечной доли варьировали на высоком уровне, остальные – на низком и среднем.

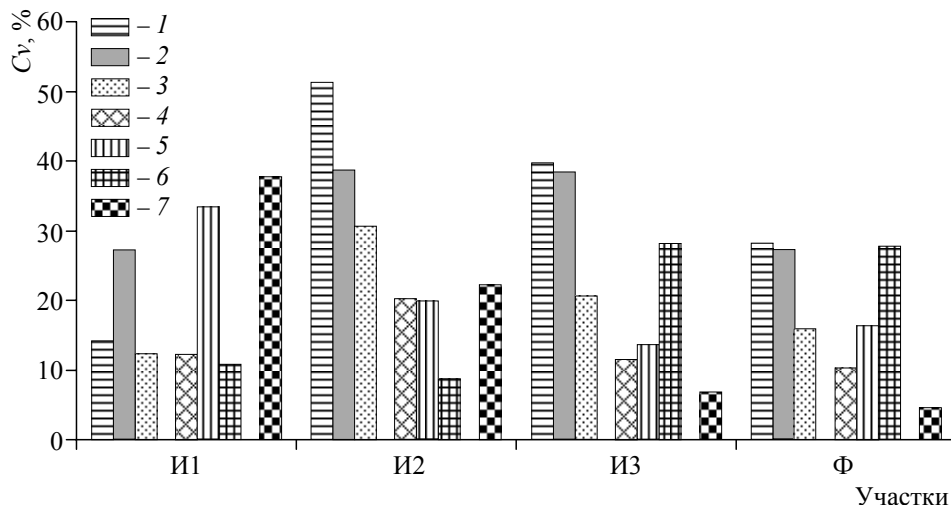


Рис. 5. Изменчивость морфологических показателей *Potentilla fruticosa* в условиях ВУРС в период с 2009 по 2013 г. (фаза начала вегетации): 1 – площадь листа, мм²; 2 – длина листа, мм; 3 – ширина листа, мм; 4 – площадь конечной доли листа, мм²; 5 – длина конечной доли листа, мм; 6 – ширина конечной доли листа, мм; 7 – длина черешка, мм

Следует отметить, что вне зависимости от периода вегетации изменчивость признака «длина черешка» в выборке с сильным уровнем загрязнения оценивалась как высокая ($C_v = 31 - 38\%$). По мере снижения радиационной нагрузки вариабельность длины черешка постепенно уменьшалась до низкого уровня у растений из выборки И3. У растений из фонового участка изменчивость признака «длина черешка» оценивалась как низкая на протяжении всего периода наблюдения (2005 – 2013 гг.).

В целом изменчивость показателей листа выше у образцов, отобранных в начале вегетации, что, скорее всего, связано с активным формированием листа в этот период и разными метеорологическими условиями в исследуемый период. Наименьшие размеры листа отмечены в 2009 г. вне зависимости от уровня загрязнения, именно в этом году месяцы апрель и май выделялись как самые холодные и дождливые ($T_{cp} = 2 - 14^{\circ}C$, $O = 11 - 6$ мм соответственно) (Архивы погоды по городам России: <http://www.atlas-yakutia.ru/weather>). В наиболее благоприятном теплом и влажном 2012 г. размеры листа достигали максимальных значений у растений каждой выборки.

Одним из перспективных подходов для фонового мониторинга и понимания последствий различных видов воздействия, в том числе радиоактивного, является оценка качества природной среды по состоянию обитающих в ней живых организмов. Для первого рекогносцировочного восприятия возможно использование

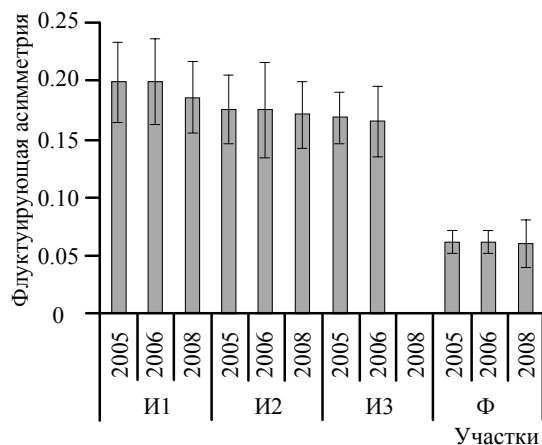


Рис. 6. Показатели флуктуирующей асимметрии конечной доли листа *Potentilla fruticosa* из разных участков в фазе плодоношения в 2005 – 2006 и 2008 гг.

варьировало от 0.152 до 0.199. По мере снижения уровня радиации показатель ФА постепенно уменьшался. На фоновом участке его величина составила 0.06.

Значения ФА конечной доли листа *P. fruticosa* на участках, подвергнутых радиационному воздействию, в фазе плодоношения (2005 – 2006 гг. и 2008 г.) равнялись 0.186 – 0.199. Согласно шкале, предложенной М. Н. Кузнецовым и Л. В. Голышкиным (2008), уровень загрязнения

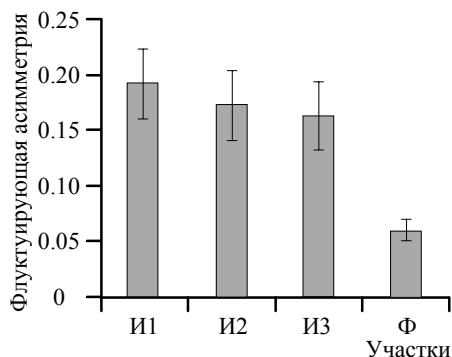


Рис. 7. Показатели флуктуирующей асимметрии конечной доли листа *Potentilla fruticosa* из разных участков в фазе бутонизации в 2007 г.

индекса флуктуирующей асимметрии (ненаправленные отклонения от билатеральной симметрии), рассматриваемом многими исследователями как показатель стабильности развития, возрастающий по мере нарушения онтогенетического гомеостаза (Горшкова, 2012; Горшкова и др., 2014; Захаров, 2014).

Анализ индекса флуктуирующей асимметрии конечной доли листа *P. fruticosa* показал, что на протяжении периода наблюдения с 2005 по 2013 г. значение интегрального показателя стабильности развития в выборках под радиационной нагрузкой варьировало от 0.152 до 0.199. По мере снижения уровня радиации показатель ФА постепенно уменьшался. На фоновом участке его величина составила 0.06.

В 2007 г. в период бутонизации величина флуктуирующей асимметрии конечной доли листа *P. fruticosa* на трех импактных участках составляла от 0.163 до 0.192, что также соответствовало 5 баллам, на фоновом участке (Ф) индекс ФА равнялся 0.06 и оценивался как норма (1 балл) (рис. 7).

В 2009 – 2010 и 2012 – 2013 гг. в фазе начала вегетации индекс ФА на импактных участках равнялся 0.152 – 0.183, на фоновом – 0.055 – 0.059. Уровень загрязнения природной среды на импактных участках с сильным и средним облучением (И1, И2) соответственно оценивался как критический (5 баллов), на участке со слабым облучением (И3) – как сильный (4 балла), на фоновом – как нормальный (1 балл). Наибольшее значение ФА наблюдалось у растений из участка И1 в 2012 и 2013 гг. (рис. 8).

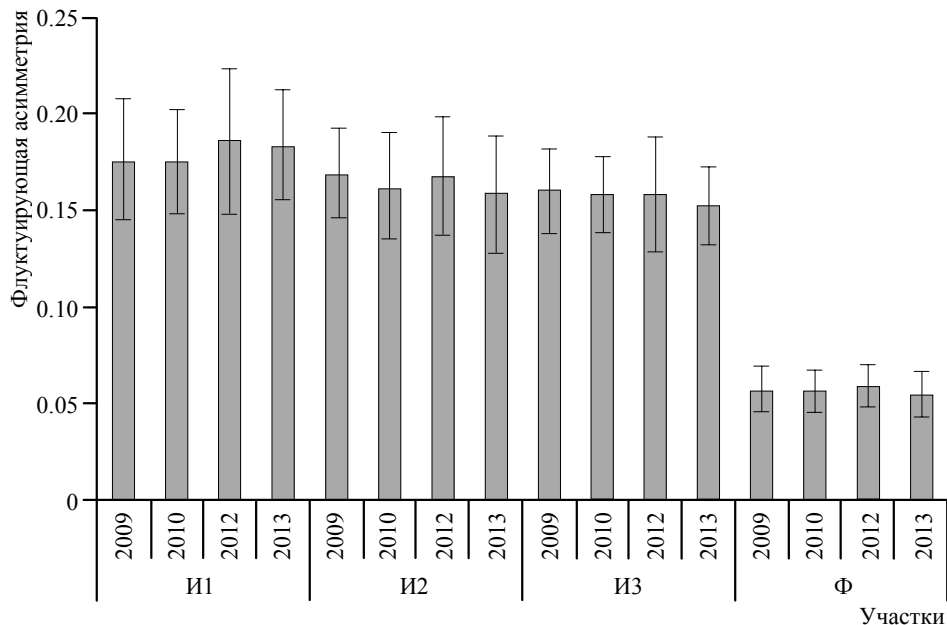


Рис. 8. Показатели флуктуирующей асимметрии конечной доли листа *Potentilla fruticosa* из разных участков в фазе начала вегетации в 2009 – 2013 гг.

Анализ изменчивости индекса флуктуирующей асимметрии конечной доли листа *P. fruticosa* в условиях радионуклидного загрязнения на протяжении наблюдаемого периода показал стабильность этого признака вне зависимости от фазы вегетации, коэффициент вариации равнялся 4 – 5%, что оценивается как очень низкий уровень вариабельности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе многолетнего (2005 – 2013 гг.) исследования на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа установлено, что в ответ на радионуклидное загрязнение наблюдалось сокращение размеров листовой пластинки и длины черешка у растений *P. fruticosa*. Показано, что радиационное воздействие вызвало статистически значимое уменьшение поверхности листа и конечной доли, их длины и ширины, длины черешка листа только у растений в выборке с сильным уров-

нем загрязнения по сравнению с фоном. В целом изменчивость морфологических признаков листа *P. fruticosa* возрастала в градиенте радионуклидного загрязнения, что особенно заметно для признака «длина черешка». Показано, что по мере повышения радиационной нагрузки межгодовая изменчивость длины черешка возрастала от низкого ($C_v = 6 - 7\%$) до высокого ($C_v = 31 - 38\%$) уровня вне зависимости от периода вегетации.

При оценке флуктуирующей асимметрии конечной доли листа статистически значимые различия с контролем были обнаружены у растений из всех выборок, подвергшихся радиационному воздействию, вне зависимости от периода вегетации и года наблюдения. Индекс ФА конечной доли листа у *P. fruticosa* из выборок с сильным и средним уровнем загрязнения изменялся в пределах 0.171 – 0.199, что соответствовало критическому загрязнению среды. Состояние природной среды на участке со слабым уровнем загрязнения в 2010 – 2013 гг. оценивалось как сильное загрязнение (ФА = 0.152 – 0.158), в 2009 г. – как критическое (ФА = 0.160). В ходе всего периода исследования индекс ФА на фоновом участке колебался в пределах 0.055 – 0.061, что оценивалось как норма.

Таким образом, полученные результаты позволяют заключить, что при использовании растений *P. fruticosa* в качестве биоиндикатора состояния окружающей среды и определения уровня воздействия наиболее оптимальным критерием является индекс флуктуирующей асимметрии.

Работа выполнена в рамках государственного задания Центрального сибирского ботанического сада СО РАН «Оценка морфогенетического потенциала популяций растений Северной Азии экспериментальными методами». При подготовке публикации использовались материалы биоресурсной научной коллекции ЦСБС СО РАН «Коллекции живых растений в открытом и закрытом грунте», УНУ № УСУ 44053.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Архивы погоды по городам России [Электронный ресурс]. URL: <http://www.atlas-yakutia.ru/weather> (дата обращения: 01.03.2018).

Горикова Т. А. Оценка возможности использования клевера ползучего (*Trifolium repens* L.) для биоиндикации антропогенного нарушения среды // Изв. Самар. науч. центра РАН. 2012. Т. 14, № 1. С. 69 – 73.

Горикова Т. А., Удалова А. А., Гераськин С. А., Киселев С. М., Ахромеев С. В. Биоиндикация состояния природной среды в районе расположения Дальневосточного центра по обращению с радиоактивными отходами // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2014. № 4. С. 130 – 139.

Захаров В. М. Оценка состояния биоразнообразия и здоровья среды // Поволж. экол. журн. 2014. № 1. С. 50 – 59.

Захаров В. М., Чубинишвили А. Т., Дмитриев С. Г., Баранов А. С., Борисов В. И., Валецкий А. В., Крысанов Е. Ю., Кряжева Н. Г., Пронин А. В., Чистякова Е. К. Здоровье среды : практика оценки. М. : Центр экол. политики России, 2000. 320 с.

Кузнецов М. Н., Голышкин Л. В. Сравнительная характеристика особенности флуктуирующей асимметрии листьев яблони в разных экологических условиях // С.-х. биология. 2008. № 3. С. 72 – 77.

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ *POTENTILLA FRUTICOSA*

Луговская А. Ю., Храмова Е. П., Тарасов О. В., Крылова Е. И. Оценка изменения морфологических показателей *Potentilla fruticosa* в условиях радиоактивного воздействия // Вопр. радиационной безопасности. 2015. № 4. С. 66 – 72.

Луговская А. Ю., Храмова Е. П., Чанкина О. В. Влияние транспортно-промышленного загрязнения на морфометрические параметры и элементный состав *Potentilla fruticosa* // Сиб. экол. журн. 2018. № 1. С. 111 – 121.

Мамаев С. А. Основные принципы методики исследования внутривидовой изменчивости древесных растений // Тр. Уральск. науч. центра АН СССР. 1975. Вып. 94 : Индивидуальная эколого-географическая изменчивость растений. С. 9 – 14.

Мартюшов В. З., Смирнов Е. Г., Тарасов О. В., Романов Г. Н., Спирин Д. А. Восточно-Уральский Государственный заповедник // Вопр. радиационной безопасности. 1997. № 3. С. 42 – 57.

Мэннинг У. Д., Федер У. А. Биомониторинг загрязнения атмосферы с помощью растений. Л. : Гидрометеоиздат, 1985. 141 с.

Отчет по экологической безопасности ФГУП «Производственное объединение «Маяк» за 2013 год / Гос. корпорация по атом. энергии «Росатом», Федер. гос. унитар. предприятие «Производст. об-ние «Маяк». Озерск ; Челябинск : Авто Граф, 2014. 44 с.

Отчет по экологической безопасности ФГУП «ПО «Маяк» за 2016 год. Озерск : ФГУП «ПО «Маяк», 2017. 50 с.

Позолотина В. Н. Отдаленные последствия действия радиации на растения. Екатеринбург : Академкнига, 2003. 244 с.

Позолотина В. Н., Ульянова Е. В., Сарapultцев И. Е. Биоиндикация радионуклидного загрязнения экосистем с помощью растений // Урал. Радиация. Реабилитация. Екатеринбург : УрО РАН, 2004. С.183 – 200.

Позолотина В. Н., Молчанова И. В., Караваева Е. Н., Михайловская Л. Н., Антонова Е. В. Современное состояние наземных экосистем Восточно-Уральского радиоактивного следа : уровни загрязнения, биологические эффекты. Екатеринбург : Изд-во «Геошницкий», 2008. 204 с.

Позолотина В. Н., Антонова Е. В., Каримуллина Э. М., Харитонова О. В., Пустовалова Л. А. Последствия хронического действия радиации для флоры восточно-уральского радиоактивного следа // Радиационная биология, радиоэкология. 2009. Т. 49, № 1. С. 97 – 106.

Смирнов Е. Г. Природные условия и растительность Восточно-Уральского радиоактивного следа // Экологические последствия радиоактивного загрязнения на Южном Урале. М. : Наука, 1993. С. 79-84.

Стронций-90. Методика выполнения измерений удельной (объемной) активности в пробах окружающей среды. МП-0401-195-06 ЦЗЛ. Инструкция предприятия ФГУП «ПО» Маяк». Озерск, 2006. 11 с.

Трубина Л. К. Стереомодели в изучении биологических объектов. Новосибирск : Изд-во Сиб. гос. геодез. акад., 2006. 136 с.

Трубина Л. К., Храмова Е. П., Луговская А. Ю. Компьютерный анализ изображений листовых пластин *Potentilla fruticosa* для биоиндикации урбанизированных территорий // Вестн. Сиб. гос. ун-та геосистем и технологий. 2016. Вып. 4. С. 263 – 273.

Федорова А. И. Биоиндикация загрязнения городской среды // Изв. АН. Сер. Географическая. 2002. № 1. С. 72 – 80.

Храмова Е. П. Род *Pentaphylloides* Hill (Rosaceae) Азиатской России (фенольные соединения, элементный состав в природе и культуре, хемотаксономия) : дис. ... д-ра биол. наук. Новосибирск, 2016. 437 с.

Храмова Е. П., Высочина Г. И. Состав и содержание флавоноидов в *Potentilla fruticosa* (Rosaceae) в условиях техногенного загрязнения в г. Новосибирске // Растительные ресурсы. 2010. Т. 46, вып. 2. С. 74 – 86.

Цезий-137. Методика выполнения измерений активности и определение удельной (объемной) активности на сцинтилляционных гамма-спектрометрах СГС-200, СГС-100, ГСАС. МП-0401-188-06 ЦЗЛ. Инструкция предприятия ФГУП «ПО» Маяк». Озерск, 2006. 20 с.

Chankina O. V., Khramova E. P., Koutsenogii K. P., Krylova E. I., Syeva S. Ya., Tarasov O. V. SRXRF for investigation of plants in conditions of radioactive contamination // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Sec. A. 2007. Vol. 575, № 1–2. P. 210 – 213.

Geras'kin S. A., Evseeva T. I., Oudalova A. A. Plants as a tool for the environmental health assessment // Encyclopedia of Environmental Health. Burlington : Elsevier, 2011. Vol. 4. P. 571 – 579.

Khramova E. P., Chankina O. V., Rakshun Ya. V., Sorokoletov D. S. Variability of the element composition of *Pentaphylloides fruticosa* vegetable samples during long-term storage // Physics Procedia. 2016. Vol. 84. P. 256 – 262.

Pryakhin E. A., Mokrov Yu. G., Tryapitsina G. A., Ivanov I. A., Osipov D. I., Atamanyuk N. I., Deryabina L. V., Shaposhnikova I. A., Shishkina E. A., Obvintseva N. A., Egoreichenkov E. A., Styazhkina E. V., Osipova O. F., Mogilnikova N. I., Andreev S. S., Tarasov O. V., Geras'kin S. A., Trapeznikov A. V., Akleyev A. V. Characterization of biocenoses in the storage reservoirs of liquid radioactive wastes of Mayak PA. Initial descriptive report // J. of Environmental Radioactivity. 2016. Vol. 151. P. 449 – 460.

ASSESSMENT OF POSSIBLE USE OF *POTENTILLA FRUTICOSA* L.
(ROSACEAE, MAGNOLIOPSIDA) FOR BIOINDICATION
OF THE NATURAL ENVIRONMENT STATUS IN THE AREA
OF THE EASTERN URAL RADIOACTIVE TRACE

Elena P. Khramova ¹, Anna Yu. Lugovskaya ², and Oleg V. Tarasov ³

¹ Central Siberian Botanical Garden of the Siberian Branch, Russian Academy of Sciences
101 Zolotodolinskaya Str., Novosibirsk 630090, Russia

E-mail: khramova@ngs.ru

² Siberian State University of Geosystems and Technologies
10 Plakhotnogo Str., Novosibirsk 630108, Russia

E-mail: aulyg@mail.ru

³ Federal State Unitary Enterprise “Mayak” Industrial Association
21 Lenina Str., Ozersk, Chelyabinsk Region 456780, Russia

E-mail: o_tarasov@mail.ru

Received 16 April 2018, revised 1 November 2018, accepted 27 December 2018

Khramova E. P., Lugovskaya A. Yu., Tarasov O. V. Assessment of Possible Use of *Potentilla fruticosa* L. (Rosaceae, Magnoliopsida) for Bioindication of the Natural Environment Status in the Area of the Eastern Ural Radioactive Trace. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2019, no. 1, pp. 90–105 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2019-1-90-105>

An attempt was made to assess the status of the natural environment in the area of the Eastern Ural radioactive trace (EURT) by bioindication methods. With examples of *Potentilla fruticosa* plants grown at three sites in the radionuclide ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs contamination gradient, in the course of our long-term (2005–2013) survey, it was established that as the irradiation level raised, the leaf size and the leafstalk length decreased, the index of the fluctuating asymmetry of the terminal lobe leaf of increased regardless of the period of vegetation and the year of observation. The morphological characteristics (the length, width and area of the leaf blade and those of the leaf terminal lobe, and the leafstalk length) were measured using digital image analysis, *MapInfo* software. Statistically significant differences in the morphological characteristics of the leaf were noted only in the most contaminated samples in comparison to the reference one. As the radiation load raised, the inter-annual variability of the leafstalk length increased from low to high level regardless of the vegetation period. When estimating the fluctuating asymmetry of the final leaf fraction, statistically significant differences were found for the plants from the samples exposed to radiation in comparison to the control one. Using the fluctuating asymmetry index, the environment quality was characterized as critical for the EURT impact areas while this index was normal for the background.

Key words: bioindication, radionuclide contamination, Eastern Ural radioactive trace, *Potentilla fruticosa*, morphological leaf characteristics, fluctuating asymmetry.

DOI: <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2019-1-90-105>

Acknowledgments: The work was supported as part of the state assignment of the Central Siberian Botanical Garden of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (SB RAS) “Estimation of the morphogenetic potential of plant populations of North Asia using experimental methods”. While preparing the publication, materials of the bioresource research collection of the

Central Siberian Botanical Garden of SB RAS representing Unique Scientific Facilities (USF) “Collections of living plants indoors and outdoors” (No. USU 44053) were used.

REFERENCES

Arhivy pogody po gorodam Rossii [Archives of weather in cities of Russia]. Available at: <http://www.atlasyakutia.ru/weather> (accessed 1 March 2018) (in Russian).

Gorshkova T. A. Evaluation of capability of use white clover *Trifolium repens* L. for bioindication of anthropogenic disorders of environment. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2012, vol. 14, no. 1, pp. 69–73 (in Russian).

Gorshkova T. A., Oudalova A. A., Geras'kin S. A., Kiselev S. M., Ahromeev S. V. Bioindication of the Environment in the Vicinity of the Far-Eastern Center for Radioactive Waste Treatment. *Izvestiya vuzov, Yadernaya Energetika*, 2014, no. 4, pp. 130–139 (in Russian).

Zakharov V. M. Biodiversity Condition Estimation and Health of Environment. *Povolzhskiy J. of Ecology*, 2014, no. 1, pp. 50 – 59 (in Russian).

Zakharov V. M., Chubinishvili A. T., Dmitriev S. G., Baranov A. S., Borisov V. I., Valetskii A. V., Krysanov E.Yu., Kryazheva N.G., Pronin A.V., Chistyakova E. K. *Zdorov'e sredy: praktika otsenki* [Health of Environment: Practice of Assessment]. Moscow, Tsentr ekologicheskoi politiki Rossii Publ., 2000. 320 p. (in Russian).

Kuznetsov M. N., Golyshkin L. V. Comparison Characteristic of Features of Fluctuating Asymmetry in Apple Leaves in Different Ecological Conditions. *Agricultural Biology*, 2008, no. 3, pp. 72–77 (in Russian).

Lugovskaya A. Yu., Khramova E. P., Tarasov O. V., Krylova E. I. Assessment of Morphological Characteristics Changes of *Potentilla fruticosa* in Terms of Radiation Exposure. *J. of Radiation Safety Issues*, 2015, no. 4, pp. 66–72 (in Russian).

Lugovskaya A. Yu., Khramova E. P., Chankina O. V. Effect of Transport and Industrial Pollution on Morphometric Parameters and Element Composition of *Potentilla fruticosa*. *Contemporary Problems of Ecology*, 2018, vol. 11, no. 1, pp. 89–98.

Mamaev S. A. Osnovnye principy metodiki issledovaniya vnutrividovoy izmenchivosti drevesnykh rastenij [The basic principles of the study of intraspecific variability of woody plants]. *Trudy Ural'skogo nauchnogo centra AN SSSR*, 1975, iss. 94, pp. 9–14 (in Russian).

Martyushov V. Z., Smirnov E. G., Tarasov O. V., Romanov G. N., Spirin D. A. Vostochno-Ural'skiy Gosudarstvennyy zapovednik [East Ural State Reserve]. *J. of Radiation Safety Issues*, 1997, no. 3, pp. 42–47 (in Russian).

Menning W. J., Feder W. A. *Biomonitoring Air Pollutants With Plants*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1985. 141 p. (in Russian).

Otchet po ekologicheskoy bezopasnosti FGUP “Proizvodstvennoe obedinenie “Mayak” za 2013 god [Environmental Safety Report of Federal State Unitary Enterprise Mayak PA for 2013]. Ozersk, Chelyabinsk, Avto Graf Publ., 2014. 44 p. (in Russian).

Otchet po ekologicheskoy bezopasnosti FGUP “PO “Mayak” za 2016 god [Environmental Safety Report of FSUE Mayak Production Association for 2016]. Ozersk, FGUP “PO “Mayak” Publ., 2017. 50 p. (in Russian).

Pozolotina V. N. *Otdalennye posledstviya dejstviya radiatsii na rasteniya* [Long-term Effects of Radiation on Plants]. Ekaterinburg, Akademkniga Publ., 2003. 244 p. (in Russian).

Pozolotina V. N., Ul'yanova E. V., Sarapul'cev I. E. *Bioindikatsiya radionuklidnogo zagryazneniya ekosistem s pomoshch'yu rastenij* [Radionuclide Bioindication Plant Pollution]. In: *Ural. Radiatsiya. Reabilitatsiya* [Ural. Radiation. Rehabilitation.]. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 2004, pp. 183–200 (in Russian).

Pozolotina V. N., Molchanova I. V., Karavaeva E. N., Mihajlovskaja L. N., Antonova E. V. *Sovremennoe sostojanie nazemnyh jekosistem Vostochno-Ural'skogo radioaktivnogo sleda: urovni zagryazneniya, biologicheskie jeffekty* [The Current State of Terrestrial Ecosystems of the Eastern Ural Radioactive Trace: Pollution Levels, Biological Effects]. Ekaterinburg, Goshchitskii Publ., 2008. 204 p. (in Russian).

Pozolotina V. N., Antonova E. V., Karimullina E. M., Kharitonova O. V., Pustovalova L. A. The Impacts of Permanent Irradiation on the Flora of the Eastern Ural Radioactive Trace. *Radiation biology. Radioecology*, 2009, vol. 49, no. 1, pp. 97–106 (in Russian).

Smirnov E. G. Prirodnye usloviya i rastitel'nost' Vostochno-Ural'skogo radioaktivnogo sleda [Natural Conditions and Vegetation of the East Ural Radioactive Trace]. In: *Ekologicheskie posledstviya radioaktivnogo zagryazneniya na YUzhnom Urale* [Ecological Consequences of Radioactive Contamination in the South Urals]. Moscow, Nauka Publ., 1993, pp. 79–84 (in Russian).

Stroncij-90. Metodika vypolneniya izmerenij udel'noj (obemnoj) aktivnosti v probah okruzhayushchej sredy. MP-0401-195-06 CZL. Instrukciya predpriyatiya FGUP "PO" Mayak". Ozersk, 2006. 11 p. (in Russian).

Trubina L. K. *Stereomodeli v izuchenii biologicheskikh ob'ektov* [The Stereomodel in the Study of Biological Objects]. Novosibirsk, Siberian State Academy of Geodesy Publ., 2006. 136 p. (in Russian).

Trubina L. K., Khranova E. P., Lugovskaya A. Yu. Computer Analysis of Lamina Images of *Potentilla fruticosa* for Bioindication of Urbanized Territories. *Vestnik of the Siberian State University of Geosystems and Technologies*, 2016, iss. 4, pp. 263–273 (in Russian).

Fedorova A. I. Changes of Pollution of the Urban Environment. *Izvestiya RAN, Ser. Geograficheskaya*, 2002, no. 1, pp. 72–80 (in Russian).

Khranova E. P. *Rod Pentaphylloides Hill (Rosaceae) Aziatskoj Rossii (fenol'nye soedineniya, ehlementnyj sostav v prirode i kul'ture, khemotaksonomiya)* [The Genus *Pentaphylloides* Hill (Rosaceae) of Asiatic Russia (Phenolic Compounds, Elemental Composition in Nature and Culture, Chemotaxonomy)]. Diss. Dr. Sci. (Biol.). Novosibirsk, 2016. 437 p. (in Russian).

Khranova E. P., Vysochina G. I. Flavonoids Composition and Content in *Potentilla fruticosa* (Rosaceae) Under the Technogenic Pollution in Novosibirsk. *Rastitelnye Resursy*, 2010, vol. 46, iss. 2, pp. 74–86 (in Russian).

Cezij-137. Metodika vypolneniya izmerenij aktivnosti i opredelenie udel'noj (obemnoj) aktivnosti na scintillyacionnyh gamma-spektrometrah SGS-200, SGS-100, GSAS. MP-0401-188-06 CZL. Instrukciya predpriyatiya FGUP "PO" Mayak". Ozersk, 2006. 20 p. (in Russian).

Chankina O. V., Khranova E. P., Koutsenogii K. P., Krylova E. I., Syeva S. Ya., Tarasov O. V. SRXRF for investigation of plants in conditions of radioactive contamination. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Sec. A*, 2007, vol. 575, no. 1–2, pp. 210–213.

Geras'kin S. A., Evseeva T. I., Oudalova A. A. Plants as a tool for the environmental health assessment. *Encyclopedia of Environmental Health*. Burlington, Elsevier, 2011, vol. 4, pp. 571–579.

Khranova E. P., Chankina O. V., Rakshun Ya. V., Sorokoletov D. S. Variability of the element composition of *Pentaphylloides fruticosa* vegetable samples during long-term storage. *Physics Procedia*, 2016, vol. 84, pp. 256–262.

Pryakhin E. A., Mokrov Yu. G., Tryapitsina G. A., Ivanov I. A., Osipov D. I., Atamanyuk N. I., Deryabina L. V., Shaposhnikova I. A., Shishkina E. A., Obvintseva N. A., Egoreichenkov E. A., Styazhkina E. V., Osipova O. F., Mogilnikova N. I., Andreev S. S., Tarasov O. V., Geras'kin S. A., Trapeznikov A. V., Akleyev A. V. Characterization of biocenoses in the storage reservoirs of liquid radioactive wastes of Mayak PA. Initial descriptive report. *J. of Environmental Radioactivity*, 2016, vol. 151, pp. 449–460.