

ОЦЕНКА ГЕНОТОКСИЧНОСТИ ПОЧВ ПРИРОДНЫХ ЛАНДШАФТОВ АРМЕНИИ С УЧЕТОМ СОДЕРЖАНИЯ В НИХ РАДИОНУКЛИДОВ В СИСТЕМЕ ПОЧВА-РАСТЕНИЕ

Р.Э. Авалян, А.Л. Атоянц, Э.А. Агаджанян, Р.М. Арутюнян
Ереванский госуниверситет, НИИ «Биология», Армения, Ереван
e-mail: re_avalan@mail.ru

Проведено биотестирование уровня генотоксичности и кластогенности почвенных образцов с территории Арагацского плато и Араратской равнины с применением тест-системы волосков тычиночных нитей (Трад-ВТН) и микроядерного теста (Трад-МЯ) модельного тест-объекта традесканции (клон 02) в системе почва-растение. Показано максимальное достоверное повышение уровня генетических эффектов в почвенном варианте Rg-At-17 с низким содержанием ^{137}Cs . Проведен корреляционный анализ зависимости генетических эффектов от удельной активности радионуклидов в изученных почвенных образцах.

Ключевые слова: биотестирование, модельный тест-объект, радионуклиды, загрязнение почвы, система почва-растение.

Введение

Изучение влияния антропогенных и техногенных факторов на природные экосистемы в настоящее время является особенно актуальным. Длительное поступление в них как естественных, так и искусственных радионуклидов может привести к формированию зон с повышенным радиационным фоном и, как следствие, к нежелательным экологическим рискам [1, 2].

Территория Армянского нагорья и современной Армении играет ключевую роль в процессах миграции и распределения долгоживущих радионуклидов на Южном Кавказе благодаря своему географическому положению и особенностям ландшафта. В Республике Армения исследования техногенных радионуклидов в окружающей среде актуальны по ряду причин: географическому положению, обуславливающему подверженность глобальным радиоактивным выпадениям высокогорных территорий, наличию атомно-энергетического комплекса и др. В связи с этим весьма важным является изучение эколого-генетических эффектов радионуклидного загрязнения природных территорий в целях выяснения уровня существующих техногенных рисков.

За последнее время на территории Армении усилиями ученых Центра эколого-ноосферных исследований проводится радиоэкологический мониторинг живых систем и почвы с территорий Арагацского плато, загрязненных долгоживущими радионуклидами [3-7]. В целях биоиндикации радиоактивных загрязнений, территории, содержащие долгоживущие природные и техногенные радионуклиды, требуют проведения не только радиоэкологического мониторинга, но и биотестирования с привлечением чувствительных тест-систем. Среди большого количества биосистем для обнаружения генетических эффектов ксенобиотиков окружающей среды, в том числе и при радиационно-химическом загрязнении, растительные тест-системы являются наиболее чувствительными.

По данным литературы показано использование в качестве биоиндикаторной системы обнаружения действия ксенобиотиков среды и радиационного фона растений гетерозиготного клона 02 традесканции, обладающего высокой чувствительностью к индукции мутаций даже при низких уровнях мутагенов и радиации. В целях биоиндикации система волосков тычиночных нитей (ВТН) клона 02 традесканции первоначально

применялась как чувствительная радиобиологическая тест-система и, в связи с этим, было проведено большое количество работ по изучению действия различных физических мутагенов (в том числе и ионизирующих излучений) на традесканцию [8-15].

Для скрининга ксенобиотиков окружающей среды клон 02 традесканции является удобной тест-системой и обладает рядом преимуществ: высокой чувствительностью к действию ксенобиотиков, пригодностью для обнаружения как газообразных, так и водорастворимых мутагенов, возможностью проводить исследования в условиях *in situ*, нетребовательностью растений – при проведении вегетационного эксперимента легко выращиваются в тепличных условиях и не требуют стерильных условий, а также – возможностью одновременного изучения мутаций как в соматических, так и в спорогенных клетках на одних и тех же растениях, что является важной особенностью данной тест-системы (рис. 1).

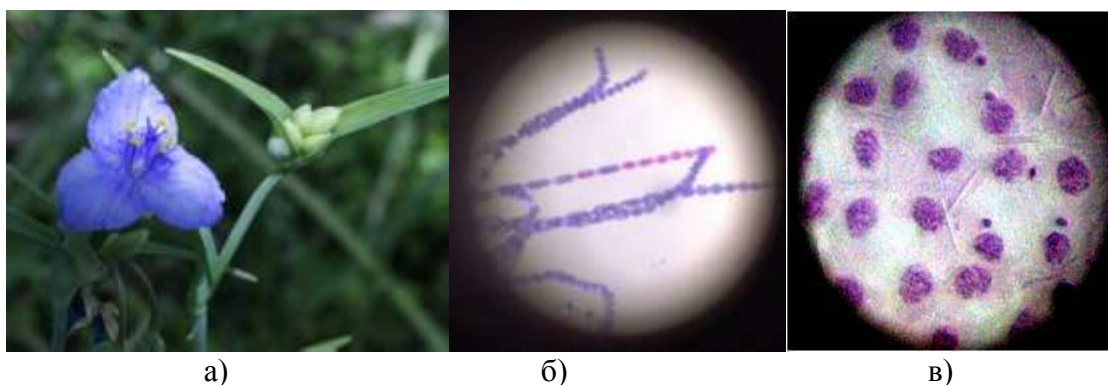


Рисунок 1 – Общий вид клона 02 традесканции (а) и генетические параметры (б – точковые мутации (розовые); в – микроядра в тетрадах микроспор)

В настоящее время традесканция широко используется при биотестировании уровня генотоксичности воздуха, воды и почвы, а также – любых химических мутагенов и радиоактивных выбросов от АЭС. Наша исследовательская группа имеет многолетний опыт (1986-2021 гг.) применения этой тест-системы для оценки действия антропогенных загрязнителей, водной и почвенной среды, а также почвы в регионе Армянской АЭС [16-17].

Целью настоящей работы явилось биотестирование уровня мутагенности почв территории Арагацского плато с учетом содержания в них долгоживущих природных (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K) и техногенного (^{137}Cs) радионуклидов с использованием тест-системы волосков тычиночных нитей (Трад-ВТН), а также – микроядерного теста (Трад-МЯ) модельного тест-объекта традесканции (клон 02) в системе почва-растение.

Материалы и методы

В качестве объекта наших исследований использовали растения модельного тест-объекта традесканции (клон 02). Для определения уровня генотоксичности исследуемых почвенных образцов применяли тест-систему волосков тычиночных нитей (тест Трад-ВТН), где в качестве маркерных тест-критериев изучали частоту появления рецессивных мутаций (розовые мутационные события – РМС), генетически неопределенных (бесцветные – БМС) в волосках тычиночных нитей цветка данного клона, а также – карликовых (невыживших – НВ) и разветвленных волосков (РВ). Кроме того фиксировались различные морфологические нарушения цветка (уменьшение числа тычинок, лепестков венчика, различные фасциации цветка).

При проведении вегетационного эксперимента в системе почва-растение растения традесканции выращивались в вазонах с исследуемыми образцами почв в тепличных условиях. На каждый вариант было проанализировано по 10-17 тыс. ВТН. Культивирование

растений традесканции, учет мутационных событий (МС) и морфологических нарушений цветка проводили в среднем на 1000 волосков по общепринятой международной методике [18].

Применение теста Трад-МЯ позволяет фиксировать появление хромосомных aberrаций (ацентрические фрагменты или отстающие хромосомы), которые регистрируются в виде микроядер (МЯ) на стадии тетрад при нарушении процесса микроспорогенеза под воздействием различных техногенных факторов.

При тестировании кластогенных эффектов с применением теста Трад-МЯ цветочные бутоны на ранней стадии развития фиксировали в ацеталкоголе (3 : 1). Готовились временные ацетокарминовые препараты по стандартной методике [19]. Для каждого варианта анализировалось по 3000 тетрад. При тестировании с применением данного теста учитывались два маркерных тест-критерия: процент образования микроядер в тетрадах и процент тетрад с микроядрами. Оба используемых биотеста (Трад-ВТН и Трад-МЯ) входят в Международную программу по растительным тестам (IPRV) под эгидой ООН (ЮНЕП) по окружающей среде [20].

В качестве материала для исследования были использованы 12 почвенных образцов с территории южного склона Арагацкого массива и северной части прилегающей к нему Арагатской долины, отличающиеся разным уровнем содержания радионуклидов (рис. 2). Почвенные образцы и данные о загрязнении почв (удельная активность) природными – ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K и техногенным (^{137}Cs) радионуклидами были предоставлены Центром эколого-ноосферных исследований НАН РА. В качестве условно фонового (контроля) образца использовали почвенную пробу из теплицы ЕГУ. Все почвенные пробы были соответственно маркированы.

Образцы верхнего горизонта (0-10 см) природных почв отбирались по высоте шагом в 200 м от 900 до 3200 м над уровнем моря. Почвенные образцы анализировались на низкофоновой гамма-спектрометрической установке с коаксиальным HPGe детектором, программным обеспечением Genie 2000 и LabSOCS (Canberra).

Таблица 1 – Удельная активность радионуклидов (Бк/кг) и тип почвы изученных образцов

Образец почвы	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	^{137}Cs	Высота над ур.м. (м)	Тип почвы
Rg-At-17	36,65	30,30	879,00	13,14	1000	Лугово-сероземная полупустынная
Rg-At-18	40,81	47,80	830,70	60,27	1200	Горно-луговая коричневая
Rg-At-19	33,87	37,30	800,00	31,59	1400	Горно-луговая коричневая
Rg-At-20	38,84	43,80	908,80	119,16	1600	Горно-луговая черноземовидная
Rg-At-21	27,59	39,70	706,50	40,62	1800	Горно-луговая черноземовидная
Rg-At-22	44,75	49,60	950,00	120,38	2000	Горно-луговая черноземовидная
Rg-At-23	26,43	41,50	634,00	77,65	2200	Горно-луговая степная
Rg-At-24	26,13	38,00	673,50	80,87	2400	Горно-луговая
Rg-At-25	29,27	51,40	650,70	29,80	2600	Горно-луговая
Rg-At-26	34,97	41,60	673,00	74,26	2800	Горно-луговая дерновая
Rg-At-27	45,11	51,40	872,60	129,97	3000	Горно-луговая дерновая
Rg-At-28	24,46	36,80	792,00	350,00	3200	Горно-луговая дерновая
Контроль	20,1	30,1	36,7	8,0	900	Горно-степная каштановая

На основании проведенных геохимических исследований удельная активность природных радионуклидов во всех почвенных образцах изменялась в диапазоне: ^{226}Ra 24,5-45,1 Бк/кг; ^{232}Th 30,3-51,4 Бк/кг; ^{40}K 634-950 Бк/кг; техногенного – ^{137}Cs 13,1-350 Бк/кг. В условно фоновой почвенной пробе из теплицы ЕГУ также определялось содержание исследуемых радионуклидов, удельная активность которых составила по ^{226}Ra – 20,1 Бк/кг; по ^{232}Th – 30,1 Бк/кг; по ^{40}K – 36,7 Бк/кг; по ^{137}Cs – 8,0 Бк/кг (табл. 1). Удельная

поверхностная активность ^{137}Cs в почве по высоте колебалась в пределах 13,1-350,0 Бк/кг в зависимости от увеличения абсолютной высоты. Характер зонального распределения активности естественных радионуклидов (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K) не наблюдался. В таблице 1 также представлены характерные типы почвы исследуемых почвенных образцов.

Для выявления интенсивности поглощения радионуклидов традесканции из почвы был проведен зольный анализ фитомассы растений и рассчитан коэффициент биологического поглощения (C), который отражает соотношение между содержанием изучаемого элемента (в данном случае радионуклидов) в почве и в наземной фитомассе растений [21].

Коэффициент биологического поглощения вычисляли по формуле: $C = C_p / C_n$, где C_p – содержание радионуклида в фитомассе (сухом веществе) растения; C_n – содержание (удельная активность) радионуклида в почвенном образце.

Все полученные результаты статистически обрабатывали с использованием компьютерной программы *Statgraphics Plus 2.1*.

Территорией исследования являлся южный склон Арагацкого массива и северная часть прилегающей Арагатской долины (рис. 2). Горный массив Арагац представляет собой щитообразную возвышенность, покрытую вулканическими лавами. Гора имеет 4 вершины. Самая высокая из них – северная (4090 м над ур. моря), за ней следуют северо-западная (4080 м), восточная (3916 м) и южная (3879 м), которая является самой низкой и представляет большой интерес для исследований, т.к. легкодоступна и граничит с северной территорией Арагатской равнины.



Рисунок 2 – Массив Арагац и южный склон Арагацкого массива

На территории Армении характерными естественными ландшафтами являются: полупустыни, сухие степи, умеренно влажные леса и альпийские луга. Для Арагатской равнины характерны полупустынные и низменные солончаково-луговые ландшафты. В пределах Арагацкого массива по мере увеличения высоты чаще встречаются горно-степные, горно-лесные и, на вершине Арагаца, – субальпийские и альпийские ландшафты. В геологической основе на Арагацком горном массиве преобладают базальты, андезиты, туф и туфобрекчия. По мере уменьшения высоты тип почвы регулярно меняется от горно-лугового до степного, затем – коричневого, а в пределах Арагатской долины – полупустынного коричневого. На восточной и в районе выхода коренных пород юго-восточных склонах наблюдается каменистый почвенный покров. Типы местной растительности также меняются по мере перепада высот: от луговой и степной луговой (альпийская и субальпийская луговая растительность: разнотравье и злаковые) до выраженной степной (с преобладанием злаков) и полупустынных (эффемерная растительность). Среднее годовое количество осадков варьирует от 400 мм в пределах Арагатской долины до 1000 мм на высоте 3200 м. Склоны массива Арагац довольно густонаселены. Находящиеся здесь субальпийские и альпийские луга используются местным населением как сезонные пастбища. Здесь также находятся

национальные исторические памятники Армении, зоны отдыха и множество туристических маршрутов, которые проходят через данный регион. По этой причине данное исследование является актуальным для республики в целях определения степени потенциальных техногенных рисков для населения.

Результаты и обсуждение

На основании данных биотеста Трад-ВТН по учету соматических мутаций у традесканции в целях определения уровня генотоксичности исследуемых почвенных образцов было показано достоверное повышение уровня розовых мутационных событий (РМС) в почвенных образцах Rg-At-17, Rg-At-18, Rg-At-19, Rg-At-22, Rg-At-23, Rg-At-26, и Rg-At-27, превосходящее значение условно фоновой частоты в 3-5 раз в зависимости от пробного варианта ($p < 0,001$). Максимальный уровень РМС наблюдался в почвенной пробе Rg-At-17 ($p < 0,001$), где ее значение превысило уровень фона в 5 раз (рис. 3а).

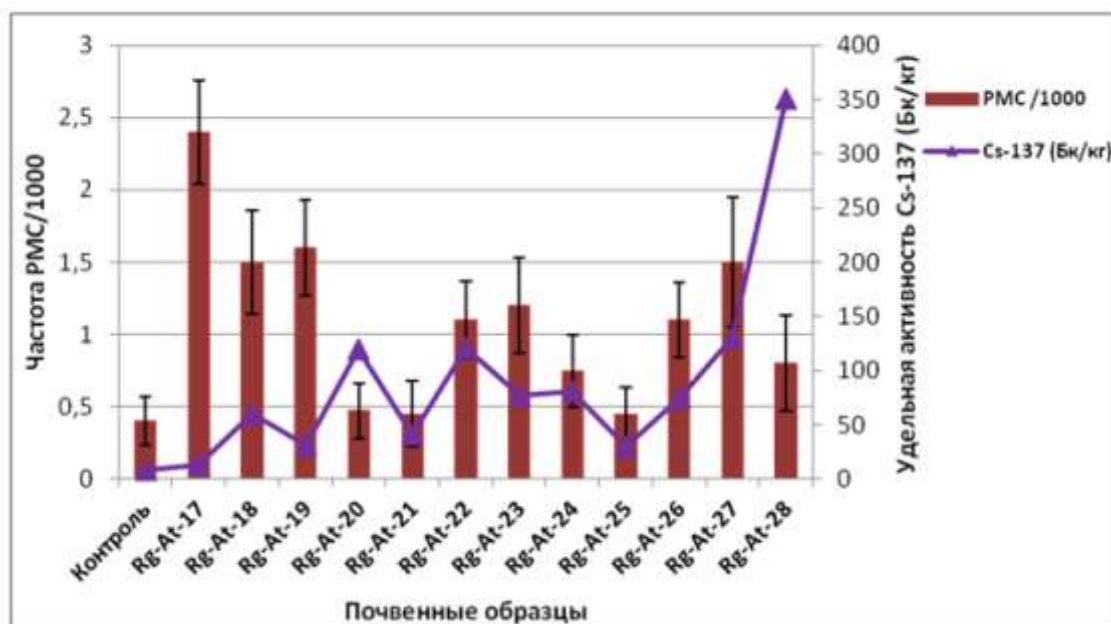
Определение уровня БМС в соматических клетках традесканции показало, что повышенная частота появления данных МС отмечалась в почвенных вариантах Rg-At-17, Rg-At-20, Rg-At-21, Rg-At-23 и Rg-At-26 и достоверно превышала условно фоновое значение в 1,5-2,5 раза в зависимости от почвенной пробы ($p < 0,01$). Наибольшая частота БМС наблюдалась в варианте Rg-At-23, где значение данного показателя превысило уровень фона в 2,5 раза ($p < 0,01$).

При проведении теста Трад-ВТН, помимо основных мутационных событий (РМС и БМС), затрагивающих соматические клетки традесканции, также отмечались морфологические изменения в волосках тычиночных нитей, среди которых часто встречались карликовые (невыжившие – НВ) волоски. Появление данного типа морфологических нарушений в ВТН традесканции рассматривается как дополнительный морфологический тест на выживаемость клеток в ВТН традесканции. Высокий уровень НВ был зафиксирован почти во всех образцах (кроме вариантов Rg-At-24 и Rg-At-28). Наибольшая частота данных нарушений отмечалась в вариантах Rg-At-17, Rg-At-19, Rg-At-21 и Rg-At-27, где значения НВ были достоверно выше фона в 2,5-3 раза, с максимальным уровнем в образце Rg-At-27 ($p < 0,01$). Увеличение данного типа нарушений может свидетельствовать о наличии в почвенных образцах токсичных компонентов, обладающих повышенной тератогенной активностью, приводящей к снижению выживаемости клеток ВТН традесканции.

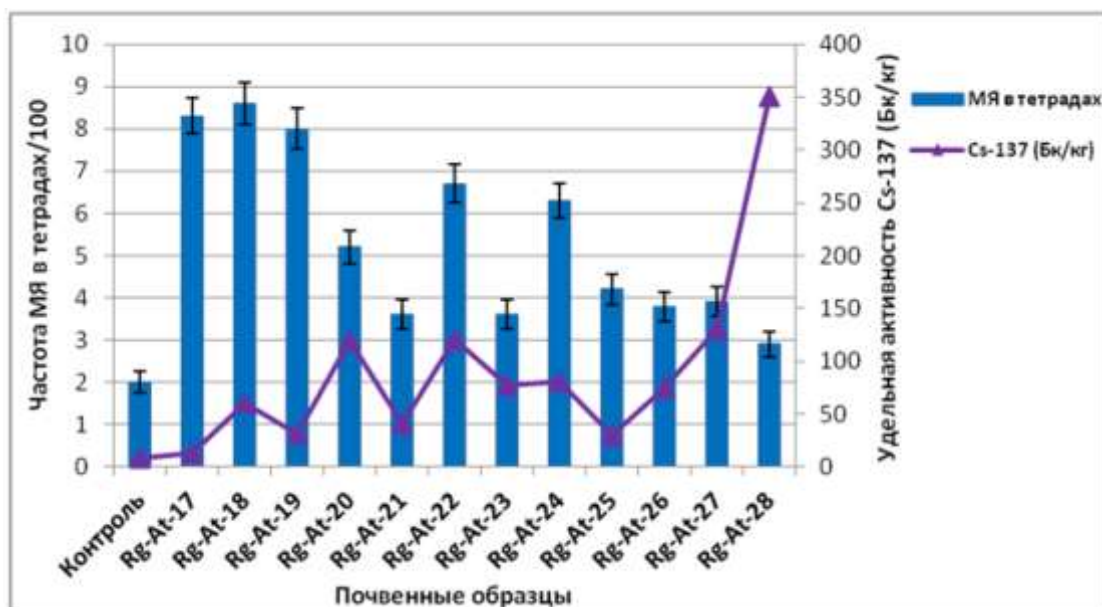
При определении уровня кластогенности исследуемых почвенных образцов с использованием микроядерного теста (Трад-МЯ) было показано достоверное повышение уровня обоих маркерных тест-критериев (МЯ в тетрадах и тетрады с МЯ) во всех почвенных образцах в 1,5-4 раза в зависимости от почвенной пробы по сравнению с условно фоновым уровнем. Максимальная частота МЯ наблюдалась в образце Rg-At-17 и превысила уровень фона в 4 раза ($p < 0,001$). Минимальный уровень обоих тест-критериев микроядерного теста был отмечен в варианте почвенной пробы – Rg-At-28, где значения изученных параметров были почти на уровне контроля (рис. 3б).

В данной работе характерным является тот факт, что на фоне общего повышения всех изученных параметров высокий уровень генетических эффектов (особенно, частоты РМС и процента МЯ) наблюдался в почвенном образце Rg-At-17 с низким содержанием цезия (13,1 Бк/кг), что согласуется с выводами, сделанными ранее об индукции высокой частоты мутаций малыми дозами цезия в модельных экспериментах на традесканции, при использовании твердых и жидких источников радионуклида [22]. Кроме того, по данным микроядерного теста, отмеченная минимальная частота встречаемости МЯ в тетрадах и тетрад с МЯ наблюдалась в варианте Rg-At-28 (рис. 3б) с наибольшей удельной активностью радиоцезия (350,0 Бк/кг). Рассматривая данную закономерность, нужно отметить, что при поступлении радионуклидов в растения значительная роль в этих процессах принадлежит

барьерно-регулирующей функции корневой системы, которая контролирует и регулирует поток ионов в растения, в том числе и не позволяет проникать ^{137}Cs в верхние репродуктивные части растения. Кроме того, известно, что на процесс накопления и перемещение радиоцезия из почвы в растение оказывают влияние тип и особенности почвы, а также кислотность среды.



(а)



(б)

Рисунок 3 – Частота точковых мутаций (а), процента микроядер (б) и удельная активность радиоцезия

В связи с тем, что по природным радионуклидам не было выявлено особых закономерностей в отношении индукции мутаций у традесканции, то в данной работе рассматриваются особенности учета только техногенного радионуклида – ^{137}Cs . В Армении предполагается наличие двух источников ^{137}Cs в сухих атмосферных выпадениях: глобальное выпадение от испытаний ядерного оружия, что остается в настоящее время значительным источником искусственных радионуклидов в окружающей среде, а также, – появление следов техногенных радионуклидов в результате аварии на Чернобыльской АЭС,

после которой некоторые радионуклиды были идентифицированы, благодаря благоприятным погодным условиям для переноса и выпадения их с осадками, в различных экологических компартментах сложного ландшафтного комплекса Армении, особенно, в высокогорных районах. На территории Араратской равнины в 40 км от массива Арагац находится действующая Армянская атомная электростанция (АЭС), а также хранилище средне- и низкоактивных ядерных отходов. На основании многолетнего мониторинга влияния выбросов АЭС на окружающую среду, ее вклад оказался ниже, чем земной естественной радиации и мировых глобальных выбросов. По итогам радиоэкологических исследований Арагацкого горного массива показано, что годовая эффективная доза от радионуклидов (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K и ^{137}Cs) хотя и несколько превышает среднюю глобальную величину, однако индекс опасности внешнего облучения является незначительным [3-7].

При радиоэкологическом мониторинге территории исследования наблюдалось близкое к экспоненциальному неравномерное распределение радиоцезия. Как известно, в условиях сильно расчлененного горного рельефа имеет место накопление и переотложение радиоцезия в понижениях рельефа, на склонах, на дне ущелий, у подножья гор. Все это, наряду с неравномерностью выпадения осадков, может приводить к изменению дозовых нагрузок от ^{137}Cs на различных элементах ландшафта.

В данной работе также была определена корреляционная зависимость частоты маркерных критериев обоих тестов традесканции от содержания природных и техногенного радионуклидов в исследуемых почвенных образцах. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Коэффициент корреляции (r) между содержанием радионуклидов и генетическими параметрами

Радионуклид (Бк/кг)	Трад-ВТН тест			Трад-МЯ тест	
	РМС (рецессивные мутации)	БМС (бесцветные мутации)	НВ (невыжившие волоски)	МЯ в тетрадах	Тетрады с МЯ
Ra-226	0,42	-0,05	0,58	0,59	0,41
Th-232	-0,34	-0,26	0,24	-0,02	-0,19
K-40	0,34	0,05	0,24	0,59	0,44
Cs-137	-0,26	-0,06	-0,57	-0,36	-0,44

Исходя из данных таблицы, средняя положительная корреляция наблюдалась между изученными генетическими параметрами (РМС и МЯ) и удельной активностью радионуклидов ^{40}K и ^{226}Ra . Калий является одним из основных естественных радионуклидов в почвах и растениях и, по-видимому, обладает большей доступностью растениям, т.к. участвует в обменных процессах. Кроме того, среди изученных радионуклидов ^{40}K отличался наибольшим содержанием в почвенных образцах. Радий присутствует в природе в рассеянном состоянии и в почвах обладает наибольшей миграционной способностью, что, возможно, способствует его влиянию на биоту, в том числе, и на растения традесканции.

Известно, что наземные органы (фитомасса) растений с различной интенсивностью аккумулируют микроэлементы и тяжелые металлы из почвы. Для выявления интенсивности поглощения радионуклидов растением традесканции из почвы был проведен зольный анализ фитомассы растений и рассчитан коэффициент биологического поглощения (С), как отношение концентрации элемента в растении к содержанию элемента в почве. Как известно, при $C > 1$ химические компоненты накапливаются (аккумулируются) в растении, а при $C < 1$ – только захватываются.

По результатам зольного анализа в фитомассе растения традесканции, кроме ^{40}K , было обнаружено следовое присутствие радионуклидов (^{262}Ra , ^{232}Th , ^{137}Cs) ниже минимально допустимого уровня ($< \text{MDA}$).

Анализ полученных данных по определению коэффициента поглощения (С) радионуклида ^{40}K в фитомассе традесканции показал, что значение данного показателя находилось в пределах 0,001-0,003 в зависимости от почвенного образца и было достоверно ниже единицы ($p < 0,05$), что свидетельствует о том, что растения традесканции только захватывают, но не аккумулируют ионы ^{40}K . Наибольшее значение С ^{40}K по сравнению с другими вариантами отмечалось в образцах Rg-At-24 и Rg-At-25 (рис. 4).

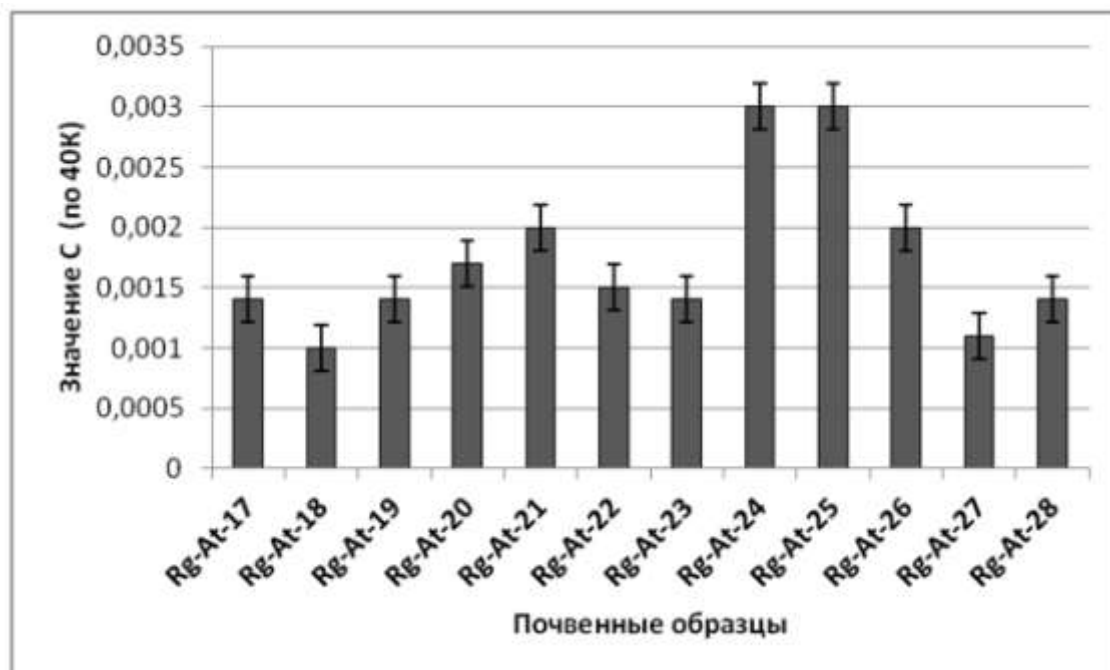


Рисунок 4 – Коэффициент биологического поглощения по ^{40}K

Данные зольного анализа подтверждают тот факт, что ^{40}K , как и его стабильные изотопы, необходимы растениям (в данном случае традесканции) для их нормального развития и метаболизма.

В данной работе представлены результаты суммарной оценки (аддитивный токсический эффект) степени генотоксичности и кластогенности исследуемых почвенных образцов с учетом только содержания радионуклидов, без данных основных геохимических показателей почвы (геохимический состав, тяжелые металлы (ТМ), органическое вещество, рН, гранулометрический состав, водно-физические свойства и др.). Возможно, в изученных почвенных образцах присутствуют и другие токсичные факторы/компоненты (тяжелые металлы и др.) или комбинации факторов, вызывающие повышенный уровень их генотоксичности. Для этого нужны дополнительные геохимические исследования, что планируется осуществить в дальнейшем.

Выводы

Впервые в Армении проведен радиационно-генетический мониторинг образцов почвы с территории Арагацкого плато и Араратской равнины на основе местного фона и базовой активности естественных природных и техногенного радионуклидов в системе почва-растение.

Представленные в работе результаты вегетационного эксперимента по изучению генотоксичности и кластогенности изученных почвенных образцов с применением биотестов клона 02 традесканции показали увеличение как частоты РМС (рецессивных мутаций), так и тест-критериев микроядерного теста (МЯ в тетрадах и тетрады с МЯ) во всех изученных

вариантах по сравнению с условно фоновым уровнем в зависимости от почвенной пробы. Наибольший уровень генетических эффектов отмечался в почвенном варианте Rg-At-17, отличающемся низкой удельной активностью радиоцезия. По результатам зольного анализа выявлено, что растения традесканции только захватывают, но не аккумулируют ионы ^{40}K .

Для более корректной оценки полученных результатов необходимо проведение детальных комплексных исследований по выявлению сопряженности генотоксических эффектов и процессов аккумуляции-трансформации токсичных компонентов (радионуклидов, ТМ и др.) в системе почва-растение.

На основании проведенных нами исследований при изучении экологического потенциала системы почва-растение с применением традесканции показана целесообразность использования биотестов Трад-ВТН и Трад-МЯ в целях биотестирования для адекватной оценки степени генотоксичности почв природных ландшафтов с учетом комплексного содержания в них радионуклидов.

Благодарности

Работа выполнена совместно с сотрудниками лаборатории радиоэкологии Центра эколого-ноосферных исследований НАН РА. Особую благодарность выражаем руководителю лаборатории, к.б.н. Беляевой Ольге за предоставленные материалы и ценные указания.

Список литературы

1. Водяницкий Ю.Н. Экотоксикологическая оценка опасности тяжелых металлов и металлоидов в почве // *Агрохимия*. 2012. № 2. С. 75-84.
2. Рихванов Л.П. Радиоактивные элементы в окружающей среде и проблемы радиоэкологии. Томск: STT, 2009. 430 с.
3. Pyuskyulyan K., Atoyan V., Arakelyan V., Saghatelyan A. The net effect of the Armenian nuclear power plant on the environment and population compared to the background from global radioactive fallout. Dordrecht: Springer, 2008. pp. 125-131.
4. Pyuskyulyan K., Lamont S., Atoyan V., Belyaeva O., Movsisyan N., Saghatelyan A. Altitude-dependent distribution of ^{137}Cs in the environment: a case study of Aragats massif, Armenia. *Acta Geochimica*. 2020. vol. 39(1). pp. 121-132. DOI: 10.1007/s11631-019-00334-0.
5. Беляева О.А., Мовсисян Н.Э., Пюскульян К.И., Сагателян А.К. Распределение ^{137}Cs в почвах и сухих атмосферных выпадениях Арагацкого массива // *Известия НАН РА. Науки о Земле*. 2019. Т. 72. № 1. С. 57-66.
6. Belyaeva O.A., Pyuskyulyan K. Assessing environmental and human health effects of radioactive emissions and discharges from the Armenian NPP. Issues of environmental security. Materials of international scientific conference of CSTO member states. CENS NAS RA. Yerevan, 2016. pp. 49-56.
7. Авакян Р.М., Арутюнян Г.Г., Атоян В.А., Овсепян А.В., Пюскульян К.И., Чубарян Э.В. Исследование пространственного распределения ^{137}Cs в почве в районе размещения Армянской АЭС // *Известия НАН Армении. Физика*. 2009. Т. 44. № 1. С. 54-63.
8. Ichikawa S. Tradescantia stamen-hair system as an excellent botanical tester of mutagenicity: Its responses to ionizing radiations and chemical mutagens, and some synergistic effects found. *Mutation Research*. 1992. vol. 270. pp. 3-22.
9. Shima N., Ichikawa S. Mutagenic synergisms detected between dimethyl sulfate and X-rays but not found between N-methyl-N-nitrosourea and X-rays in the stamen hairs of Tradescantia clone BNL 4430. *Mutation. Research*. 1995. vol. 331. pp. 79-87. DOI: 10.1016/0027-5107(95)00054-m.

10. Cesniene T., Kleizaite V., Ursache R., Zvingila D., Radzevicius A., Patamsyte J., Rancelis V. Soil-surface genotoxicity of military and urban territories in Lithuania, as revealed by *Tradescantia* bioassays. *Mutat. Res. Genet. Toxicol. Environ. Mutagen.* 2010. vol. 697(1-2). pp. 10-18.
11. Misík M., Krupitza G., Misíková, K., Micieta, K., Nersesyan A., Kundi M., Knasmueller S. The *Tradescantia* micronucleus assay is a highly sensitive tool for the detection of low levels of radioactivity in environmental samples. *Environ. Pollut.* 2016. vol. 219. pp. 1044-1048. DOI: [org/10.1016/j.envpol.2016.09.004](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.09.004).
12. Thewes M.R., Endres Junior D., Droste A. Genotoxicity biomonitoring of sewage in two municipal waste water treatment plants using the *Tradescantia pallida* var. *purpurea* bioassay. *Genet. Mol. Biol.* 2011. vol. 34(4). pp. 689-693. DOI: [10.1590/S1415-47572011005000055](https://doi.org/10.1590/S1415-47572011005000055).
13. Yakovleva V.A., Beznosikov V.A., Kondratenok B.M., Khomichenko A.A. Genotoxic effects in *Tradescantia* plant (clone 02) induced by benzo(a)pyrene. *Contemporary problems of ecology.* 2011. vol. 4. no. 6. pp. 594-599.
14. Pedro-Escher J., Maziviero G.T., Fontanetti C.S. Mutagenic action of sugarcane vinasse in the *Tradescantia pallida* test system. *J. Ecosyst. Ecogr.* 2014. no. 4. pp. 145-152.
15. Kelecom A., Leal T.C. Higher Plants as a Warning to Ionizing Radiation: *Tradescantia*. *Biosensors for Health, Environment and Biosecurity.* Rijeka. Croatia. 2011. pp. 527-540. DOI: [10.5772/19628](https://doi.org/10.5772/19628).
16. Арутюнян Р.М., Погосян В.С., Агаджанян Э.А., Атоянц А.Л., Вардеванян П.О., Геворкян Э.С. Учет соматических мутаций у растительной тест-системы клона 02 традесканции в почвах из зон, прилегающих к Армянской АЭС // *Вестник МАНЭБ.* 2004. Т. 9. № 3. С. 33-35.
17. Агаджанян Э.А., Авалян Р.Э., Атоянц А.Л., Пюскулян К.И., Арутюнян Р.М. Использование клона традесканции в оценке генотоксичности почв с различным содержанием ¹³⁷Cs в зоне Армянской АЭС // *Живые и биокосные системы.* 2013. № 3. [Электронный ресурс]. URL: [http://www. Jbks.ru/archive/issue-3/article-13](http://www.Jbks.ru/archive/issue-3/article-13) (дата обращения: 22.09.2022).
18. Ma T.-H., Cabrera G.L., Cebulski-Wasilevska A., Chen R., Loarca A.I., Vanderberg A.L., Salamone M.F. *Tradescantia* stamen hair mutation bioassay. *Mutation Research.* 1994. vol. 310. no. 2. pp. 211-220.
19. Ma T.-H., Cabrera G.L., Chen R., Gill B.S., Sandhu S.S., Vanderberg A.L., Salamone M.F. *Tradescantia* Micronucleus Bioassay. *Mutation Research.* 1994. vol. 310(b). pp. 220-230.
20. Ma T.-H. The international program on plant bioassay collaborative studies with plant systems. *Mutation Research.* 1999. vol. 426. pp. 97-98.
21. Перельман А.И., Касимов Н.С. *Геохимия ландшафта.* М.: Астрель, 1999. 768 с.
22. Minouflet M., Aurault S., Badot P.M., Cotellet S., Ferard J.F. Assessment of the genotoxicity of ¹³⁷Cs radiation using *Vicia*-micronucleus, *Tradescantia*-micronucleus and *Tradescantia*-stamen-hair mutation bioassays. *J. Environment. Radioactivity.* 2005. vol. 81(2-3). pp. 143-153. DOI: [10.1016/j.jenvrad.2005.01.003](https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2005.01.003).

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Поступила в редакцию 05.08.2022
Принята к публикации 12.12.2022

THE ASSESSMENT OF GENOTOXICITY OF SOILS IN NATURAL LANDSCAPES OF ARMENIA DEPENDING ON THE CONTENT OF RADIONUCLIDES IN THE SOIL-PLANT SYSTEM

R. Avalyan, A. Atoyants, E. Aghajanyan, R. Aroutiounian

Yerevan State University, Scientific Research Institute "Biology", Armenia, Yerevan

e-mail: re_avalyan@mail.ru

Biotesting of the genotoxicity and cluster-genicity level of soil samples from the territory of the Aragats massif and the Ararat plain was carried out with the application of Trad-SHM (stamen hairs) and Trad-MN (micronuclei in tetrads of microspores) tests of Tradescantia (clone 02) model in the soil-plant system. The maximum significant increase of genetic effects level was shown in the soil variant Rg-At-17 with a low content of ^{137}Cs . A correlation analysis between the level of genetic effects and the specific activity of radionuclides in the studied soil samples was revealed.

Key words: biotesting, model test object, radionuclides, soil contamination, soil-plant system.

References

1. Vodyanitskii Yu.N. Ekotoksikologicheskaya otsenka opasnosti tyazhelykh metallov i metalloïdov v pochve. Agrokimiya. 2012. N 2. S. 75-84.
2. Rikhvanov L.P. Radioaktivnye elementy v okruzhayushchei srede i problemy radioekologii. Tomsk: STT, 2009. 430 s.
3. Pyuskyulyan K., Atoyan V., Arakelyan V., Saghatlyan A. The net effect of the Armenian nuclear power plant on the environment and population compared to the background from global radioactive fallout. Dordrecht: Springer, 2008. pp. 125-131.
4. Pyuskyulyan K., Lamont S., Atoyan V., Belyaeva O., Movsisyan N., Saghatlyan A. Altitude-dependent distribution of ^{137}Cs in the environment: a case study of Aragats massif, Armenia. Acta Geochimica. 2020. vol. 39(1). pp. 121-132. DOI: 10.1007/s11631-019-00334-0.
5. Belyaeva O.A., Movsisyan N.E., Pyuskyulyan K.I., Sagatlyan A.K. Raspredelenie ^{137}Cs v pochvakh i sukhikh atmosferykh vypadeniyakh Aragatskogo massiva. Izvestiya NAN RA. Nauki o Zemle. 2019. T. 72. N 1. S. 57-66.
6. Belyaeva O.A., Pyuskyulyan K. Assessing environmental and human health effects of radioactive emissions and discharges from the Armenian NPP. Issues of environmental security. Materials of international scientific conference of CSTO member states. CENS NAS RA. Yerevan, 2016. pp. 49-56.
7. Avakyan R.M., Arutyunyan G.G., Atoyan V.A., Ovsepyan A.V., Pyuskulyan K.I., Chubaryan E.V. Issledovanie prostranstvennogo raspredeleniya ^{137}Cs v pochve v raione razmeshcheniya Armyanskoi AES. Izvestiya NAN Armenii. Fizika. 2009. T. 44. N 1. C. 54-63.
8. Ichikawa S. Tradescantia stamen-hair system as an excellent botanical tester of mutagenicity: Its responses to ionizing radiations and chemical mutagens, and some synergistic effects found. Mutation Research. 1992. vol. 270. pp. 3-22.
9. Shima N., Ichikawa S. Mutagenic synergisms detected between dimethyl sulfate and X-rays but not found between N-methyl-N-nitrosourea and X-rays in the stamen hairs of Tradescantia clone BNL 4430. Mutation. Research. 1995. vol. 331. pp. 79-87. DOI: 10.1016/0027-5107(95)00054-m.
10. Cesniene T., Kleizaite V., Ursache R., Zvingila D., Radzevicius A., Patamsyte J., Rancelis V. Soil-surface genotoxicity of military and urban territories in Lithuania, as revealed by Tradescantia bioassays. Mutat. Res. Genet. Toxicol. Environ. Mutagen. 2010. vol. 697(1-2). pp. 10-18.
11. Misík M., Krupitza G., Misíková, K., Micieta, K., Nersesyan A., Kundi M., Knasmueller S. The Tradescantia micronucleus assay is a highly sensitive tool for the detection of

low levels of radioactivity in environmental samples. Environ. Pollut. 2016. vol. 219. pp. 1044-1048. DOI: org/10.1016/j.envpol.2016.09.004.

12. Thewes M.R., Endres Junior D., Droste A. Genotoxicity biomonitoring of sewage in two municipal waste water treatment plants using the *Tradescantia pallida* var. *purpurea* bioassay. Genet. Mol. Biol. 2011. vol. 34(4). pp. 689-693. DOI: 10.1590/S1415-47572011005000055.

13. Yakovleva V.A., Beznosikov V.A., Kondratenok B.M., Khomichenko A.A. Genotoxic effects in *Tradescantia* plant (clone 02) induced by benzo(a)pyrene. Contemporary problems of ecology. 2011. vol. 4. no. 6. pp. 594-599.

14. Pedro-Escher J., Maziviero G.T., Fontanetti C.S. Mutagenic action of sugarcane vinasse in the *Tradescantia pallida* test system. J. Ecosyst. Ecogr. 2014. no. 4. pp. 145-152.

15. Kelecom A., Leal T.C. Higher Plants as a Warning to Ionizing Radiation: *Tradescantia*. Biosensors for Health, Environment and Biosecurity. Rijeka, Croatia. 2011. pp. 527-540. DOI: 10.5772/19628.

16. Arutyunyan R.M., Pogosyan V.S., Agadzhanian E.A., Atoyants A.L., Vardevanyan P.O., Gevorkyan E.S. Uchet somaticheskikh mutatsii u rastitel'noi test-sistemy klona 02 tradetskantsii v pochvakh iz zon, prilgayushchikh k Armyanskoi AES. Vestnik MANEB. 2004. T. 9. N 3. S. 33-35.

17. Agadzhanian E.A., Avalyan R.E., Atoyants A.L., Pyuskulyan K.I., Arutyunyan R.M. Ispol'zovanie klona tradetskantsii v otsenke genotoksichnosti pochv s razlichnym soderzhanie 137Cs v zone Armyanskoi AES. Zhivye i biokosnye sistemy. 2013. N 3. [Elektronnyi resurs]. URL: <http://www.Jbks.ru/archive/issue-3/article-13> (data obrashcheniya: 22.09.2022).

18. Ma T.-H., Cabrera G.L., Cebulski-Wasilevska A., Chen R., Loarca A.I., Vanderberg A.L., Salamone M.F. *Tradescantia* stamen hair mutation bioassay. Mutation Research. 1994. vol. 310. no. 2. pp. 211-220.

19. Ma T.-H., Cabrera G.L., Chen R., Gill B.S., Sandhu S.S., Vanderberg A.L., Salamone M.F. *Tradescantia* Micronucleus Bioassay. Mutation Research. 1994. vol. 310(b). pp. 220-230.

20. Ma T.-H. The international program on plant bioassay collaborative studies with plant systems. Mutation Research. 1999. vol. 426. pp. 97-98.

21. Perel'man A.I., Kasimov N.S. Geokhimiya landshafta. M.: Astreya, 1999. 768 s.

22. Minouflet M., Aurault S., Badot P.M., Cotellet S., Ferard J.F. Assessment of the genotoxicity of 137Cs radiation using *Vicia*-micronucleus, *Tradescantia*-micronucleus and *Tradescantia*-stamen-hair mutation bioassays. J. Environment. Radioactivity. 2005. vol. 81(2-3). pp. 143-153. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2005.01.003.

Сведения об авторах:

Римма Эдуардовна Авалян

К.б.н., старший научный сотрудник НИИ «Биология», Ереванский государственный университет

ORCID 0000-0001-8969-7067

Rimma Avalyan

Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher of the Scientific RI "Biology", Yerevan State University

Анаит Леоновна Атоянц

К.б.н., старший научный сотрудник НИИ «Биология», Ереванский государственный университет

ORCID 0000-0001-5076-5675

Anahit Atoyants

Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher of the Scientific RI "Biology", Yerevan State University

Эвелина Артемовна Агаджанян

К.б.н., старший научный сотрудник НИИ «Биология», Ереванский государственный университет

ORCID 0000-0001-8969-7067

Evelina Aghajanyan

Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher of the Scientific RI “Biology”, Yerevan State University

Рубен Михайлович Арутюнян

Д.б.н., член-корр. НАН РА, профессор, заведующий Лабораторией общей и молекулярной генетики НИИ «Биология», Ереванский государственный университет

ORCID 0000-0003-1020-9513

Ruben Aroutiounian

Doctor of Biological Sciences, Corresponding Member NAS RA, Professor, Head Laboratory of General and Molecular Genetics of the Scientific RI “Biology”, Yerevan State University

Для цитирования: Авалян Р.Э., Атоянц А.Л., Агаджанян Э.А., Арутюнян Р.М. Оценка генотоксичности почв природных ландшафтов Армении с учетом содержания в них радионуклидов в системе почва-растение // Вопросы степеведения. 2022. № 4. С. 94-106. DOI: 10.24412/2712-8628-2022-4-94-106