

Читайте
онлайн
Read
online

Атоянц А.Л., Авалян Р.Э.

Оценка генотоксических рисков техногенного загрязнения сельскохозяйственных почв

Ереванский государственный университет, Научно-исследовательский институт «Биология», 0025, Ереван, Республика Армения

РЕЗЮМЕ

Введение. Мониторинг загрязнения почвы техногенных и природных территорий — важнейшая часть системы экотоксикологического тестирования окружающей среды. В современных условиях сельскохозяйственного производства загрязнение почвы тяжёлыми металлами (ТМ) и пестицидами является актуальной проблемой, в том числе и для Армении. Тяжёлые металлы и пестициды могут разрушать экосистемы, препятствовать росту растений и оказывать пагубное воздействие на здоровье человека.

Материалы и методы. Проведено биотестирование уровня потенциальной мутагенности почвенных образцов трёх участков сельскохозяйственных угодий северо-восточных районов Армении в летний период с учётом содержания в них ТМ, металлоидов и пестицидов. Для определения генетических эффектов в почвенных образцах применяли тест на выявление соматических мутаций (Трад-ВТН) и микроядерный тест (Трад-МЯ) модельного тест-объекта традесканции (клон 02).

Результаты. По данным основных тест-критериев обоих тестов установлен максимальный уровень точковых рецессивных мутаций и частоты МЯ в почвенных пробах обработанных пестицидами участков района Личк, где их значения были выше фонового уровня в 3,6 раза по тесту Трад-МЯ и в 13,9 раза — по тесту Трад-ВТН соответственно. Показана статистически достоверная положительная корреляция между частотой микроядер и концентрацией As ($p < 0,01$; $p < 0,001$) в изученных почвенных образцах. Также выявлена достоверная положительная корреляция между бесцветными мутациями и невыжившими волосками в цветке традесканции и химическими веществами As, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni и Zn ($p < 0,01$; $p < 0,001$) в исследуемых почвенных образцах.

Ограничение исследования. В данной работе представлены результаты определения суммарной мутагенной активности исследуемых почвенных образцов с учётом их многокомпонентного состава в системе «почва — растение».

Заключение. Рекомендуется продолжить подобные исследования с применением модельных тест-систем для выявления долгосрочных эффектов воздействия тяжёлых металлов и пестицидов на экосистемы и здоровье человека с учётом сезонных изменений.

Ключевые слова: загрязнение почв; пестициды; тяжёлые металлы; традесканция (клон 02); мутагенный потенциал

Соблюдение этических стандартов. Исследование не требует представления заключения комитета по биомедицинской этике или иных документов.

Для цитирования: Атоянц А.Л., Авалян Р.Э. Оценка генотоксических рисков техногенного загрязнения сельскохозяйственных почв. *Гигиена и санитария*. 2025; 104(6): 772–777. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-6-772-777> <https://elibrary.ru/cfjbg>

Для корреспонденции: Авалян Римма Эдуардовна, e-mail: re_avalan@mail.ru

Участие авторов: Атоянц А.Л. — концепция и дизайн исследования, сбор материала и обработка данных; Авалян Р.Э. — концепция и дизайн исследования, написание текста, редактирование. *Все соавторы* — утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех её частей.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Финансирование. Исследование не имело финансовой поддержки.

Поступила: 29.01.2025 / Принята к печати: 26.03.2025 / Опубликовано: 31.07.2025

Anahit L. Atoyants, Rimma E. Avalyan

Assessment of genotoxic risks of technogenic pollution of agricultural soils

Yerevan State University, Research Institute of Biology, Yerevan, 0025, Republic of Armenia

ABSTRACT

Introduction. Monitoring of soil pollution in man-made and natural areas is an essential part of the ecotoxicological testing system for the state of the environment. In modern conditions of agricultural production, soil pollution with heavy metals (HM) and pesticides is a pressing issue, including in Armenia. HM and pesticides can destroy ecosystems, impede plant growth, and have a detrimental effect on human well-being.

Materials and methods. Biotesting of the potential mutagenicity level of soil samples from three agricultural sites in the northeastern areas of Armenia was carried out in the Summer, taking into account the content of HM and pesticides in them. To determine the genetic effects in soil samples, a test for the detection of somatic mutations (Trad-SHM) and a micronucleus test (Trad-MCN) of the model test object Tradescantia (clone 02) were used.

Results. According to the main test criteria of both assays, the maximum level of point recessive mutations and frequency of micronuclei was established in soil samples of the pesticide-treated areas of the Lichk area, where their values were 3.6 times higher than the background level according to the Trad-MCN test and 13.9 times higher according to the Trad-SHM test, respectively. A statistically significant positive correlation was shown between the frequency of micronuclei and the concentration of As ($p < 0.01$; $p < 0.001$) in the studied soil samples. A significant positive correlation was also found between colorless mutations and stunted stamen hairs in the flower of Tradescantia and the chemical components As, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni and Zn ($p < 0.01$; $p < 0.001$) in the studied soil samples.

Limitations. This paper presents the results of the total mutagenic activity of the studied soil samples, taking into account their multicomponent composition in the soil-plant system.

Conclusion. It is recommended to continue such studies using model test systems aimed at identifying the long-term effects of HM and pesticides on ecosystems and human health, taking into account seasonal changes.

Keywords: soil pollution; pesticides; heavy metals; Tradescantia (clone 02); mutagenic potential

Compliance with ethical standards. The study does not require the submission of a biomedical ethics committee opinion or other documents.

For citation: Atoyants A.L., Avalyan R.E. Assessment of genotoxic risks of technogenic pollution of agricultural soils. *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian journal*. 2025; 104(6): 772–777. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-6-772-777> <https://elibrary.ru/cfjbg> (In Russ.)

For correspondence: Rimma E. Avalyan, e-mail: re_avalan@mail.ru

Contribution: Atoyants A.L. — the concept and design of the study, collection and processing of material; Avalyan R.E. — the concept and design of the study, writing text, statistical processing, editing. *All authors* are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Funding. The study had no sponsorship.

Received: January 29, 2025 / Accepted: March 26, 2025 / Published: July 31, 2025

Введение

В условиях возрастающей антропогенной нагрузки на агроэкосистемы большого внимания заслуживает состояние сельскохозяйственных почв, особенно содержание в них тяжёлых металлов (ТМ) и пестицидов. Обеспечение безопасного применения пестицидов, а также минимизация их воздействия на окружающую среду и здоровье человека актуальны в современной сельскохозяйственной практике. Почвы агроландшафтов выступают как источники загрязнения сельскохозяйственной продукции, поэтому региональный мониторинг состояния почвенного покрова — важная часть системы экотоксикологического тестирования окружающей среды. Мутагенные эффекты ТМ, пестицидов и других загрязнителей, в том числе их влияние на ДНК и возможность передачи повреждений потомству, требуют особого внимания, поскольку последствия для здоровья человека и экосистемы могут быть непредсказуемыми и долгосрочными [1, 2].

Пестициды защищают сельскохозяйственные культуры от вредителей и болезней, играют важную роль в обеспечении продовольственной безопасности, однако наряду с преимуществами формируют и множество экологических и санитарных рисков, связанных с применением этих химических поллютантов [3]. Одним из наиболее острых вопросов является накопление пестицидов и тяжёлых металлов (ТМ) в почвах сельскохозяйственных угодий, где они могут сохраняться на протяжении длительного времени, оказывая токсичное воздействие на живые организмы [4]. ТМ относятся к самым распространённым техногенным стрессорам и в высоких концентрациях представляют высокую опасность для биоты. Будучи метаболическими ядами, многие ТМ способны существенно модифицировать выход генетических повреждений в живых организмах. Тяжёлые металлы и пестициды могут разрушать экосистемы, препятствовать росту растений и оказывать пагубное воздействие на здоровье человека [5–9].

Загрязнение почв — существенная угроза для стран с ограниченными ресурсами, таких как Армения, где аграрный сектор играет ключевую роль в экономике. В республике существуют экологические проблемы, связанные с нарушением безопасности в сельском хозяйстве, что усугубляется воздействием агрохимикатов, пестицидов и выбросов объектов промышленной инфраструктуры. Всё это может привести к ухудшению качества жизни населения, нарушению природных экосистем и утрате биоразнообразия [10, 11]. Распространённая в Армении практика неправильного использования пестицидов, их чрезмерное употребление для борьбы с вредителями или болезнями растений, а также смешивание и утилизация пестицидов без применения мер предосторожности для защиты почвы, воды и естественной растительности может повлиять на экологическое состояние природных агроэкосистем [12]. Следует отметить, что изучению экологической ситуации применительно к содержанию ТМ и пестицидов в сельскохозяйственных почвах, а также их влиянию на выращиваемые культуры в Армении уделяется недостаточно внимания.

Для решения этих задач необходим комплексный подход, который предполагает не только строгий контроль использования пестицидов, но и применение современных методов мониторинга загрязнения окружающей среды. При этом для определения экотоксикологической ситуации в конкретном природно-экономическом регионе особенно важно использование надёжных и чувствительных тест-объектов в целях биотестирования степени антропогенного загрязнения природных территорий [13, 14]. В системе генетического мониторинга традесканция (клон 02) является надёжным индикатором при биотестировании мутагенных эффектов природной среды. Растения традесканции эффективно используются при оценке индукции генетических нарушений под воздействием достаточно низких концентраций поллютантов, в том числе ТМ и пестицидов [15, 16].

В качестве тест-объекта биотестирования клон 02 традесканции обладает рядом преимуществ: высокой чувствительностью к действию ксенобиотиков, возможностью проводить исследования *in situ* и одновременно изучать частоту мутаций как в соматических, так и в спорогенных клетках на одних и тех же растениях.

Основными маркерными тестами клона 02 традесканции являются тест-система волосков тычиночных нитей (ВТН) для выявления соматических мутаций и морфологических изменений в ВТН (тест Трад-ВТН — генотоксический эффект) и микроядерный тест для обнаружения нарушений процесса микроспорогенеза с образованием микроядер (МЯ) в тетрадах микроспор (тест Трад-МЯ — кластогенный эффект). Оба биотеста входят в Международную программу по растительным тестам (IPPB) Программы ООН по окружающей среде (ЮНЕП).

Цель настоящей работы — оценка уровня мутагенности почвенных образцов территорий сельскохозяйственных угодий северо-восточных регионов Армении с применением теста по выявлению соматических мутаций (Трад-ВТН) и микроядерного теста (Трад-МЯ) традесканции (клон 02) в системе «почва — растение».

Материалы и методы

Методика агрохимического исследования почв. Материалом исследования служили почвенные образцы с территорий сельскохозяйственных угодий северо-восточных районов Армении, где выращиваются овощные культуры, преимущественно корнеплодные. Пробы почвы были отобраны в районах Гандзак, Личк и Вагашен, изучены два участка в каждом районе: 1-й участок был обработан пестицидами, 2-й участок — необработанная природная почва на расстоянии 500 м от первого участка. Отбор почвенных образцов проводили в летний период, после внесения пестицидов и агрохимикатов. Исследуемые участки находились в окружении нетронутых природных территорий горно-степных ландшафтов, где в основном преобладают горно-каштановые типы почв. Отбор почвенных проб выполняли в соответствии с методикой агрохимического исследования почв сельскохозяйственных угодий¹.

Образцы почвы отбирали при сухой погоде с глубины 5–20 см методом конвертов на расстоянии 100–200 м друг от друга. В каждой почвенной группе исследуемых районов отбирали не менее пяти проб с одного пробного участка для формирования объединённой почвенной пробы в целях более объективной оценки накопления химических компонентов. Масса каждой точечной пробы составляла 200 г, объединённой — до 1 кг. В качестве условно фонового образца использовали почву теплицы Ереванского государственного университета (горно-каштановый тип почвы), расположенной на расстоянии 40–50 км от основных районов исследования.

Концентрацию тяжёлых металлов и качественный анализ пестицидов в почве проводили в Центре мониторинга РА методами атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС) или масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС). Анализ пестицидов в почве выполняли методом газовой хроматографии на приборах *PerkinElmer Clarus 680 GC* (США).

Изучение геохимических особенностей исследуемых регионов. Для определения интегральной геохимической характеристики районов исследования были построены качественные санитарно-гигиенические ряды по среднему содержанию химических элементов в почвенных образцах путём нормирования компонентов по уровню ПДК (в качестве санитарно-гигиенической оценки). Для этого был рассчитан коэффициент техногенной концентрации

¹ Методические указания по определению тяжёлых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства (издание 2-е, переработанное и дополненное). Москва: ЦИНАО; 1992.

Таблица 1 / Table 1

Содержание химических компонентов (мг/кг) в исследуемых почвенных образцах

Content of chemical components (mg/kg) in the studied soil samples

Образцы почвы (районы) Soil samples (districts)	Химический элемент / Chemical element								
	As	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
Гандзак Gandzak	7.2	155.9	133.5	73.6	33 265.3	770.3	86.0	17.0	89.8
Гандзак/к Gandzak/k	4.2	103.2	109.9	65.3	30 907.4	704.5	68.0	12.0	86.4
Личк Lichk	10.5	80.9	140.6	83.6	40 194.2	834.5	86.2	31.5	90.5
Личк/к Lichk/k	9.0	74.3	130.0	78.4	36 835.8	804.8	75.5	27.0	87.0
Вагашен Vagashen	4.8	56.1	82.4	44.2	32 189.5	736.0	60.6	16.0	86.0
Вагашен/к Vagashen/k	3.2	36.2	60.7	31.4	22 514.2	420.0	53.4	18.0	84.9
ПДК для почвы MAC for the soil	2	20	100	55	40 000	1500	50	32	100

Примечание. Жирным шрифтом выделены концентрации, превышающие ПДК для почвы.

Note: Values in bold indicate values exceeding the MAC for the soil.

(в данном случае коэффициент опасности K_o) по обще-принятой формуле (1):

$$K_o = C / C_{\text{пдк}}, \quad (1)$$

где C – валовое содержание элемента в почве; $C_{\text{пдк}}$ – предельно допустимое содержание элемента.

Также был рассчитан суммарный показатель концентрации ($СПК - Z_c$) для каждого почвенного варианта по формуле (2):

$$Z_c = \sum K_o - (n - 1), \quad (2)$$

где K_o – коэффициент концентрации для каждого почвенного варианта; n – число элементов с $K_o > 1$.

Уровень загрязнения почв и степень опасности определяли по общепринятой шкале [17].

Применение клона 02 традесканции в системе «почва – растение». В качестве объекта исследований использовали растения модельного тест-объекта традесканции (клон 02). Вегетационный эксперимент в системе «почва – растение» проводился в условиях теплицы Ереванского государственного университета. Растения традесканции выращивали в вазонах с исследуемыми образцами почвы при одинаковых условиях вегетации: температура плюс 20–25 °С, световой режим (день/ночь) – 18/6 ч. Для каждого варианта почвенной пробы использовали три вегетационных сосуда с 300–400 г почвы, в которые высаживали по 5–7 растений традесканции, находящихся на определённой стадии органогенеза. Растения поливали водопроводной водой. Через 3–4 нед, после образования соцветий, состоящих из 16–20 цветочных бутонов, проводили фиксацию бутонов для теста Трад-МЯ. Остальные растения оставляли для дальнейшего цветения и теста Трад-ВТН.

В качестве основного маркёрного биотеста традесканции при биотестировании использовали микроядерный тест (Трад-МЯ), позволяющий обнаруживать генетические нарушения в процессе микроспорогенеза, проявляющиеся в образовании микроядер в тетрадах микроспор под воздействием токсичных веществ, в том числе пестицидов и тяжёлых металлов [18, 19].

При тестировании с применением данного метода учитывали два маркёрных тест-критерия: частота тетрад с микроядрами и частота микроядер в тетрадах. Фиксацию бутонов проводили с использованием ацеталкоголя (3 : 1). Готовили временные ацетокарминовые препараты по общепринятой методике [20]. Тетрады микроспор анализировались при увеличении 10 × 40 (микроскоп *Motic Images Swift M10L*, КНР). Определяли количество тетрад с микроядрами и пересчитывали число микроядер на 100 тетрад. В каждом почвенном образце было просмотрено по 3000 тетрад.

При проведении биотеста Трад-ВТН для выявления соматических мутаций в качестве маркёрных тест-критериев

учитывали изменение окраски клеток-волосков тычиночных нитей с голубых на розовые (рецессивные мутации – РМ) и появление бесцветных клеток (белые мутации – БМ). Наряду с мутациями РМ и БМ (соматическими) при тестировании определяли также морфологические изменения – карликовые (невыжившие, НВ) и разветвлённые (РВ) волоски, а также различные нарушения в строении цветка.

В каждой почвенной пробе было проанализировано 5–8 тыс. ВТН в зависимости от образца. Частоту мутаций рассчитывали по числу мутационных событий на 1000 просмотренных ВТН [21]. Анализ цветков проводили под бинокулярной лупой *Motic SMZ-171* (КНР) при увеличении ×40.

Выполняли корреляционный анализ частоты мутаций и морфологических изменений в ВТН, а также частоты встречаемости тест-критериев микроядерного теста и концентрации химических элементов в исследуемых водных пробах.

Статистический анализ. Статистическую обработку полученных данных проводили с помощью компьютерной программы Statgraphics Centurion 16.2 (StatPoint Technologies, Inc. USA; Warrenton, VA). Статистическую достоверность полученных данных устанавливали с помощью t -критерия Стьюдента. Для выявления статистически достоверной зависимости изученных показателей определяли коэффициент парной корреляции Пирсона. Полученные данные приведены в виде $M \pm m$ (среднее ± ошибка среднего). Различия считались статистически значимыми при $p < 0,05$.

Результаты

Изучение геохимических особенностей исследуемых регионов. Анализ почвенных образцов районов Гандзак, Личк, Вагашен показал значительные различия валового содержания исследуемых химических элементов. Почвенные образцы с обработанных сельскохозяйственных участков отличались повышенным содержанием ТМ по сравнению с необработанными участками, однако в обоих случаях наблюдалось превышение общепринятых норм (ПДК) для почвы некоторых элементов (табл. 1).

В табл. 1 представлены данные за летний период, когда содержание химических веществ наиболее высоко и почвы подвергаются интенсивному воздействию токсичных веществ. Во всех исследуемых почвенных образцах наблюдалось превышение ПДК таких элементов, как As, Co, Ni, и Cr и Cu, во всех пробах, кроме образцов района Вагашен. Основными потенциальными источниками поступления изучаемых элементов в агроценозы были пестициды и, возможно, агрохимикаты. Почвы обработанных участков сельскохозяйственных угодий отличались по содержанию используемых в данных районах пестицидов. Это преимущественно тефлутрин (ОДК в почве 0,14 мг/кг), фипронил (ОДК в почве 0,05 мг/кг) и пендиметалин (ОДК в почве 0,15 мг/кг), оказывающие токсическое действие на биоту.

Таблица 2 / Table 2

Санитарно-гигиенические ряды и суммарный показатель концентрации (СПК – Z_c) в образцах почв
Sanitary-hygienic series and total concentration index (SCI – Z_c) in soil samples

Пробы почвы (районы) Soil samples (districts)	Санитарно-гигиенический ряд* Sanitary-hygienic series*	Суммарный показатель концентрации Summary concentration index Z_c
Гандзак Gandzak	Mn, Pb (0.5) – Fe, Zn (0.8) – Cr, Cu (1.3) – Ni (1.7) – As (3.6) – Co (7.8)	18.4
Гандзак/к Gandzak/k	Pb (0.4) – Mn(0.5) – Fe (0.8) – Zn (0.9) – Cr (1.1) – Cu (1.2) – Ni (1.4) – As (2.1) – Co (5.2)	13.6
Личк Lichk	Mn (0.6) – Pb, Zn (0.9) – Fe (1.0) – Cr (1.4) – Cu (1.5) – Ni (1.7) – Co (4.0) – As (5.2)	17.2
Личк/к Lichk/k	Mn (0.5) – Pb, Zn (0.8) – Fe (0.9) – Cr (1.3) – Cu (1.4) – Ni (1.5) – Co (3.7) – As (4.5)	15.4
Вагашен Vagashen	Pb, Mn (0.5) – Cr, Cu, Fe (0.8) – Zn (0.9) – Ni (1.2) – As (2.4) – Co (2.8)	10.7
Вагашен/к Vagashen/k	Mn (0.3) – Pb, Cr, Cu, Fe (0.6) – Zn (0.8) – Ni (1.1) – As (1.6) – Co (1.8)	7.8

Примечание. * – в скобках приведено значение K_o по отношению к ПДК.

Note: * – the value of K_o in relation to the maximum permissible concentration (MPC) is given in parentheses.

В данном исследовании учитывали в основном остаточные эффекты пестицидов, применяемых в регламентированных концентрациях, после их внесения в почву.

Как известно, уровень накопления химических элементов в почвенных образцах определяется методом сопоставления фактических валовых содержаний металлов (металлоидов) с условным фоновым содержанием. При этом полученный коэффициент техногенной концентрации (K_c) является одним из критериев техногенной аномальности изучаемой территории. Был рассчитан коэффициент техногенной концентрации (в данном случае – коэффициент опасности K_o) и построены качественные санитарно-гигиенические ряды по среднему содержанию химических элементов в почвенных образцах путём нормирования компонентов по уровню ПДК (в качестве санитарно-гигиенической оценки) (табл. 2).

В табл. 2 наглядно представлена интегральная характеристика степени загрязнения химическими компонентами каждого исследуемого образца с учётом коэффициента K_o и суммарного показателя концентрации (Z_c). По показателю Z_c наиболее загрязнёнными оказались почвенные образцы из районов Гандзак и Личк, где значения коэффициента были наибольшими, особенно на обработанных участках. Почвы этих участков соответствуют среднему уровню загрязнения, поскольку величина $Z_c > 16$. На остальных исследуемых участках по данному показателю почва соответствует категории до-

пустимого уровня загрязнения (Z_c не превышает 16). Самый низкий уровень загрязнения почвы наблюдался на контрольном (необработанном) участке района Вагашен ($Z_c < 8$).

На основании значений коэффициента K_o были выделены приоритетные загрязнители в каждой группе почвенных образцов изучаемых участков, а также определена доля каждого химического элемента в общей сумме загрязнения. В зависимости от района пробоотбора почв показано наличие приоритетных загрязнителей. Во всех исследуемых почвенных группах это в основном Cu, Cr, Co, As и Ni ($K_o > 1$). Во всех исследуемых образцах превышены ПДК Co, As и Ni. В почвах района Личк как приоритетный загрязнитель определён мышьяк (As), что свидетельствует об их высокой токсичности.

При проведении биотестирования уровня мутагенности исследуемых почвенных образцов для обнаружения нарушений процесса микроспорогенеза с образованием микроядер (МЯ) в тетрадах микроспор (кластогенный эффект) на основе анализа микроядерного теста традесканции показано значительное увеличение частоты МЯ по сравнению с контролем (условный фон) в образцах почвы всех исследуемых участков. При этом обрабатываемые почвы сельскохозяйственных участков отличались более высоким уровнем кластогенности, чем необработанные (контрольные) участки (табл. 3).

Таблица 3 / Table 3

Частота мутаций в соматических и спорогенных клетках традесканции (клон 02)

Mutation frequency in somatic and sporogenous cells of Tradescantia (clone 02)

Пробы почвы (районы) Soil Samples (districts)	Частота микроядер (МЯ) в спорогенных клетках Frequency of micronuclei (MN) in sporogenous cells		Частота соматических мутаций и морфологических изменений Frequency of somatic mutations and morphological changes		
	тетрады с МЯ tetrads with MN % $\pm m$	МЯ в тетрадах MN in tetrads % $\pm m$	розовые мутации pink mutations 1000 $\pm m$	бесцветные мутации colorless mutations 1000 $\pm m$	тычиночные волоски staminate hairs 1000 $\pm m$
Гандзак Gandzak	5.82 $\pm$ 0.43***	7.12 $\pm$ 0.47***	3.71 $\pm$ 0.81	25.49 $\pm$ 1.98***	7.98 $\pm$ 1.18
Гандзак/к Gandzak/k	4.73 $\pm$ 0.39***	5.72 $\pm$ 0.42***	2.17 $\pm$ 0.69	14.66 $\pm$ 1.60***	4.61 $\pm$ 0.87
Личк Lichk	8.0 $\pm$ 0.46***	8.74 $\pm$ 0.52***	6.42 $\pm$ 1.03***	26.11 $\pm$ 2.15	8.03 $\pm$ 1.12***
Личк/к Lichk/k	5.14 $\pm$ 0.40***	6.0 $\pm$ 0.43***	2.04 $\pm$ 0.59*	19.08 $\pm$ 1.32***	4.81 $\pm$ 0.67**
Вагашен Vagashen	4.9 $\pm$ 0.39***	5.5 $\pm$ 0.42***	2.30 $\pm$ 0.64*	20.26 $\pm$ 1.81	6.00 $\pm$ 1.03
Вагашен/к Vagashen/k	3.5 $\pm$ 0.34**	3.96 $\pm$ 0.36**	0.91 $\pm$ 0.41	11.21 $\pm$ 1.37	3.26 $\pm$ 0.77
Фон Background	2.2 $\pm$ 0.27	2.5 $\pm$ 0.29	0.46 $\pm$ 0.23	8.16 $\pm$ 0.96	1.95 $\pm$ 0.47

Примечание. Различия достоверны при: * – $p < 0,05$; ** – $p < 0,01$; *** – $p < 0,001$.

Note: differences are significant at: * – $p < 0,05$; ** – $p < 0,01$; *** – $p < 0,001$.

Наиболее выраженные кластогенные эффекты наблюдались в образцах почвы района Личк, где фоновые показатели были превышены в 3,6 раза на обработанных участках и в 2,4 раза на соответствующих им контрольных участках (см. табл. 3). Наименьший уровень кластогенности имели образцы почв, взятых на участках района Вагашен. Таким образом, на основании полученных результатов двух тест-критериев установлено, что почвы с обработанных участков обладали более высоким уровнем кластогенности, чем почвы соответствующих им необработанных участков.

Анализ соматических мутаций в растениях традесканции выявил по данным теста Трад-ВТН значительное увеличение частоты розовых мутаций (РМ) по сравнению с фоновым уровнем во всех образцах почвы исследуемых районов (см. табл. 3). Почвы обработанных пестицидами участков отличались более высокой генотоксичностью по сравнению с контрольными, при этом наиболее выраженные эффекты наблюдались в образцах почвы из района Личк, где частота соматических рецессивных мутаций была в 3 раза выше уровня мутаций с необработанного участка и в 13,9 раза выше фонового уровня ($p < 0,001$). Частота бесцветных мутаций (БМ) в исследуемых почвенных пробах была в 1,5–3 раза выше фонового уровня с максимальным значением также в образце из района Личк ($p < 0,01$). Во всех почвенных образцах также были зарегистрированы различные морфологические изменения в ВТН, в особенности карликовые (невыжившие) тычиночные волоски (НВ), содержащие от 2 до 10 клеток. Такие нарушения были наиболее распространены у растений, выращенных в почве с обработанных участков, и максимальное проявление также наблюдалось при выращивании на образце почвы района Личк: фоновый уровень был превышен в 4 раза ($p < 0,001$).

Проведенный корреляционный анализ между концентрацией химических элементов и тест-критериями теста Трад-МЯ показал наличие статистически достоверной положительной корреляции между обоими тест-критериями и концентрацией мышьяка (As) в почвенных образцах: МЯ в тетрадах ($r = 0,98$; $p < 0,001$) и тетрад с МЯ ($r = 0,84$; $p < 0,05$). Также по данным теста Трад-ВТН выявлена достоверная положительная корреляция между БМ, морфологическими изменениями типа НВ и химическими компонентами As, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni и Zn ($p < 0,01$; $p < 0,001$) в исследуемых почвенных образцах.

Обсуждение

В результате выполненных исследований в системе «почва – растение» по выявлению уровня мутагенности почвенных образцов с территорий сельскохозяйственных угодий, обработанных пестицидами, показано повышение уровня генотоксичности и кластогенности в клетках традесканции. Почвенные образцы по содержанию тяжёлых металлов характеризовались неоднородностью: от фонового до опасного уровня, особенно в районах Гандзак и Личк, где приоритетными загрязнителями были Cu, Cr, Co, As и Ni, что указывает на их антропогенное происхождение. Наблюдаемая статистически достоверная корреляция между тест-критериями микроядерного теста и содержанием в образцах мышьяка свидетельствует о прямой зависимости выхода мутаций от повышения уровня данного элемента в почве. Как известно, мышьяк, кадмий и свинец являются экотоксикантами, обладают кумулятивным и канцерогенным действием на живые организмы, вызывают различные генетические нарушения в клетках, повреждая ядерный аппарат растительной клетки и нарушая в ней митоз и цитокinesis [16]. В данном исследовании в основном учитывалось наличие приоритетных пестицидов, используемых на изучаемых сельскохозяйственных территориях².

² Гигиеническая классификация пестицидов и агрохимикатов по степени опасности. Методические рекомендации. МР 1.2.0235–21 от 15.02.2021 г.

Препараты на основе тефлутрина относятся ко 2-му и 3-му классам опасности для человека и требуют осторожного обращения. Средства на основе фипронила относятся к высокоопасным (2-й класс опасности) для растений, а также к умеренно опасным (3-й класс опасности) для человека и других млекопитающих. Пендиметалин является почвенным гербицидом и почти полностью разлагается в почве к концу вегетации, хотя продукты его разложения могут быть токсичными. Остатки данных пестицидов, а также побочные продукты их разложения (в частности, ТМ) представляют потенциальную опасность для экосистем, так как обладают стойкостью и способны проникать в организм по различным экологическим цепям. Выявленное на основе биотестирования большое количество микроядер и невыживших волосков в почвенной пробе обработанного участка района Личк свидетельствует о содержании в почвенных образцах токсичных компонентов, обладающих генотоксическим действием на спорогенные клетки традесканции и подавляющих рост соматических клеток в волосках тычиночных нитей. Сопряжение генетических эффектов с повышенным (превышающим ПДК) содержанием химических компонентов в почвенных образцах, а также наличие положительной корреляции могут свидетельствовать о непосредственном влиянии комплекса химических компонентов (аддитивный токсический эффект) на выход мутаций в спорогенных и соматических клетках традесканции.

Ограничение исследования. В данной работе представлены в основном результаты изучения суммарной мутагенной активности исследуемых почвенных образцов с учётом их многокомпонентного состава (ТМ и металлоиды) и определения пестицидов в системе «почва – растение», без определения других токсичных компонентов, которые могли присутствовать в почвенных пробах.

Заключение

Сравнительный анализ почвенных образцов сельскохозяйственных угодий разных районов Армении по результатам тестов Трад-ВТН и Трад-МЯ клона 02 традесканции в системе «почва – растение» показал наличие генотоксических и кластогенных эффектов в исследуемых почвенных региональных группах с разной степенью проявления в зависимости от образца. Наибольший уровень генетических нарушений по данным двух тестов проявился в образце с территории обработанного пестицидами почвенного участка района Личк. Достоверная положительная корреляция между генетическими маркерами и содержанием мышьяка свидетельствует о возможном потенциальном влиянии данного компонента на увеличение генотоксических рисков в соматических и спорогенных клетках традесканции. Выявленное в данном исследовании превышение ПДК ТМ (As, Co, Ni, Cr, Cu) в почвах сельскохозяйственных угодий, особенно на обработанных участках районов Гандзак и Личк, подтвердило необходимость соблюдения технологических регламентов при выращивании сельскохозяйственной продукции. На основании построенных санитарно-гигиенических рядов показана интегральная характеристика изучаемых региональных почвенных участков и выявлены геохимические риски при наличии приоритетных загрязнителей, представляющих потенциальную опасность для биоты.

Исследования по эколого-генетической оценке состояния сельскохозяйственных почв с учётом содержания в них токсичных веществ, в частности пестицидов и ТМ (металлоидов), с применением клона 02 традесканции проведены в Армении впервые. Рекомендуется продолжить подобные исследования, направленные на выявление долгосрочных эффектов воздействия тяжёлых металлов и пестицидов на экосистемы и здоровье человека, с учётом сезонных изменений. Авторами показана целесообразность применения традесканции (клон 02) в качестве модельного тест-объекта для биотестирования степени антропогенного нарушения почвенного покрова сельскохозяйственных агроэкосистем.

Литература

(п.п. 1, 2, 4, 5, 7–10, 15, 16, 18–21 см. References)

3. Лысов А.К. Проблемы применения средств защиты растений и пути снижения их техногенного воздействия на окружающую среду. *Агро-ЭкоИнженерия*. 2023; (3): 34–51. <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2023-3116-34-50> <https://elibrary.ru/juslra>
6. Реутова Н.В., Реутова Т.В., Воробьева Т.И. Определение мутагенного потенциала неорганических соединений ряда тяжелых металлов. *Гигиена и санитария*. 2011; (5): 55–7. <https://elibrary.ru/ohikmd>
11. Кроян С.З., Казарян У.К. Состояние основных типов почв Республики Армения в условиях изменения климата. *Почвоведение и агрохимия*. 2019; (1): 5–18. <https://elibrary.ru/uyuciny>
12. Обзор ситуации по особо опасным пестицидам (ООП) и альтернативам в Армении, «Армянские женщины за здоровье и здоровую окружающую среду». Ереван; 2020. Доступно: <https://awhhe.am>
13. Ильин И.Б. *Тяжелые металлы и неметаллы в системе почва-растение*. Новосибирск; 2012.
14. Водяницкий Ю.Н. Экоотоксикологическая оценка опасности тяжелых металлов и металлоидов в почве. *Агрохимия*. 2012; (2): 75–84. <https://elibrary.ru/owxoht>
17. Перельман А.И., Касимов Н.С. *Геохимия ландшафта*. М.: Астерия; 2000.

References

1. Mahmood I., Imadi S.R., Shazadi K., Gul A., Hakeem K.R. Effects of pesticides on the environment. In: Hakeem K., Akhtar M., Abdullah S., eds. *Plant, Soil and Microbes*. Cham: Springer; 2016: 253–69. https://doi.org/10.1007/978-3-319-27455-3_13
2. Tepanosyan G., Sahakyan L., Pipoyan D., Saghatelanyan A. Risk assessment of heavy metals pollution in urban environment. In: *Risk Assessment*. Intech Open; 2018: 384. <https://doi.org/10.5772/intechopen.70798>
3. Lysov A.K. Application problems of plant protection agents and ways to reduce their anthropogenic impact on the environment. *AgroEkoInzheneriya*. 2023; (3): 34–51. <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2023-3116-34-50> <https://elibrary.ru/juslra> (in Russian)
4. Wuana R.A., Okieimen F.E. Heavy metals in contaminated soils: A review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation. *International Scholarly Research Notices*. 2011; 2011(1): 402647. <https://doi.org/10.5402/2011/402647>
5. Nagajyoti P.C., Lee K.D., Sreekanth T.V.M. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants. A review. *Environ. Chem*. 2010; (8): 199–216. <https://doi.org/10.1007/s10311-010-0297-8>
6. Reutova N.V., Reutova T.V., Vorobyeva T.I. Determination of the mutagenic potential of inorganic compounds of a number of heavy metals. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian Journal)*. 2011; (5): 55–7. <https://elibrary.ru/ohikmd> (in Russian)
7. Riyazuddin R., Nisha N., Ejaz B., Khan M.I.R., Kumar M., Ramteke P.W., et al. A comprehensive review on the heavy metal toxicity and sequestration in plants. *Biomolecules*. 2021; 12(1): 43. <https://doi.org/10.3390/biom12010043>
8. Lasat M.M. Phytoextraction of toxic metals: a review of biological mechanisms. *J. Environ. Qual.* 2002; 31(1): 109–20.
9. Mdeni N.L., Adeniji A.O., Okoh A.I., Okoh O.O. Analytical evaluation of carbamate and organophosphate pesticides in human and environmental matrices: a review. *Molecules*. 2022; 27(3): 618. <https://doi.org/10.3390/molecules27030618>
10. Hunanyan S.A. Influence of technogenic emissions on agrochemical indicators of soils in the vicinity of the Vanadzor chemical plant of the Republic of Armenia. *News Agr. Sci.* 2012; 10(3): 41–4.
11. Kroyan S.Z., Ghazaryan H.Gh. State of the main soil types in the Republic of Armenia under the conditions of climate change. *Pochvovedenie i agrokhimiya*. 2019; (1): 5–18. <https://elibrary.ru/uyuciny> (in Russian)
12. Review of the situation on highly hazardous pesticides (HHP) and alternatives in Armenia, “Armenian Women for Health and Healthy Environment” NGO, Yerevan, Armenia. 2020. Available at: www.awhhe.am (in Russian)
13. Ilyin I.B. *Heavy Metals and Non-Metals in the Soil-Plant System [Tyazhelye metally i nemetally v sisteme pochva-rastenie]*. Novosibirsk; 2012. (in Russian)
14. Vodyanitskiy Yu.N. Assessment of the ecotoxicological hazard of heavy metals and metalloids in the soil. *Agrokhimiya*. 2012; (2): 75–84. <https://elibrary.ru/owxoht> (in Russian)
15. Rodríguez M.Á.R., Prieto-García F., Otazo-Sánchez E.M., Méndez J.P., Acevedo-Sandoval O.A. Genotoxicity analysis by presence of arsenic in soil: test Tradescantia micronucleus extracts by clone 4430 (trad-mcn). *Biotechnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*. 2019; 17(1): 56–63.
16. Campos C.F., Morelli S., De Campos Júnior E.O., Santos V.S.V., De Moraes C.R., Cunha M.C., et al. Assessment of the genotoxic potential of water courses impacted by wastewater treatment effluents using micronucleus assay in plants from the species Tradescantia. *J. Toxicol. Environ. Health A*. 2019; 82(13): 752–9. <https://doi.org/10.1080/15287394.2019.1648345>
17. Perelman A.I., Kasimov N.S. *Geochemistry of Landscape [Geokhimiya landshafta]*. Moscow: Asteria; 2000. (in Russian)
18. Meravi N., Prajapati S.K. Genotoxicity assessment of soil contaminated by metals/metalloids using Tradescantia pallida. *East African Scholars J. Agri. Life Sci.* 2018; 1(1): 17–21. <https://doi.org/10.36349/easjals.2018.v01i01.003>
19. Mizik M., Pichler C., Rainer B., Nersesyan A., Mizikova K., Knasmueller S. Micronucleus assay with tetrad cells of Tradescantia. In: Dhawan A., Bajpayee M., eds. *Genotoxicity Assessment. Methods in Molecular Biology, Volume 2031*. New York: Humana; 2019. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-9646-9_18
20. Ma T.H., Cabrera G.L., Chen R., Gill B.S., Sandhu S.S., Vandenberg A.L., et al. Tradescantia micronucleus bioassay. *Mutat. Res.* 1994; 310(2): 221–30. [https://doi.org/10.1016/0027-5107\(94\)90115-5](https://doi.org/10.1016/0027-5107(94)90115-5)
21. Ma T.H., Cabrera G.L., Cebulska-Wasilewska A., Chen R., Loarca F., Vandenberg A.L., et al. Tradescantia stamen hair mutation bioassay. *Mutat. Res.* 1994; 310(2): 211–20. [https://doi.org/10.1016/0027-5107\(94\)90114-7](https://doi.org/10.1016/0027-5107(94)90114-7)

Сведения об авторах

Атоянц Анаит Леоновна, канд. биол. наук, ст. науч. сотр., ЕГУ, НИИ «Биология», 0025, Ереван, Республика Армения. E-mail: a.atoyants@mail.ru

Авалян Римма Эдуардовна, канд. биол. наук, ст. науч. сотр., ЕГУ, НИИ «Биология», 0025, Ереван, Республика Армения. E-mail: re_avalyan@mail.ru

Information about the authors

Anahit L. Atoyants, PhD (Biology), Senior Researcher, Yerevan State University, Research Institute “Biology”, Yerevan, 0025, Republic of Armenia, <https://orcid.org/0000-0001-5076-5675>
E-mail: a.atoyants@mail.ru

Rimma E. Avalyan, PhD (Biology), Senior Researcher, Yerevan State University, Research Institute “Biology”, Yerevan, 0025, Republic of Armenia, <https://orcid.org/0000-0001-8969-7067>
E-mail: re_avalyan@mail.ru