

Биотестирование воды городских речных систем Армении с применением модельной тест-системы

© 2021. Р. Э. Авалян, к. б. н., с. н. с., Э. А. Агаджанян, к. б. н., с. н. с., А. Л. Атоянц, к. б. н., с. н. с., Р. М. Арутюнян, д. б. н., профессор, Ереванский государственный университет, НИИ «Биология», 0025, Армения, г. Ереван, ул. Чаренца, д. 8, e-mail: re_avalayan@mail.ru

В настоящее время в связи с высокой интенсивностью техногенной нагрузки на речные экосистемы Республики Армения весьма актуальным является биотестирование качества воды с применением модельных тест-объектов. Используемая в целях биоиндикации растительная тест-система *Tradescantia* (клон 02) применяется как для выявления отдельных поллютантов, так и для оценки общего состояния водных объектов.

Проведено биотестирование уровня генотоксичности и кластогенности воды реки Раздан (Армения) с применением двух тест-систем модельного тест-объекта традесканции (клон 02). По данным биотеста волосков тычиночных нитей (Трад-ВТН) показано достоверное повышение уровня розовых мутационных событий (РМС), бесцветных мутационных событий (БМС), а также невыживших волосков (НВ) во всех изученных пробах воды по сравнению с условно фоновым вариантом. Максимальные проявления были характерны для образца, отобранного у Киевского моста, где значения изученных параметров (РМС и БМС) превысили уровень фона в 11 и 4 раза соответственно. Аналогичные результаты наблюдались и по данным микроядерного теста (Трад-МЯ) при изучении его двух основных тест-критериев: процента тетрад с микроядрами и микроядер в тетрадах. В данном случае тест-показатели превысили фоновый уровень в 3,5 раза также в водном образце у Киевского моста. Показана достоверная положительная корреляция между уровнем БМС и концентрацией Са ($r = 0,62$ при $p < 0,05$) и Рb ($r = 0,67$ при $p < 0,05$), а также между НВ и концентрацией Мо ($r = 0,84$ при $p < 0,05$) в изученных водных образцах. Также выявлена положительная корреляционная зависимость между уровнем РМС, БМС и частотой тест-критериев микроядерного теста ($p < 0,05$). Полученные результаты показали, что тест-системы Трад-ВТН и Трад-МЯ клона 02 традесканции обладают высокой чувствительностью и обеспечивают адекватную оценку мутагенной и кластогенной активности воды р. Раздан.

Ключевые слова: традесканция (клон 02), биотестирование, загрязнение воды, генотоксичность, кластогенность.

Bioassay of water from urban river systems of Armenia using model test system

© 2021. R. E. Avalyan ORCID: 0000-0001-8969-7067, E. A. Aghajanyan ORCID: 0000-0001-8969-7067, A. L. Atoyants ORCID: 0000-0001-5076-5675, R. M. Aroutiounian ORCID: 0000-0003-1020-9513, Yerevan State University, RI “Biology”, 8, Charentsa St., Yerevan, Armenia, 0025, e-mail: re_avalayan@mail.ru

The river ecosystems, as the natural objects and the main sources of fresh water, play a vital role in the nature. Disturbance of hydroecological safety of river basins can occur under the influence of both antropogenic and natural factors. The state of hydroecosystem of the Araks river basin and its major tributary, the Razdan river, appears to have a considerable impact on habitation conditions for population of the South Caucasian region countries. The process of a bioindication of genotoxic effects of complex mixtures on the water environment using higher plants test objects is very appropriate and effective. The *Tradescantia* clone 02 stamen hair mutations (Trad-SHM) and *Tradescantia* micronucleus (Trad-MCN) bioassays are two of the efficient and reliable biomonitoring test systems for mutagenicity of air, water and soil pollutants. The genotoxicity and clastogenicity of water samples collected from diferent sites of the Razdan river were assessed by means of Trad-SHM and Trad-MCN assay using model test plant *Tradescantia* (clone 02). Here we report a significant increase in the level of somatic mutation (recessive mutation events – RME) and micronuclei (MN) in tetrads of pollen microspores frequency in the *Tradescantia* inflorescences exposed to the water samples of river compared to the background. The maximum manifestation of these genetic effects from both investigated bioassays was observed in the Kievsky Bridge water samples. A significant positive correlation between the somatic mutation events and MN with tetrads was revealed. These results indicate that Trad-SHM and Trad-MCN bioassays of the *Tradescantia* clone 02 can be applied for biotesting of water quality of river’s ecosystems.

Keywords: *Tradescantia*, biotesting, genotoxicity, clastogenicity, water pollution.

Водные ресурсы Армении играют исключительно важную роль в жизни республики как источники водоснабжения, орошения и гидроэнергии. Среди них особое место занимают речные экосистемы как природные объекты и основные источники пресной воды. Речная сеть республики сравнительно густая и насчитывает свыше 200 рек и речек. Нарушение гидроэкологической безопасности речных бассейнов может происходить под влиянием как антропогенных, так и естественных факторов [1, 2].

За последнее время в связи с возрастающей необходимостью усиления контроля за качеством и совершенствования управления речными ресурсами в республике особую актуальность имеют исследования воды рек, находящихся под постоянным антропогенным прессингом в условиях городской агломерации. В связи с этим проводились многочисленные исследования гидрохимического состава рек, их влияния на водные тест-организмы, воздействие климата на сезонные изменения водного режима [3, 4].

Вследствие изменяющегося состава речной воды под влиянием постоянно действующих физических и химических факторов возникает необходимость определять суммарную техногенную нагрузку в результате комбинированного действия различных мутагенов и ксенобиотиков [5]. Использование традиционного подхода к оценке качества воды, основанного на определении только гидрохимических показателей, не позволяет определить качественные изменения в водной экосистеме. Для этой цели, как правило, используют методы биоиндикации с привлечением модельных тест-объектов [6–9].

Среди растительных тест-объектов следует особо выделить традесканцию (клон 02), использование которой позволяет оценить индукцию генетических нарушений под воздействием достаточно низких концентраций ксенобиотиков. Традесканция (клон 02) является природным межвидовым гибридом между *Tradescantia occidentalis* Britton Rudb. и *T. ohiensis* Raf. и представляет собой гетерозиготное по окраске цветка растение: голубая окраска – доминантный, розовая – рецессивный признак. Данный клон традесканции в качестве растительной тест-системы обладает рядом достойных преимуществ для скрининга мутагенов и биоиндикации: высокой чувствительностью к действию ксенобиотиков, пригодностью для обнаружения как газообразных, так и водорастворимых мутагенов,

возможностью проводить исследования *in situ* и одновременного изучения мутаций как в соматических, так и в спорогенных клетках на одних и тех же растениях. Кроме того, к её достоинствам как тест-объекта можно также отнести высокую чувствительность к внешним воздействиям при низком спонтанном уровне мутаций и индивидуальной изменчивости, точность и простоту регистрации тест-маркеров, отражающих степень воздействия средовых факторов [10].

Среди крупных рек бассейна озера Севан река Раздан является одним из самых больших и многоводных притоков р. Аракс. Эта единственная река, которая вытекает из озера, и, протекая по территории республики, а также через крупный мегаполис г. Ереван, впадает в р. Аракс. Водные ресурсы р. Раздан играют важную роль в народном хозяйстве Армении, используются в гидроэнергетике и промышленных целях, а также – в формировании, регуляции баланса и круговорота водных ресурсов всего Южнокавказского региона. Систематические гидрохимические наблюдения, проводимые по течению реки (особенно в пределах Ереванской агломерации) позволили зафиксировать активное воздействие антропогенных факторов на качество воды и речную систему в целом [2, 5]. В связи с этим экотоксикологическая оценка степени загрязнённости речной экосистемы р. Раздан различного рода поллютантами (в том числе и тяжёлыми металлами) с привлечением чувствительных тест-систем является одним из важнейших этапов оценки её качества.

Целью настоящего исследования являлось биотестирование уровня генотоксичности и кластогенности водных проб р. Раздан с применением двух биотестов модельного тест-объекта традесканции (клон 02).

Материалы и методы исследования

Материалом исследования служили водные пробы р. Раздан (8), взятые в водосборных пунктах по течению реки в пределах городской агломерации г. Еревана: 1 – Корейское ущелье (р. Раздан); 2 – Корейское ущелье (канал Раздан); 3 – Давиташеновский мост; 4 – Киевский мост; 5 – Стадион Раздан; 6 – Мост Победы; 7 – ул. Раздан; 8 – Ереванское озеро.

Пробы воды отбирали в весенний период (по 3 пробы с каждого пункта водозабора) и были предоставлены Ноосферным Центром АН Республики Армении. В качестве условно

фонового образца (контроля) использовали водопроводную воду.

Для выполнения поставленных задач использовали основные маркерные тесты клона 02 традесканции: тест-систему волосков тычиночных нитей (ВТН) для выявления соматических мутаций и морфологических изменений (генотоксический эффект – тест Трад-ВТН) и микроядерный тест для обнаружения нарушений процесса микроспорогенеза с образованием микроядер (МЯ) в тетрадах микроспор (кластогенный эффект – тест Трад-МЯ).

Оба биотеста входят в Международную программу по растительным тестам (IPPB) под эгидой ООН по окружающей среде (ЮНЕП) [8].

При проведении биотеста Трад-ВТН в качестве индикаторных тест-критериев учитываются: изменение окраски клеток-волосков тычиночных нитей с голубых на розовые (рецессивные мутационные события – РМС) и появление бесцветных клеток (белые мутационные события – БМС). Кроме соматических мутаций (РМС и БМС), при тестировании также определяются морфологические изменения волосков – карликовые (невыжившие) волоски (НВ) и разветвлённые волоски (РВ).

Применение микроядерного теста (Трад-МЯ) позволяет фиксировать появление хромосомных aberrаций (acentрические фрагменты или отстающие хромосомы), которые регистрируются в виде микроядер (МЯ) на стадии тетрад микроспор при нарушении процесса микроспорогенеза. При тестировании с применением данного теста учитываются два

тест-критерия: процент тетрад с микроядрами и процент микроядер в тетрадах.

Биотестирование проводили по стандартным методикам [11, 12]. В исследуемых водных образцах определяли концентрации некоторых элементов, в том числе и тяжёлых металлов (Ca, Na, K, Cu, Zn, Cr, Co, Mo, Ni, Pb). Проводили корреляционный анализ между частотой мутационных событий в ВТН, а также частотой встречаемости микроядер в тетрадах микроспор и концентрацией химических элементов в исследуемых водных пробах.

Все полученные результаты были статистически обработаны с применением компьютерной программы Statgraphics Centurion 16.2.

Результаты и обсуждение

На основании проведённых исследований представлены результаты как общего состояния качества воды реки Раздан по химическому составу, так и степени загрязнённости изученных водных образцов на основании биотестирования с помощью основных тест-маркеров традесканции. Общий уровень загрязнения изучаемых водных проб представлен в таблице 1.

Все изученные параметры по своему значению не превышали предельно допустимые нормативы (ПДК). Несмотря на разнообразие химического состава речной воды, среднее содержание элементов в водных образцах характеризуется устойчивостью, свойственной для данной речной системы. Волоски тычиночных нитей в цветках традесканции, в которых происходит активное деление клеток, обладают

Таблица 1 / Table 1
Содержание некоторых химических компонентов в пробах воды реки Раздан
The content of some chemical components in water samples of the Razdan river

Номер пункта отбора Sampling point number	pH	Ca мг/л mg/L	Na мг/л mg/L	K мг/л mg/L	Cu мкг/л µg/L	Zn мкг/л µg/L	Cr мкг/л µg/L	Mo мкг/л µg/L	Ni мкг/л µg/L	Pb мкг/л µg/L
1	8,2	56,1	73,5	6,7	13,1	9,2	0,6	4,0	1,9	1,5
2	8,3	30,1	32,0	5,7	3,9	16,9	0,2	2,2	1,2	2,3
3	8,6	30,1	33,3	5,8	7,5	12,3	0,9	1,9	< 0,8	1,9
4	8,7	44,1	42,5	5,6	6,3	10,0	0,2	1,6	1,1	2,5
5	8,8	38,1	40,0	5,3	5,1	6,1	0,5	2,5	< 0,8	1,4
6	8,8	40,1	41,5	5,7	5,6	13,2	0,5	2,8	0,9	4,4
7	8,8	42,1	41,0	5,6	7,5	6,0	1,1	3,1	< 0,8	2,1
8	9,6	40,1	46,0	7,8	15,5	18,6	1,1	3,8	< 0,8	2,5
Фон Background	7,5	12,9	8,5	1,9	1,1	6,0	0,2	2,1	1,5	2,0

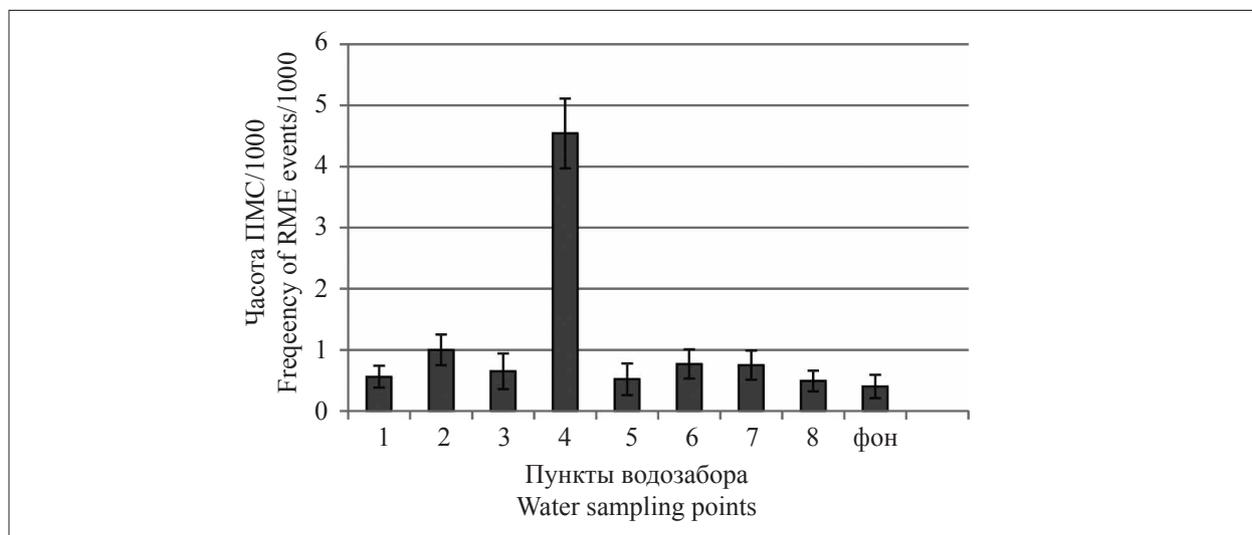


Рис. 1. Частота генотоксических эффектов в соматических клетках традесканции (клон 02) в зависимости от пунктов водозабора: 1 – Корейское ущелье (с. Раздан); 2 – Корейское ущелье (канал Раздан); 3 – Давиташеновский мост; 4 – Киевский мост; 5 – Стадион Раздан; 6 – мост Победы; 7 – улица Раздан; 8 – Ереванское озеро

Fig. 1. Frequency of genotoxic effects in the somatic cells of *Tradescantia* (clone 02) by water sampling points: 1 – Koreyskoye Canyon (Razdan village); 2 – Koreyskoye Canyon (Razdan channel); 3 – Davitashenovskiy Bridge; 4 – Kievskiy Bridge; 5 – Razdan Stadium; 6 – Pobedy Bridge; 7 – Razdan Street; 8 – Lake Yerevanskoje

высокой чувствительностью к воздействию ксенобиотиков. Причиной появления розовых клеток в ВТН могут служить самые разнообразные нарушения генома: aberrации хромосом, генные мутации (точковые), нерасхождения хромосом, митотический кроссинговер. Определение уровня генотоксичности водных образцов р. Раздан по результатам биотеста Трад-ВТН показало, что во всех изученных вариантах наблюдалось достоверное повышение частоты соматических мутаций (РМС и БМС), а также морфологических нарушений в ВТН типа НВ по сравнению с условно фоновым образцом. Уровень мутационных событий – РМС превысил фоновый в 2–11 раз в зависимости от водной пробы (рис. 1).

Наибольшая частота соматических мутаций отмечалась в образце 4 (пункт водозабора – Киевский мост), превысив уровень фона в 11 раз. Следует отметить, что на графике общий мутационный фон представлен равномерно по отношению к фону (за исключением образца 4), но, в данном случае, значения РМС достоверно ($p < 0,05$) отличаются от контроля почти у всех вариантов (исключение составляют только варианты 5 и 8). Частота встречаемости БМС во всех изученных вариантах была выше фонового уровня в 2,5–4,0 раза, с максимальным повышением также в образце 4. В целом, при изучении соматических мутаций наибольшее

повышение уровня РМС и БМС по сравнению с уровнем фона наблюдалось в варианте 4, в то время как минимальное значение частоты мутаций, находящееся на уровне контроля, – в варианте 8 (пункт – Ереванское озеро). Среди наблюдаемых морфологических нарушений (отражающих тератогенные эффекты) в ВТН увеличение частоты встречаемости НВ отмечалось во всех изученных вариантах и их значение превысило фоновый уровень в 6–14 раз ($p < 0,01$). Максимальное значение НВ проявилось в варианте 8, превысив контроль в 14 раз, что может свидетельствовать о наличии в данном образце компонентов, обладающих повышенной тератогенной активностью, приводящей к снижению выживаемости соматических клеток ВТН традесканции.

С целью определения зависимости уровня соматических мутаций от концентрации химических компонентов в водных образцах был проведён корреляционный анализ. По результатам теста Трад-ВТН отмечена достоверная положительная корреляция (r) между уровнем БМС и содержанием в водных пробах Са ($r = 0,62, p = 0,05$) и Рb ($r = 0,67, p = 0,03$), а также – между НВ и Мо ($r = 0,84, p = 0,002$) (табл. 2).

Следующим этапом комплексных исследований было проведение микроядерного теста традесканции, который является наи-

Таблица 2 / Table 2

Коэффициент корреляции (r) между РМС/БМС/НВ и концентрацией химических компонентов в водных образцах р. Раздан
 The coefficient of correlation (r) between RME/WME/NS and concentration of chemical components in the water samples of the Razdan river

Химические компоненты Chemical components	РМС RME	БМС WME	НС NB
Na	$r = 0,05$ ($p = 0,89$)	$r = 0,49$ ($p = 0,15$)	$r = 0,56$ ($p = 0,09$)
K	$r = -0,03$ ($p = 0,93$)	$r = 0,29$ ($p = 0,41$)	$r = 0,33$ ($p = 0,35$)
Ca	$r = 0,19$ ($p = 0,58$)	$r = 0,62$ ($p = 0,05$)	$r = 0,46$ ($p = 0,18$)
Cr	$r = -0,22$ ($p = 0,54$)	$r = 0,08$ ($p = 0,82$)	$r = 0,16$ ($p = 0,65$)
Ni	$r = 0,10$ ($p = 0,77$)	$r = 0,39$ ($p = 0,25$)	$r = 0,23$ ($p = 0,53$)
Cu	$r = -0,11$ ($p = 0,77$)	$r = 0,08$ ($p = 0,81$)	$r = 0,21$ ($p = 0,57$)
Zn	$r = -0,04$ ($p = 0,91$)	$r = 0,11$ ($p = 0,76$)	$r = 0,07$ ($p = 0,84$)
Mo	$r = -0,23$ ($p = 0,52$)	$r = 0,42$ ($p = 0,23$)	$r = 0,84$ ($p = 0,002$)
Pb	$r = 0,20$ ($p = 0,57$)	$r = 0,67$ ($p = 0,03$)	$r = 0,57$ ($p = 0,08$)

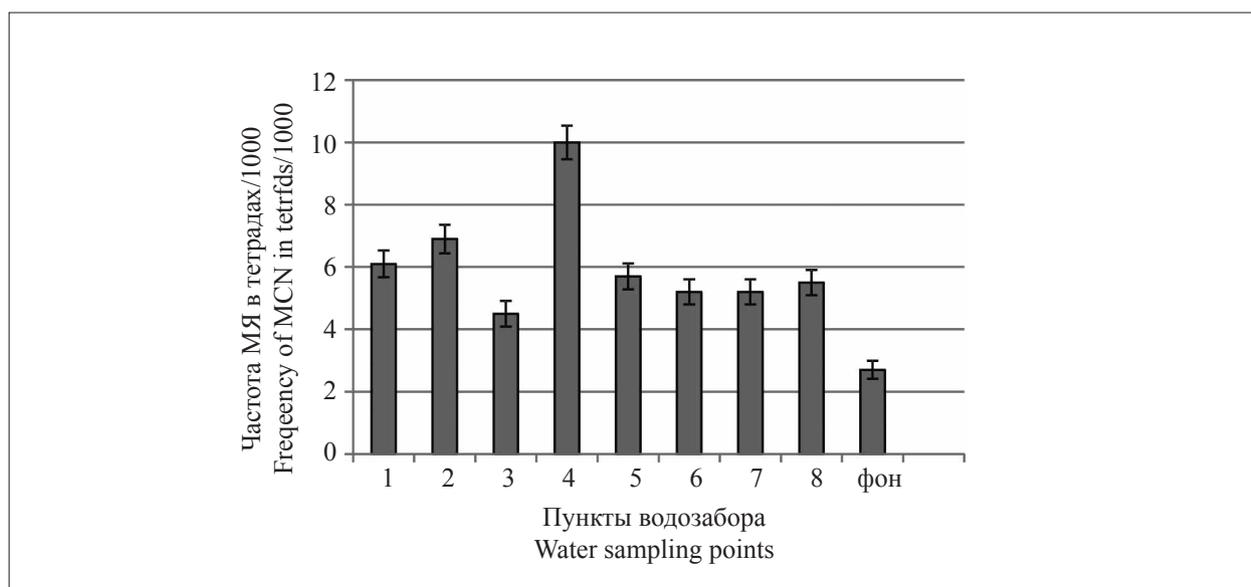


Рис. 2. Частота кластогенных эффектов в спорогенных клетках традесканции (клон 02) в зависимости от пунктов водозабора
 Fig. 2. Frequency of clastogenic effects in the sporogenous cells of *Tradescantia* (clone 02) by water sampling points

более чувствительным тестом для оценки степени загрязнения среды. При воздействии мутагенных факторов частота формирования микроядер в тетрадах микроспор увеличивается, что позволяет количественно судить о степени повреждения хромосом во время мейоза. По результатам теста Трад-МЯ изучение кластогенных эффектов в спорогенных клетках традесканции показало увеличение частоты обоих тест-критериев в 1,5–3,5 раза во всех изученных вариантах по сравнению с фоновым уровнем. Наибольшая частота встречаемости МЯ наблюдалась в варианте 4 (Киевский мост), где оба тест-критерия пре-

вышали уровень фона в 3,0–3,5 раза соответственно. В остальных вариантах проявление кластогенных эффектов находилось на одном уровне и превышало фоновый в 1,5–2,0 раза ($p < 0,05$) в зависимости от образца (рис. 2).

В данном случае увеличение частоты появления микроядер свидетельствует о наличии кластогенного эффекта, оказываемого водными пробами р. Раздан на процесс микроспорогенеза в спорогенных клетках традесканции. На основании проведённого корреляционного анализа между параметрами обоих тестов была выявлена достоверная положительная корреляция между частотой РМС и БМС биотеста

Таблица 3 / Table 3

Коэффициент корреляции между частотой РМС/БМС и частотой МЯ
Correlation between RME/WME/NS and MN frequency

Мутации Mutation	МЯ в тетрадах MN in tetrads	Тетрады с МЯ Tetrads with MN
РМС/RME	$r = 0,85$ ($p = 0,001$)	$r = 0,84$ ($p = 0,02$)
БМС/WME	$r = 0,79$ ($p = 0,006$)	$r = 0,83$ ($p = 0,02$)

Трад-ВТН и тест-критериями микроядерного теста (табл. 3).

Существование тесной (прямой) связи между появлением микроядер и частотой розовых клеток в ВТН ($r = 0,85; p = 0,001$) может свидетельствовать о том, что в данном случае одной из причин появления точковых (розовых) мутаций являются делеции хромосом.

Как известно, экологическое состояние водных объектов, находящихся на урбанизированных территориях (особенно, в пределах крупных городов) в значительной мере определяется совокупным воздействием многих техногенных факторов. Особенно это отражается на городских речных системах, аккумулирующих в водной среде целый комплекс ионов металлов-поллютантов, которые наряду с общей фитотоксичностью, проявляют и генотоксическую активность при действии на растительные клетки, повреждая ядерный аппарат, а также нарушая прохождение митоза и цитокенеза [13]. В частности, антропогенное влияние на реки, протекающие по территории мегаполисов, не ограничивается только отходами промышленности, здесь важную роль играют попадание воды при смыве с улиц, промплощадок, бензоколонок, свалок во время дождей и снеготаяния, а также выбросы автомобильного транспорта. Помимо основных компонентов (ионов), определяющих характер химического состава речной воды, в ней присутствует также большое число других макро- и микроэлементов. Все эти факторы вносят существенный вклад в антропогенную нагрузку на речные экосистемы. В связи с этим следует отметить, что р. Раздан является наиболее крупной водной артерией г. Еревана и на протяжении длительного периода подвергается многофакторному техногенному воздействию, особенно на 25-ти километровом отрезке своего течения. Наиболее загрязнённый по изученным показателям водосборный пункт «Киевский мост» находится в самом густонаселённом районе города на пересечении транспортных магистралей, где протекающая р. Раздан, кроме природного, испытывает постоянное антропогенное влияние локальных загрязни-

телей (сброс сточных вод автомоек и других объектов инфраструктуры, расположенных по берегу реки). Особенно это проявляется в весенний период, при таянии снегов и ливневых стоках, когда в речной воде часто отмечается повышенное содержание таких тяжёлых металлов, как Cu, Zn, Ni, Pb, Cr, и других токсичных компонентов. Известно, что токсичность металла/металлоида в среде в чистом виде меньше, чем в сочетании с другими металлами (аддитивный токсический эффект). Кроме того, при содержании каждого из металлов/металлоидов меньшем, чем ПДК (или в пределах ПДК), появление так называемого техногенного токсикоза становится более вероятным, особенно при попадании в растения. В водной среде металлы находятся в растворённом виде и поэтому степень их проникновения зависит также и от формы нахождения металла. В связи с этим при рассмотрении причины высокой токсичности водного образца пункта водосбора «Киевский мост» можно предположить, что, несмотря на малоотличающийся по концентрации химический состав данной пробы от других вариантов, имеет место сложная многокомпонентная система взаимодействия водной среды с клетками традесканции, вызывающая аддитивный токсический эффект. И в данном случае высокий уровень появления генотоксических и кластогенных эффектов может быть обусловлен не только составом водной пробы, но и, возможно, наличием веществ-ксенобиотиков и микроэлементов, которые в данном исследовании не определяли.

Заключение

На основании проведённых исследований по результатам изучения частоты нарушений в ВТН показано генотоксическое и тератогенное действие исследуемых образцов р. Раздан на соматические клетки традесканции, которое выражается в достоверном повышении уровня рецессивных мутаций и морфологических нарушений типа НВ. Увеличение частоты формирования микроядер, как результат повреждения хромосом

в период микроспорогенеза, свидетельствует о наличии кластогенного эффекта, оказываемого водными пробами р. Раздан на спорогенные клетки традесканции. Таким образом, по результатам обоих биотестов выражено повышение уровня генотоксичности и кластогенности за исследуемый период свидетельствует о загрязнённости воды р. Раздан различного рода поллютантами в тестируемых пунктах отбора воды (с наибольшим уровнем в пробе 4 – Киевский мост). Появление наблюдаемых эффектов, по-видимому, обусловлено накоплением в речной воде соединений тяжёлых металлов и других токсичных компонентов, что могло привести к повышению уровня мутагенности тестируемых водных образцов.

Полученные нами результаты показали, что тест-системы Трад-ВТН и Трад-МЯ клона 02 традесканции обладают высокой чувствительностью и обеспечивают адекватную оценку мутагенной и кластогенной активности воды р. Раздан. Данные тесты могут быть использованы в качестве биоиндикаторов интегральной оценки степени загрязнения речных экосистем.

References

1. Konstantinov A.S. General hydrobiology. Moskva: Vysshaya shkola, 1989. 480 p. (in Russian).
2. Musaelyan S.M. Water resources of Armenia. Yerevan, 1989. 206 p. (in Armenian).
3. Chilingaryan L.A., Mnatsakanyan B.P., Agababyan K.A., Tokmadjian O.V. Hydrography of rivers and lakes of Armenia. Yerevan: Agropress, 2002. 62 p. (in Russian).
4. Vulnerability of water resources in the Republic of Armenia under climate change (country report). Yerevan: UNDP, 2013. 56 p.
5. Avagyan A.B., Shirokov V.M. Rational use and protection of water resources. Yekaterinburg: Nauka, 1994. 320 p. (in Russian).
6. Melechova O.P., Egorova E.I. Biological control of environment: bioindication and biotesting. Moskva: Akademia, 2007. 288 p. (in Russian).
7. Alekseyevskiy N.I. Genetical analysis of water quality. Moskva: MGU, 1993. 135 p. (in Russian).
8. Grant W.F. The present status of higher plant bioassay for the detection of environmental mutagens // Mutation Research. 1994. V. 310. No. 2. P. 175–185. doi: 10.1016/0027-5107(94)90112-0
9. Zhukova A.A., Mastitsky S.E. Bioindication of the quality of the natural environment. Minsk: BSU, 2014. 112 p. (in Russian).
10. Avalyan R.E., Aghajanyan E.A., Khosrovyan A., Atoyants A.L., Simonyan A.E., Aroutiounian R.M. Assessment of mutagenicity of water from Lake Sevan, Armenia with application of *Tradescantia* (clone 02) // Mutation Research. 2017. V. 800. P. 8–13. doi: 10.1016/j.mrfmmm.2017.03.006
11. Ma T.H., Cabrera G.L., Cebulka-Wasilevska A., Chen R., Loarca A.L., Vandenberg A.L., Salamone M.F. *Tradescantia* stamen hair mutation bioassay // Mutation Research. 1994. V. 310. No. 2. P. 211–220. doi: 0027-5107/94//S07.00
12. Ma T.H., Cabrera G.L., Chen R., Gill B.S., Sandhu S.S., Vandenberg A.L., Salamone M.F. *Tradescantia* micronucleus bioassay // Mutation Research. 1994. V. 310. No. 2. P. 220–230. doi: 0027-5107/94//S07.00
13. Shmatko I.T., Grigoryuk I.A., Shvedlova O.E. Sustainability of plants to water and temperature stress. Kiev: Naukova Dumka, 1989. 224 p. (in Russian).