Трансформация экосистем
Ecosystem Transformation

ISSN 2619-0931 Online
www.ecosysttrans.com

DOI: https://doi.org/10.23859/estr-250114
EDN: https://elibrary.ru/wrmhqo
УДК 57.087

Научная статья

Автоматизированный сбор массива данных в острых и хронических фитотестах

А.М. Шеромов, А.С. Олькова*, Е.В. Товстик

Вятский государственный университет, 610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36

**morgan-abend@mail.ru*

Аннотация. Целью данной работы была разработка алгоритма фитотестирования, включающего автоматизированное измерение морфометрических параметров растений и первичную обработку данных средствами программы ImageJ. Материалами исследований служили фотоснимки 7-дневных проростков клевера (*Trifolium pratense* L.), подвергшихся краткосрочному воздействию (7 суток) хлорида меди в растворе (5, 10 и 15 мг/л в пересчете на ионы меди (II)), и фотоснимки подфлагового листа ячменя (*Hordeum vulgare* L.), выращенного в почве, загрязненной кадмием (19.2 ± 1.5 мг/кг) в течение 60 суток. Опыты выполнены в трехкратной повторности, n = 20. Предложен алгоритм работы с фотоснимками: от разделения снимка на цветовые каналы и сегментации изображения до исключения 5% экстремальных значений выборки. В острых испытаниях на *T. pratense* показано, что стандартное отклонение среднего составляет 5–11% при измерении длины корней, 3–7% – ростков. В хронических опытах на *H. vulgare* стандартные отклонения колебались от 11 до 21% для линейных показателей и достигали 33% для площади листа. Сделаны выводы о пригодности предложенного алгоритма для оценки острой фитотоксичности и необходимости доработки методических и статистических аспектов хронических фитотестов. Главными преимуществами фитотестирования со сбором и обработкой данных в ImageJ являются возможность отсроченных измерений фитообъектов по фото и оценка параметров геометрически сложных объектов.

Ключевые слова: биотестирование, Image, ImageJ, тяжелые металлы, токсичность, обработка биологических данных

ORCID:
А.М. Шеромов, https://orcid.org/0009-0005-8691-4042
А.С. Олькова, https://orcid.org/0000-0002-5798-8211
Е.В. Товстик, https://orcid.org/0000-0003-1861-6076

Для цитирования: Шеромов, А.М. и др., 2025. Автоматизированный сбор массива данных в острых и хронических фитотестах. *Трансформация экосистем* **8** (4), 205–214. https://doi.org/10.23859/estr-250114

Поступила в редакцию: 14.01.2025
Принята к печати: 05.04.2025
Опубликована онлайн: 12.12.2025

DOI: https://doi.org/10.23859/estr-250114
EDN: https://elibrary.ru/wrmhqo
UDC 57.087

Article

Automated data collection in acute and chronic phytotests

A.M. Sheromov, A.S. Olkova*, E.V. Tovstik

Vyatka State University, Moskovskaya St. 36, Kirov, 610000 Russia

**morgan-abend@mail.ru*

Abstract. The purpose of this work was to develop a phytobioassay algorithm including the automated measurement of plant morphometric parameters and primary data processing using the ImageJ software. The objects of the study were pictures of 7-day *Trifolium pratense* L. clover seedlings exposed to short-term (7 days) copper chloride solutions (5, 10 and 15 mg/L in terms of copper (II) ions) and pictures of the subflag leaf of *Hordeum vulgare* L. barley grown in soil contaminated with cadmium (19.2 ± 1.5 mg/kg) for 60 days. The experiments were performed in 3 replicates with n = 20. An algorithm for working with the pictures, including such steps as dividing a photo into color channels and image segmentation up to excluding 5% of extreme sample values, was proposed. In acute tests on *T. pratense*, the standard deviation (SD) made up 5–11% when measuring the length of roots and 3–7% for sprouts. In chronic experiments on *H. vulgare*, SD for linear parameters (leaf length and width) fluctuated from 11 to 21% and reached 33% for the leaf area. Conclusions were made about the suitability of the proposed algorithm for assessing acute phytotoxicity and the need to refine the methodological and statistical aspects of chronic phytotests. The main advantages of phytobioassay with data collection and processing in ImageJ are the possibility of delayed measurements of phytoobjects from a photo and assessment of the parameters of geometrically complex objects.

Keywords: bioassay, Image, ImageJ, heavy metals, toxicity, biological data processing

ORCID:
A.M. Sheromov, https://orcid.org/0009-0005-8691-4042
A.S. Olkova, https://orcid.org/0000-0002-5798-8211
E.V. Tovstik, https://orcid.org/0000-0003-1861-6076

To cite this article: Sheromov, A.M. et al., 2025. Automated data collection in acute and chronic phytotests. *Ecosystem Transformation* **8** (4), 205–214. https://doi.org/10.23859/estr-250114

Received: 14.01.2025
Accepted: 05.04.2025
Published online: 12.12.2025

Введение

Использование компьютерного зрения (КЗ) для извлечения информации из фото- и видеофайлов приходит на смену прямым измерениям объектов окружающей среды (Олькова и Медведева, 2023). КЗ позволяет увеличивать объемы получаемых и обрабатываемых данных, а также количество измеряемых параметров, избавляет от субъективных оценок биологических макро- и микрообъектов, снижает затраты на исследование, дает возможность разрабатывать новые методы биодиагностики с использованием информационных технологий. Посредством КЗ возможно получать экологические данные нового поколения с высокой скоростью, точностью и надежностью (Lopez-Marcano et al., 2021).

В настоящее время автоматизация стала одним из направлений развития методов биотестирования, биодиагностики и экологического мониторинга (Olkova and Tovstik, 2024). Особенно актуальна автоматизация в фитотестировании, в котором согласно действующим методикам (ГОСТ Р ИСО 18763-2019[1], ФР.1.31.2012.11560[2], МР 2.1.7.2297-07[3]) основным инструментом измерения является линейка. При этом, как известно, ручные замеры линейных параметров роста растений не только трудозатратны, но и могут приводить к погрешности результатов ввиду сложной геометрии объектов (Fiskesjö, 1985).

В мировой практике накоплен значительный опыт автоматизированной оценки морфологических параметров растений при биотестировании, биоиндикации, оценке эффективности сельскохозяйственных мероприятий (Li et al., 2020, Železnikar et al., 2025). Однако специализированные программные продукты нередко имеют высокую стоимость, а их использование ограничено авторскими правами. В данном случае программа ImageJ и ее версия ImageJ Fiji выгодно отличаются: находятся в открытом доступе и не нарушают авторские права.

ImageJ – это программа для обработки изображений, ставшая важным инструментом в научных исследованиях, особенно в области естественных наук (Curtis et al., 2017). Программа написана на языке Java и известна своей возможностью расширения через дополнительные программные модули. Пользователи могут создавать новые плагины или записывать макросы, чтобы адаптировать функционал программы под необходимые задачи (Kainz et al., 2015).

В течение последних десятилетий программа ImageJ была в числе «первопроходцев в качестве открытых инструментов для анализа научных изображений» (Schneider et al., 2012). Запрос «ImageJ» в базе открытых публикаций ScienceDirect только в рамках тематической области «науки об окружающей среде» дает около 14 тысяч публикаций за 2014–2024 гг. Из них около 1000 откликаются на уточнение «Plant Bioassay». При этом согласно экспериментальным сравнениям (Tajima and Kato, 2011) коэффициент корреляции между оценками длины корня, полученными с помощью ImageJ и дорогостоящей программы для фенотипирования архитектуры корневой системы WinRHIZO чрезвычайно высок (r = 0.986).

Тем не менее, дальнейший анализ информации показал, что единого протокола использования инструментов ImageJ для фитотестирования нет. Так, длина листа и в особенности его фрактальная размерность оказались хорошими индикаторами реакции растений на токсичные вещества в окружающей среде (Bialowiec et al., 2010). В работе C. Eichberg et al. (2024) оценивали фитотоксичность антибиотиков по реакциям *Carum carvi* L., *Centaurea jacea* L., *Dactylis glomerata* L., *Silene latifolia* (Poir.): всхожесть определяли визуально, длину корней 7-дневных сеянцев определяли с помощью инструментов ImageJ максимум по пяти экземплярам (в среднем 3.0 ± 1.7), выбранным случайным образом из выборки в 50 штук. Для полевых испытаний биоугля на посевах кукурузы были совместно использованы ресурсы VG StudioMAX 3.2 – для построения 3D-модели корней и ImageJ с плагинами Skeletonise 3D и Analysis Skeleton – для определения длины, извилистости и угла наклона корней (Ruan et al., 2024).

Целью данной работы была разработка алгоритма фитотестирования, включающего автоматизированное измерение морфометрических параметров растений и первичную обработку данных средствами программы ImageJ.

---

[1] ГОСТ Р ИСО 18763-2019. Качество почвы. Определение токсического воздействия загрязняющих веществ на всхожесть и рост на ранних стадиях высших растений.

[2] ФР.1.31.2012.11560. Методика измерений биологической активности гуминовых веществ методом фитотестирования («Фитоскан»).

[3] МР 2.1.7.2297-07. Методические рекомендации. Обоснование класса опасности отходов производства и потребления по фитотоксичности («Фитотест»).

Материалы и методы исследования

Для получения фотоданных и дальнейшей апробации программы ImageJ проводили два независимых эксперимента по воздействию тяжелых металлов на растения.

Результаты острого токсического действия получали в опытах на 7-дневных проростках клевера (*Trifolium pratense* L.), подвергшихся краткосрочному воздействию различных концентраций хлорида меди в растворе (5, 10 и 15 мг/л, что соответствует 5, 10 и 15 ПДК в пересчете на ионы меди (II)[4]. Растворы для фитотестирования готовили на воде питьевого качества. Контролем служила вода без добавления соли. Проращивание семян (20 шт.) осуществляли в чашках Петри в лабораторных условиях: при температуре 20 ± 2 °C и освещенности 250 Люкс в течение 7 суток. Повторность опыта трехкратная.

Данные по хронической интоксикации получали в опытах на растениях ячменя (*Hordeum vulgare* L.). Модельным токсикантом служил сульфат кадмия (II) в виде кристаллогидрата ($3CdSO_4 \cdot 8H_2O$). Раствор токсиканта вносился в вегетационные емкости, наполненные дерново-подзолистой почвой легкого гранулометрического состава. Поскольку в нормативной документации не приводятся значения ПДК и ОДК для подвижных соединений кадмия, уровень моделируемого загрязнения сопоставляли с ОДК по валовым формам (1 мг/кг)[4]. Он составил 19.2±1.5 мг/кг, что соответствовало 19.2 ОДК. Контролем служила почва без внесения кадмия. Растения выращивались в климатических условиях Кировской области (умеренно континентальный климат) в течение 60 суток с мая по июль. По мере пересыхания почвы и в период длительного отсутствия осадков осуществлялся дополнительный полив растений водопроводной водой. На стадии кущения с 20 растений опытного и контрольного варианта срезали подфлаговый лист. Выбор листа обусловлен корреляцией его площади (Босиева и др., 2021) и содержания пигментов (Носкова и др., 2019) с урожаем зерна – итоговой характеристикой благополучного развития растения.

Проростки клевера и листья ячменя фотографировали на камеру смартфона SONY ALPHA SLT-A58K с разрешением 20.1 Мп. Изображения обрабатывали посредством ImageJ[5]. С помощью программы у проростков клевера измеряли длину корня и ростка, у листьев ячменя – длину и ширину, а также путем сегментации изображений получали информацию о площади. Данные представляли в виде M ± SD, где M – среднее значение измеренных параметров, SD – стандартное отклонение. Ряды данных сравнивали методом однофакторного дисперсионного анализа в программе STATGRAPHICS Centurion XV.I (StatPoint Inc., США).

Результаты и их обсуждение

Сбор первичных данных

Общий алгоритм работы с фотоснимками и первичной обработки данных включал следующие операции:

1. Запуск программы ImageJ, загрузка снимка (команда «File – Open»).

2. Разделение снимка на цветовые каналы («Split Channels») с последующим выбором наиболее контрастного (наименее контрастные кадры свернуть/закрыть).

3. Автоматическая сегментация изображения на черный фон и белые объекты измерений («Make Binary»).

4. Калибровка шкалы («Analyze – Set Scale») для перевода пикселей в необходимые единицы измерения. При помощи инструмента для измерения прямых линий («Straight Line») выделяют объект с известным размером и устанавливают во всплывающем окне масштаб и единицы измерения. Таким объектом чаще всего является линейка, сфотографированная вместе с растениями.

5. Измерение длины (Рис. 1**А**) и площади объектов (Рис. 1**В**) инструментами «Segmented Line» и «Wand». Расстановка маркерных точек для измерения длины производится оператором вручную нажатием левой кнопкой мыши. Количество маркерных точек зависит от кривизны объекта. Точки обязательно ставятся на изгибы. Выделение контура объектов для измерения площади происходит автоматически. При необходимости снимок можно масштабировать инструментом «Magnifying glass».

---

[4] СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.

[5] Image J. Интернет-ресурс. URL: https://imagej.net/ij/ (дата обращения: 11.09.2025).

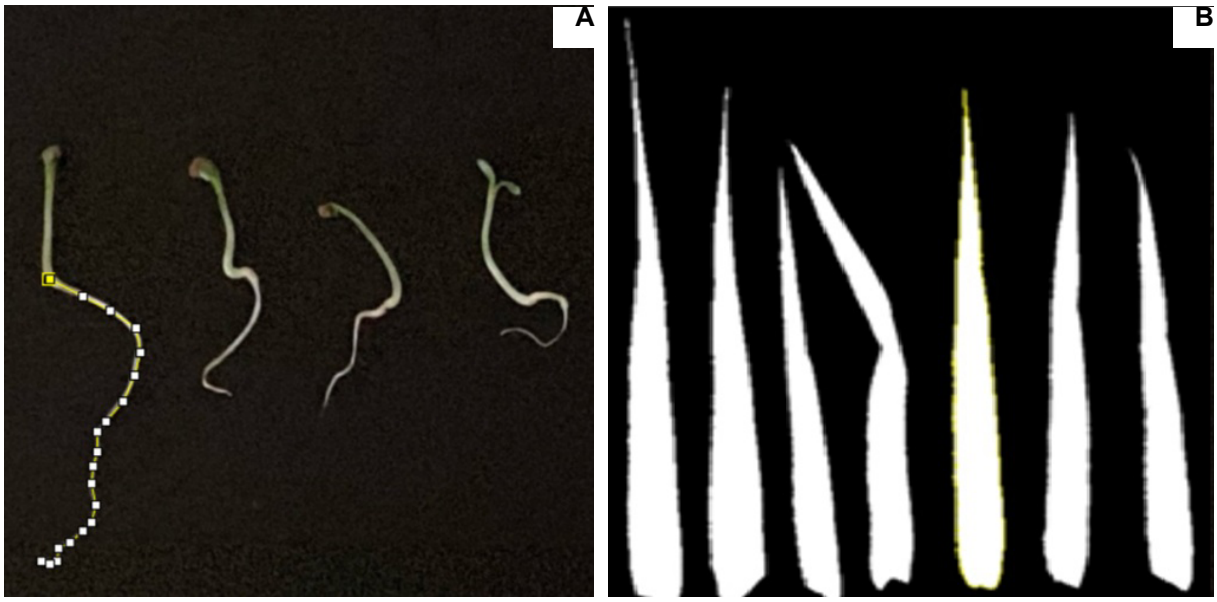

Рис. 1. Расстановка маркерных точек на корне проростка клевера при измерении его длины (**A**) и результат получения черно-белого изображения при измерении площади листьев ячменя (**B**) в программе ImageJ.

6. Обработка нескольких снимков из одной экспериментальной серии проводится последовательно с калибровкой шкалы единиц измерения для каждого. При этом данные автоматически объединяются в таблицу результатов, которую можно увидеть, нажав кнопку «Results».

7. Вывод результата отдельных измерений в таблицу данных командой «Analyze – Measure» или комбинацией клавиш «Ctrl + M» (Рис. 2).

8. Экспорт данных в формат Excel для дальнейшего анализа.

В таблице данных ImageJ отображаются результаты первичной математической обработки результатов измерений с указанием минимальных и максимальных значений (Рис. 2**A**).

При обработке данных в Excel 5% экстремальных значений выборки исключали, чтобы получить 10%-ное усеченное среднее, которое дает более точное представление о «среднем» значении в наборе данных (Рис. 2**B**). Аналогичный подход с получением усеченных средних значений используется при анализе морфометрических характеристик в медицинских исследованиях (Гаттаров и др., 2007).

Оценка результатов острого и хронического фитотестирования

Реализацию алгоритма апробировали в условиях двух стандартных фитотоксикологических экспериментов (Рис. 3, Табл. 1). Известно, что проростки из мелких семян по сравнению с крупными более подвержены токсическим воздействиям из-за ограниченного объема запасных питательных веществ (Терехова и др., 2014). Однако, несмотря на большую чувствительность, измерение линейных размеров проростков, полученных из таких семян, вручную сложно выполнять из-за небольшого размера и изогнутости формы корней.

При автоматическом измерении длины корня с исключением экстремальных (крайних) значений выборки было достигнуто значение стандартного отклонения в пределах 5–11% от средних значений; при измерении ростков – 3–7%. Для морфометрических показателей растений это достаточно хороший результат[6]. Низкие концентрации ионов меди (II) (5, 10 ПДК) не влияли на длину корня ($p > 0.05$), высокая (15 ПДК) стимулировала его рост. Наблюдаемые эффекты меди (гормезис) согласуются с данными о ее биологическом действии (Живухина и Ертикеева, 2019) и косвенно указывают на надежность результатов, полученных с помощью программы.

В эксперименте по оценке хронического воздействия кадмия помимо линейных параметров (длина листа и ширина максимально широкой его части) определяли площадь листа (Табл. 1).

[6] ФР.1.39.2006.02264. МВИ всхожести семян и длины корней проростков высших растений для определения токсичности техногенно-загрязненных почв М-П-2006.

A

	Label	Area	Mean	Min	Max	Length
1		0.018	146.952	30.134	246.850	1.918
2		0.017	188.835	10.180	251.664	1.898
3		0.011	208.280	85.539	250.512	1.234
4		0.013	167.991	24.307	251.453	1.366
5		0.009	218.073	166.886	250.623	0.960
6		0.006	210.373	7.586	251.650	0.690
7		0.014	163.357	6.478	252.401	1.519
8		0.013	146.749	6.046	223.000	1.457
9		0.008	130.261	4.602	232.732	0.907
10		0.008	173.871	18.160	236.733	0.907
11		0.003	180.398	83.333	217.000	0.330
12		0.005	172.278	59.350	222.967	0.514
13		0.012	133.608	1.965	191.749	1.325
14		0.010	158.923	8.758	206.621	1.034
15		0.024	61.722	1.323	189.990	2.643
16		0.012	129.188	0.826	207.266	1.370
17	Mean	0.011	161.929	32.217	230.201	1.255
18	SD	0.005	38.629	45.607	22.326	0.579
19	Min	0.003	61.722	0.826	189.990	0.330
20	Max	0.024	218.073	166.886	252.401	2.643

Первичные статистические данные без корректировки

B

	A	B	C	D	E	F	G
1			0,018	146,952	30,134	246,850	1,918
2			0,017	188,835	10,180	251,664	1,898
3			0,011	208,280	85,539	250,512	1,234
4			0,013	167,991	24,307	251,453	1,366
5			0,009	218,073	166,886	250,623	0,960
6			0,006	210,373	7,586	251,650	0,690
7			0,014	163,357	6,478	252,401	1,519
8			0,013	146,749	6,046	223,000	1,457
9			0,008	130,261	4,602	232,732	0,907
10			0,008	173,871	18,160	236,733	0,907
11			0,005	172,278	59,350	222,967	0,514
12			0,012	133,608	1,965	191,749	1,325
13			0,010	158,923	8,758	206,621	1,034
14			0,012	129,188	0,826	207,266	1,370
15	Mean		0,011	161,929	32,217	230,201	1,221
16	SD		0,005	38,629	45,607	22,326	0,414
17	Min		0,003	61,722	0,826	189,990	0,514
18	Max		0,024	218,073	166,886	252,401	1,918

Данные после корректировки

Рис. 2. Таблица данных ImageJ (**A**), экспорт в Excel (**B**) с уточнением итогового результата в виде M ± SD.

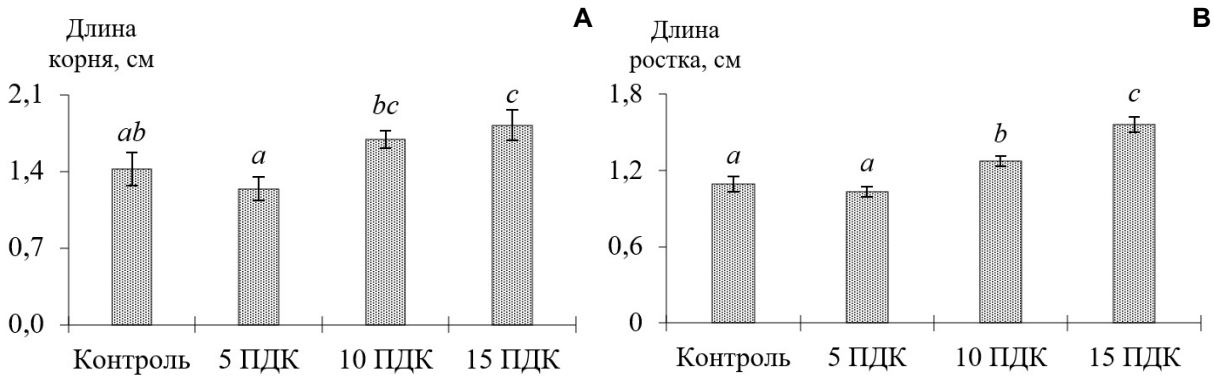

Рис. 3. Влияние ионов меди (II) на длину корня (**A**) и ростка (**B**) проростка клевера.

Табл. 1. Размеры подфлагового листа *H. vulgare* в опыте по оценке хронического воздействия кадмия.

Вариант	Длина, см	Ширина, см	Площадь, см^2
Контроль	10.9 ± 1.2	0.77 ± 0.09	4.8 ± 0.8
Кадмий	12.4 ± 2.5	0.81 ± 0.12	5.9 ± 1.9

Данные длительного эксперимента по оценке фитотоксичности отличались повышенным разбросом значений по сравнению с краткосрочным опытом: величина стандартных отклонений варьировала для линейных параметров от 11 до 21%, для площади достигла 33%. Для выборки в 20 экземпляров это приемлемый результат (Любимов и Балина, 2005). Для всех оцениваемых параметров прослеживалась тенденция стимуляции ответной реакции при воздействии кадмия, однако достоверных различий между вариантами опыта выявлено не было. Вероятно, несколько вариантов воздействия с повышением концентрации кадмия вывели бы тенденции в ранг значимых зависимостей, но это не входило в задачи текущей работы.

Тем не менее, можно сказать, что результаты, полученные с помощью предложенного алгоритма, согласуются с данными литературы. Известно, что порог фитотоксичной концентрации

кадмия в почве может быть довольно высоким: 25 мг/кг (Крыленкин и др., 2023). И даже при повышении его содержания в почве до 45 мг/кг визуальные признаки фитотоксичности могут наблюдаться только у корней, в которых кадмий аккумулируется в концентрации в 10 раз более высокой, чем в надземных органах (Sterckeman and Thomine, 2020; Vassilev et al., 1998).

Главным достижением проведенного модельного эксперимента можно назвать автоматизированный сбор морфометрических данных растений. Из них замеры площади различных частей растений – наиболее перспективная для автоматизации операция, выполнение которой вручную весьма трудоемко. Достигнутый уровень точности можно повысить увеличением количества измеряемых объектов.

Заключение

Использование фотоснимков – не только удобный, но и эффективный способ получения информации о растениях. При этом экспериментальные данные можно в любой момент верифицировать или использовать повторно для сравнения с другими объектами. Нами было показано, что использование программы ImageJ для обработки фотоснимков растительных тест-объектов заменяет рутинные процедуры ручного замера и дает результаты приемлемой точности. Программа также дает возможность оценить некоторые тест-функции растений, которые особенно трудно измерить вручную. Так, увеличение и сегментация изображений позволили измерить длину извилистых корней клевера, а также установить площадь подфлагового листа ячменя.

В условиях острого воздействия ионов меди (II) на прорастающие семена клевера было показано, что 20 семян в каждой из трех экспериментальных повторностей достаточно для получения достоверных отличий между вариантами. В то же время хроническое воздействие (на примере токсичности кадмия) было сопряжено с адаптацией растений и вариативностью их морфометрических показателей, поэтому 20 экземпляров в одной параллели опыта оказалось недостаточно.

Новизной проведенной работы является подробная алгоритмизация операций. При этом предложенный алгоритм применим как для определения острых эффектов, так и для оценки хронического действия веществ. Широкие возможности использования алгоритма обеспечены базовыми тест-функциями растений – длиной корня и ростка проростка, площадью листа. Именно они чаще всего оцениваются при фитотестировании во всем мире.

Таким образом, предложенный алгоритм работы со снимками растительных объектов и первичной обработки данных в ImageJ хорошо показал себя на практике. Его можно использовать для оценки острой фитотоксичности сред и объектов. Оценка хронической фитотоксичности – более сложная процедура, требующая дальнейшей проработки методических и статистических аспектов.

Список литературы

Босиева, О.И., Джиоева, Г.Ф., Плиева, Е.А., Туаева, З.З., 2021. Некоторые показатели фотосинтетической производительности озимых зерновых. *Материалы 10-й международной научно-практической конференции Перспективы развития АПК в современных условиях», Т. 1, Владикавказ, 10–11 июня 2021 г.* Владикавказ, Россия, 78–80.

Гаттаров, Р.У., Зубков, С.М., Потапова, Т.В., Мкртумян, А.М., 2007. Исследование показателей функционального состояния студентов трех медицинских групп здоровья. *Человек. Спорт. Медицина* **16**, 69–74.

Живухина, Е.А., Ертикеева, Н.С., 2019. Влияние ионов меди на рост гипокотилей и побегов *Cucumis sativus* и *Cucurbita pepo*. *Известия ФНЦО* **1**, 71–74. https://doi.org/10.18619/2658-4832-2019-1-71-74

Крыленкин, Д.В., Анисимов, В.С., Анисимова, Л.Н., Санжаров, А.И., Фригидов, Р.А., Дикарев, Д.В., Корнеев, Ю.Н., 2023. Подвижность в почве и накопление Zn и Cd в ячмене в условиях совместного загрязнения. *Агрохимический вестник* **1**, 56–63. https://doi.org/10.24412/1029-2551-2023-1-009

Любимов, В.Б., Балина, К.В., 2005. Математические методы в биологии и экологии (учебно-методическое пособие). БГУ, Брянск, 2005, 70 с.

Носкова, Е.Н., Зайцева, И.Ю., Лисицын, Е.М., 2019. Пригодность параметров содержания

пигментов в листьях для селекции ярового ячменя. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета* **6**, 22–26.

Олькова, А.С., Медведева, Е.В., 2023. Обработка видеоизображений *Daphnia magna* Straus (Cladocera, Crustacea) как основа автоматизированных методов биотестирования. *Поволжский экологический журнал* **3**, 301–313. https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-3-301-313

Терехова, В.А., Воронина, Л.П., Гершкович, Д.М., Ипатова, В.И., Исакова Е.Ф. и др., 2014. Биотест-системы для задач экологического контроля : методические рекомендации по практическому использованию стандартизованных тест-культур. Доброе слово, Москва, Россия, 48 с.

Bialowiec, A., Randerson, P.F., Kopik, M., 2010. Using fractal geometry to determine phytotoxicity of landfill leachate on willow. *Chemosphere* **5**, 534–540. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.02.016

Curtis, T.R., Johannes, S., Mark, C.H., Barry, E. De Z., Alison, E.W., Ellen, T.A., Kevin, W.E., 2017. ImageJ2: ImageJ for the next generation of scientific image data. *BMC Bioinformatics* **18**. https://doi.org/10.1186/s12859-017-1934-z

Eichberg, C., Leiß, A., Stothut, M., Bernheine, J., Jurczyk, K. et al., 2024. Tetracycline but not sulfamethazine inhibits early root growth of wild grassland species, while seed germination is hardly affected by either antibiotic. *Environmental Pollution* **363** (1), 125178. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.125178

Fiskesjö, G., 1985. The Allium test as a standard in environmental monitoring. *Hereditas* **102**, 99–112. https://doi.org/10.1111/j.1601-5223.1985.tb00471.x

Kainz, P., Mayrhofer-Reinhartshuber, M., Ahammer, H., 2015. IQM: an extensible and portable open source application for image and signal analysis in Java. *PLoS ONE* **10**, e0116329. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0116329

Li, C., Adhikari, R., Yao, Y., Miller, A.G., Kalbaugh, K., Li D., Nemali, K., 2020. Measuring plant growth characteristics using smartphone based image analysis technique in controlled environment agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture* **168**, 105123. https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105123

Lopez-Marcano, S., Jinks, E.L., Buelow, C.A., Brown, C.J., Wang, D. et al., 2021. Automatic detection of fish and tracking of movement for ecology. *Ecology and Evolution* **12**, 8254–8263. https://doi.org/10.1002/ece3.7656

Olkova, A.S., Tovstik, E.V., 2024. Computer vision – the frontier of modern environmental diagnostics: a review. *Pertanika Journal of Science & Technology* **4**, 1591–1607. https://doi.org/10.47836/pjst.32.4.08

Ruan, R., Zhang, P., Lambers, H., Xie, W., Zhang, Zh. et al., 2024. Biochar application improves maize yield on the *Loess Plateau* of China by changing soil pore structure and enhancing root growth. *Science of The Total Environment* **956**, 177379. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177379

Schneider, C.A., Rasband, W.S., Eliceiri, K.W., 2012. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods* **7**, 671–675. https://doi.org/10.1038/nmeth.2089

Sterckeman, T., Thomine, S., 2020. Mechanisms of cadmium accumulation in plants. *Critical Reviews in Plant Sciences* **4**, 322–359. https://doi.org/10.1080/07352689.2020.1792179

Tajima, R., Kato, Y., 2011. Comparison of threshold algorithms for automatic image processing

of rice roots using freeware ImageJ. *Field Crops Research* **3**, 460–463. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.01.015

Vassilev, A., Tsonev, T., Yordanov, I., 1998. Physiological response of barley plants (*Hordeum vulgare*) to cadmium contamination in soil during ontogenesis. *Environmental Pollution* **2–3**, 287–293. https://doi.org/10.1016/S0269-7491(98)00110-9

Železnikar, Š., Kacjan, M.N., Pintar, M., 2025. Sowing in plastic contaminated soils: how (micro)plastics impact seed germination and growth of white mustard (*Sinapis alba* L.). *Applied Sciences* **15** (12), 6801. https://doi.org/10.3390/app15126801

References

Bialowiec, A., Randerson, P.F., Kopik, M., 2010. Using fractal geometry to determine phytotoxicity of landfill leachate on willow. *Chemosphere* **5**, 534–540. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.02.016

Bosieva, O.I., Dzhioeva, G.F., Plieva, E.A., Tuaeva, Z.Z., 2021. Nekotorye pokazateli fotosinteticheskoi proizvoditel'nosti ozimykh zernovykh [Some indicators of photosynthetic productivity of winter cereals]. *Materialy 10-i mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Perspektivy razvitiia APK v sovremennykh usloviiakh". T. 1 [Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference "Prospects for the Development of the Agro-Industrial Complex in Modern Conditions". Vol. 1],Vladikavkaz, 10–11.06.2021.* Vladikavkaz, Russia, 78–80. (In Russian).

Curtis, T.R., Johannes, S., Mark, C.H., Barry, E. De Z., Alison, E.W., Ellen, T.A., Kevin, W.E., 2017. ImageJ2: ImageJ for the next generation of scientific image data. *BMC Bioinformatics* **18**. https://doi.org/10.1186/s12859-017-1934-z

Eichberg, C., Leiß, A., Stothut, M., Bernheine, J., Jurczyk, K. et al., 2024. Tetracycline but not sulfamethazine inhibits early root growth of wild grassland species, while seed germination is hardly affected by either antibiotic. *Environmental Pollution* **363** (1), 125178. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.125178

Fiskesjö, G., 1985. The Allium test as a standard in environmental monitoring. *Hereditas* **102**, 99–112. https://doi.org/10.1111/j.1601-5223.1985.tb00471.x

Gattarov, R.U., Zubkov, S.M., Potapova, T.V., Mkrtumian, A.M., 2007. Issledovanie pokazatelei funktsional'nogo sostoianiia studentov trekh meditsinskikh grupp zdorov'ia [A study of the functional state indicators of students from three medical health groups]. *Chelovek. Sport. Meditsina [Human. Sports. Medicine]* **16**, 69–74. (In Russian).

Kainz, P., Mayrhofer-Reinhartshuber, M., Ahammer, H., 2015. IQM: an extensible and portable open source application for image and signal analysis in Java. *PLoS ONE* **10**, e0116329. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0116329

Krylenkin, D.V., Anisimov, V.S., Anisimova, L.N., Sanzharov, A.I., Frigidov, R.A., Dikarev, D.V., Korneev, Yu.N., 2023. Podvizhnost' v pochve i nakoplenie Zn i Cd v iachmene v usloviiakh sovmestnogo zagriazneniia [Mobility in soil and accumulation of Zn and Sd in barley under conditions of combined contamination]. *Agrokhimicheskii vestnik [Agrochemical Bulletin]* **1**, 56–63. (In Russian). https://doi.org/10.24412/1029-2551-2023-1-009

Li, C., Adhikari, R., Yao, Y., Miller, A.G., Kalbaugh, K., Li D., Nemali, K., 2020. Measuring plant growth characteristics using smartphone based image analysis technique in controlled environment agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture* **168**, 105123. https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105123

Liubimov, V.B., Balina, K.V., 2005. Matematicheskie metody v biologii i ekologii (uchebno-metodicheskoe

posobie) [Mathematical methods in biology and ecology (study guide)]. Bryansk State University, Bryansk, 2005, 70 p. (In Russian).

Lopez-Marcano, S., Jinks, E.L., Buelow, C.A., Brown, C.J., Wang, D. et al., 2021. Automatic detection of fish and tracking of movement for ecology. *Ecology and Evolution* **12**, 8254–8263. https://doi.org/10.1002/ece3.7656

Noskova, E.N., Zaitseva, I.Yu., Lisitsyn, E.M., 2019. Prigodnost' parametrov soderzhaniia pigmentov v list'iakh dlia selektsii iarovogo iachmenia [Suitability of leaf pigment content parameters for spring barley breeding]. *Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Bulletin of Altai State Agricultural University]* **6**, 22–26. (In Russian).

Ol'kova, A.S., Medvedeva, E.V., 2023. Obrabotka videoizobrazhenii *Daphnia magna* Straus (Cladocera, Crustacea) kak osnova avtomatizirovannykh metodov biotestirovaniia [Processing of video images of *Daphnia magna* Ostrich (Cladocera, Christakea) as a basis for automated biotesting methods]. *Povolzhskii ekologicheskii zhurnal [Povolzhskiy Journal of Ecology]* **3**, 301–313. (In Russian). https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-3-301-313

Olkova, A.S., Tovstik, E.V., 2024. Computer vision – the frontier of modern environmental diagnostics: a review. *Pertanika Journal of Science & Technology* **4**, 1591–1607. https://doi.org/10.47836/pjst.32.4.08

Ruan, R., Zhang, P., Lambers, H., Xie, W., Zhang, Zh. et al., 2024. Biochar application improves maize yield on the *Loess Plateau* of China by changing soil pore structure and enhancing root growth. *Science of The Total Environment* **956**, 177379. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177379

Schneider, C.A., Rasband, W.S., Eliceiri, K.W., 2012. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods* **7**, 671–675. https://doi.org/10.1038/nmeth.2089

Sterckeman, T., Thomine, S., 2020. Mechanisms of cadmium accumulation in plants. *Critical Reviews in Plant Sciences* **4**, 322–359. https://doi.org/10.1080/07352689.2020.1792179

Tajima, R., Kato, Y., 2011. Comparison of threshold algorithms for automatic image processing of rice roots using freeware ImageJ. *Field Crops Research* **3**, 460–463. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.01.015

Terekhova, V.A., Voronina, L.P., Gershkovich, D.M., Ipatova, V.I., Isakova E.F. et al., 2014. Biotest-sistemy dlia zadach ekologicheskogo kontrolia : metodicheskie rekomendatsii po prakticheskomu ispol'zovaniiu standartizovannykh test-kul'tur [Biotest systems for environmental monitoring tasks : guidelines for the practical use of standardized test cultures]. Dobroe slovo, Moscow, Russia, 48 p. (In Russian).

Vassilev, A., Tsonev, T., Yordanov, I., 1998. Physiological response of barley plants (*Hordeum vulgare*) to cadmium contamination in soil during ontogenesis. *Environmental Pollution* **2–3**, 287–293. https://doi.org/10.1016/S0269-7491(98)00110-9

Železnikar, Š., Kacjan, M.N., Pintar, M., 2025. Sowing in plastic contaminated soils: how (micro)plastics impact seed germination and growth of white mustard (*Sinapis alba* L.). *Applied Sciences* **15** (12), 6801. https://doi.org/10.3390/app15126801

Zhivukhina, E.A., Ertikeeva, N.S., 2019. Vliianie ionov medi na rost gipokotilei i pobegov *Cucumis sativus* i *Cucurbita pepo* [The effect of copper ions on the growth of hypocotyls and shoots of *Tsutsumis sativus* and *Cucurbita pepo*]. *Izvestiia FNTSO [News of Federal Scientific Center for Vegetable Growing]* **1**, 71–74. (In Russian). https://doi.org/10.18619/2658-4832-2019-1-71-74