



## ЭКОЛОГИЯ/ECOLOGY

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.69.8>

EDN: IRKDEZ

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦ ТОЛЕРАНТНОСТИ РАСТЕНИЙ К ПОЛЛЮТАНТАМ В ГИДРОПОНИКЕ КАК МОДЕЛЬНОЙ СРЕДЕ

Научная статья

Харитонов А.Э.<sup>1,\*</sup>, Макарова А.С.<sup>2</sup><sup>1</sup> ORCID : 0009-0003-4185-9487;<sup>2</sup> ORCID : 0000-0001-8097-4515;<sup>1,2</sup> Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева, Москва, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (serdiner2016[at]yandex.ru)

Предложена: 20.04.2026; Принята: 13.05.2026; Опубликовано: 19.05.2026

**Аннотация**

Работа посвящена определению границ устойчивости растений к загрязняющим веществам: солям ртути, продуктам нефтегазовой промышленности (WD-40) и поверхностно-активным веществам (ПАВ). В качестве объектов исследования использованы четыре вида растений: горчица сарпетская (*Brassica juncea* (L.) Czern.), редька дайкон (*Raphanus sativus* var. *longipinnatus* L.H.Bailey), клевер луговой (*Trifolium pratense* L.) и базилик обыкновенный (*Ocimum basilicum* L.). Показано, что гидропоника — наиболее точный метод для изучения такого воздействия: она позволяет контролировать условия опыта и исключает почвенные помехи. Критические концентрации поллютантов определены для всех указанных видов. Чтобы избежать взаимодействия между компонентами питательного раствора и свободными ионами тяжёлых металлов, рекомендуется использовать раствор с микроэлементами в хелатной форме. На основе полученных данных намечены пути совершенствования методических приёмов применения гидропонии как аналитического инструмента при отборе видов-фиторемедиаторов для очистки сточных вод и загрязнённых территорий. Каждый вид растений имеет свой индивидуальный порог выносливости к поллютантам, однако действующие нормативные справочники этих порогов не содержат, что подчёркивает актуальность предложенного подхода.

**Ключевые слова:** толерантность растений, гидропоника, экотоксикология, тяжелые металлы, биоаккумуляция, фитоэкстракция.

## DETERMINATION OF PLANT TOLERANCE LIMITS TO POLLUTANTS IN HYDROPONICS AS A MODEL ENVIRONMENT

Research article

Haritonov A.E.<sup>1,\*</sup>, Makarova A.S.<sup>2</sup><sup>1</sup> ORCID : 0009-0003-4185-9487;<sup>2</sup> ORCID : 0000-0001-8097-4515;<sup>1,2</sup> D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

\* Corresponding author (serdiner2016[at]yandex.ru)

Suggested: 20.04.2026; Accepted: 13.05.2026; Published: 19.05.2026

**Abstract**

The work is devoted to determining the tolerance limits of plants to pollutants: mercury salts, oil and gas industry products (WD-40), and surfactants. Four plant species were used as the objects of the study: Indian mustard (*Brassica juncea* (L.) Czern.), daikon radish (*Raphanus sativus* var. *longipinnatus* L.H.Bailey), red clover (*Trifolium pratense* L.), and common basil (*Ocimum basilicum* L.). Hydroponics is shown to be the most accurate method for studying such effects because it allows controlling experimental conditions and eliminates soil interference. Critical pollutant concentrations were determined for all the species mentioned. To avoid interactions between nutrient solution components and free heavy metal ions, it is recommended to use a solution with micronutrients in chelated form. Based on the data obtained, ways to improve the methodological approaches of using hydroponics as an analytical tool for selecting phytoremediator species for wastewater and contaminated land remediation are outlined. Each plant species has its own individual threshold of tolerance to pollutants; however, current regulatory reference books do not contain these thresholds, which highlights the relevance of the proposed approach.

**Keywords:** plant tolerance, hydroponics, ecotoxicology, heavy metals, bioaccumulation, phytoextraction.

**Введение**

Загрязнение окружающей среды промышленными стоками — одна из острейших экологических проблем нашего времени [1]. После промышленной революции около 19% мировых сельскохозяйственных угодий утратили плодородие вследствие воздействия производственных отходов. Один из ключевых примеров — Усольехимпром в Иркутской области. После банкротства предприятия в 1990-х годах разрушение защитных барьеров привело к многолетнему поступлению солей тяжёлых металлов, ртути и кадмия в окружающую среду, постепенно отравившему почву и воздух целого города [3].

Цель данной работы — совершенствование ранее известных методических приёмов применения гидропоники как инструмента оценки толерантности растений к загрязнённым средам, а также уточнение критических концентраций поллютантов для ряда растений-фиторемедиаторов. Для её достижения мы сочетали лабораторные опыты, анализ научной литературы, статистическую обработку данных, натурные наблюдения и системный подход, объединяющий аналитические и синтетические методы.

В данном случае, гидропоника — как технология беспочвенного выращивания растений в питательном растворе [4] — даёт исследователю возможность точно задавать и варьировать освещение, состав питания, температуру, влажность, pH и электропроводность (ЕС). Благодаря этому можно надёжно устанавливать, как те или иные условия влияют на рост и жизнеспособность растений, — без помех, характерных для полевых опытов. Блок-схема контролируемых параметров представлена на Рисунке 1.



Рисунок 1 - Блок-схема контролируемых параметров при использовании гидропоники  
DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.69.8.1>

Несмотря на то, что на долю работ, использующих гидропонику для оценки толерантности растений к тяжёлым металлам, приходится около 1,5% от общего массива публикаций по гидропонным технологиям [5], этот подход обладает рядом неоспоримых преимуществ. Растения культивируют в растворе с точно заданными концентрациями металлов — цинка, меди, кадмия, никеля, хрома — и отслеживают накопление каждого из них. В отличие от почвенных экспериментов, здесь исключены гуминовые кислоты, органические примеси и другие переменные, способные исказить результаты, что хорошо видно при сравнении блок-схем на Рисунках 1 и 2.



Рисунок 2 - Блок-схема контролируемых параметров в традиционном почвенном эксперименте  
DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.69.8.2>

### Методы и принципы исследования

Работа строилась на нескольких взаимодополняющих методах: анализе научной литературы по теме применения гидропоники в экотоксикологических исследованиях; вегетационных экспериментах с концентрациями поллютантов, превышающими ПДК в 5, 10, 100 и 200 раз, и органическими компонентами в диапазоне 0,5–4 мл/л [6]; атомно-абсорбционной спектроскопии и масс-спектрометрии для определения содержания металлов в тканях растений; оценке изменений физиологических показателей при варьировании условий выращивания [7]; статистическом анализе полученных данных.

Для экспериментов отобраны виды, известные способностью накапливать тяжёлые металлы или переносить их воздействие: горчица сарпетская (*Brassica juncea* (L.) Czern.), редька дайкон (*Raphanus sativus* var. *longipinnatus* L.H.Bailey), клевер луговой (*Trifolium pratense* L.) и базилик обыкновенный (*Ocimum basilicum* L.). Перед посевом семена прошли дезинфекцию и стерилизацию; этап проращивания показан на Рисунке 3.



Рисунок 3 - Этап проращивания и дезинфекции семян  
DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.69.8.3>

Растения выращивали в гидропонной установке с системой периодического затопления — её схема приведена на Рисунке 4.

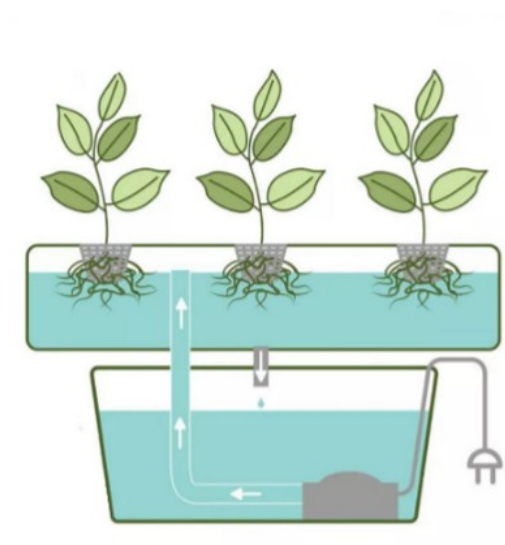


Рисунок 4 - Схема гидропонии с периодическим затоплением  
DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.69.8.4>

На базе РХТУ им. Д.И. Менделеева была оборудована специализированная гидропонная ферма. Исследовательская группа кафедры разработала и приготовила оригинальный питательный раствор с повышенным содержанием азота и расширенным набором микроэлементов в хелатной форме [9]. Хелатирование металлов принципиально важно: оно сводит к минимуму взаимодействие компонентов питательного раствора со свободными ионами тяжёлых металлов из поллютантов, сохраняя тем самым чистоту эксперимента.

Растительный материал размещали в семи пластиковых контейнерах размером 17×17×17 см; питательный раствор непрерывно аэрировался с интенсивностью 3,8 л/мин. Рабочая концентрация раствора составляла 75% для клевера и 50% для лука-порея [10]. Схема расположения контейнеров с указанием вариантов загрязнения приведена на Рисунке 5.



Рисунок 5 - Схема контейнеров с указанием концентраций загрязнителей  
DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.69.8.5>

Контейнер «Эталон» служил контролем — загрязнители в него не вносились. В сосуды «Hg-1» и «Hg-2» на 10-й день эксперимента ввели нитрат ртути  $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$  в концентрациях 5 и 100 ПДК соответственно; на 20-й день дозу удвоили — до 10 и 200 ПДК. В варианты «Орг-1» и «Орг-2» добавляли WD-40 (0,5 и 2 мл/л → 1 и 4 мл/л), в «ПАВ-1» и «ПАВ-2» — лауретсульфат натрия в тех же градациях. На протяжении всего опыта еженедельно измеряли биомассу, оценивали внешние признаки стресса и фиксировали уровень накопления металлов; контейнеры с растениями показаны на Рисунке 6.



Рисунок 6 - Контейнеры с экспериментальными растениями  
DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.69.8.6>

### Основные результаты

Динамика роста растений при разных уровнях загрязнения отражена на Рисунке 7. Первое внесение загрязнителей (10-й день, отметка «1») повлекло заметное снижение прироста биомассы, повторное (20-й день) усилило этот эффект. При этом дайкон, клевер и базилик вплоть до второго загрязнения сохраняли относительно высокий прирост. Необходимо подчеркнуть, что наблюдаемые реакции растений нельзя однозначно объяснять лишь специфическим токсическим действием загрязнителей. С точки зрения физиологии растений повышение концентрации любого растворённого вещества, обладающего осмотической активностью, неизбежно создаёт осмотический стресс, препятствующий поглощению воды корнями [7]. Таким образом, зафиксированное снижение прироста биомассы является суммарным эффектом двух составляющих: собственно токсического действия тяжёлых металлов и органических соединений, а также осмотического стресса, возникающего при увеличении концентрации растворимых веществ в питательном растворе. Для разграничения этих эффектов в последующих исследованиях целесообразно включать дополнительный контрольный вариант, в который вносится осмотически активное, но физиологически безвредное вещество (например, нитрат калия или хлорид натрия) в эквивалентной осмотической концентрации. Настоящее исследование данного контрольного варианта не предусматривало, что следует учесть при интерпретации полученных результатов и планировании дальнейших опытов.

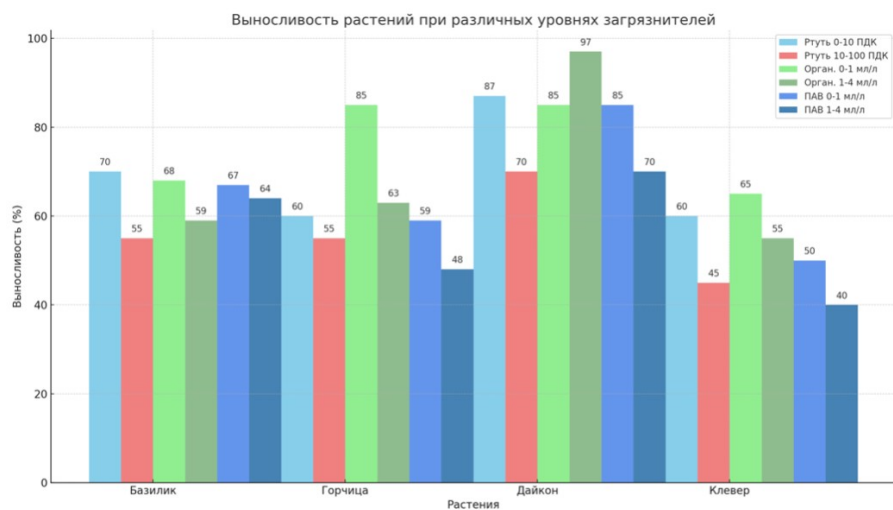


Рисунок 7 - График выносимости растений с различными уровнями загрязнения  
DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.69.8.7>

Небольшие дозы ПАВ (до 1 мг/л) неожиданно оказали стимулирующий эффект: средняя зелёная масса растений выросла на 8%. Однако уже при концентрации свыше 0,5% тенденция изменилась на противоположную — ПАВ начали подавлять рост. При 4 мг/л угнетение стало выраженным у всех испытуемых видов. Ртуть действовала жёстче с самого начала: даже незначительные её концентрации замедляли рост на 12–18%. Среди всех видов наибольшую устойчивость показал дайкон — его биомасса сократилась лишь на 25%, тогда как базилик и клевер потеряли 30–40% биомассы уже после первого внесения поллютантов.

На Рисунке 8 представлены коэффициенты устойчивости исследуемых видов. Обращает на себя внимание стабильное превосходство дайкона: его устойчивость оказалась на 20–25% выше, чем у остальных видов, причём этот разрыв сохранялся вне зависимости от природы загрязнителя. Даже при двукратном повышении концентрации поллютантов коэффициент устойчивости дайкона снижался в среднем лишь на 15%.

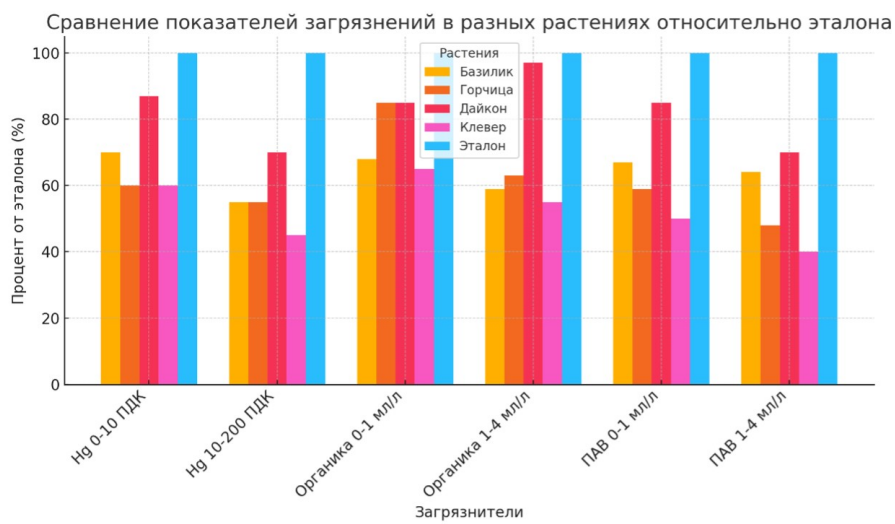


Рисунок 8 - График влияния различных загрязнителей на рост растений  
DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.69.8.8>

### Обсуждение

В ходе проведенного эксперимента получены следующие данные: Соли ртути (Hg): снижение роста до 37,5% при 10 ПДК и до 50% при 100–200 ПДК; дайкон сохранял 70–87% от эталонной выживаемости, клевер — минимальную.

Органические загрязнители (WD-40): снижение роста ~27,5% при 1 мг/л и ~35% при 4 мг/л; дайкон — 90–95% от эталона.

ПАВ: снижение роста до 50% при 1 мг/л и до 65% при 4 мг/л; дайкон — 65–85% от эталона, клевер — наибольшие потери.

### Заключение

По итогам экспериментов установлены следующие критические пороги воздействия поллютантов на исследуемые виды растений:



- 1) концентрация солей ртути на уровне 10 ПДК снижает рост и выживаемость растений на 35–40%;
- 2) при 100–200 ПДК ртути темп роста падает в среднем на 45–55%; наиболее устойчивым оказался дайкон (сохранял 70–87% от эталонных показателей), наименее — клевер;
- 3) внесение WD-40 в концентрации 1 мл/л снижает рост и выживаемость на 20–35%;
- 4) при 4 мл/л WD-40 рост замедляется на 30–40%; дайкон сохранял 90–95% от эталонной выживаемости, клевер вновь оказался самым уязвимым;
- 5) ПАВ в концентрации 1 мл/л угнетают рост и выживаемость на 45–55%;
- 6) при 4 мл/л ПАВ рост снижается на 60–70%; дайкон удерживал 65–85% от эталона, тогда как клевер и, в части вариантов, дайкон при концентрациях свыше 2 мл/л погибали.

Таким образом, среди исследованных видов дайкон демонстрирует наибольшую толерантность ко всем типам поллютантов, клевер — наименьшую. Порог выносливости индивидуален для каждого вида, однако действующие нормативные справочники не содержат подобных данных в разбивке по видам растений. Гидропоника позволяет восполнить этот пробел: она обеспечивает круглогодичную возможность проведения экспериментов, исключает почвенные переменные и даёт воспроизводимые результаты в короткие сроки, что делает её оптимальной платформой для систематического изучения фитотолерантности.

### Благодарности

Авторы выражают огромную благодарность Директору Института химии и проблем устойчивого развития, а также заведующему кафедрой ЮНЕСКО «Зеленая химия для устойчивого развития» чл.-корр. РАН, д.х.н., профессору Наталии Павловне Тарасовой за вклад в Устойчивое развитие. Также хотелось бы поблагодарить профессора кафедры ЮНЕСКО «Зеленая химия для устойчивого развития», д.т.н., Макарову Анну Сергеевну, за плодотворное сотрудничество и всегда трепетное научное руководство.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

### Acknowledgement

Authors express their sincere gratitude to the Director of the Institute of Chemistry and Sustainable Development, and to the Head of the UNESCO Chair in 'Green Chemistry for Sustainable Development', Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Chemical Sciences, Professor Natalia Pavlovna Tarasova, for her contribution to sustainable development. I would also like to thank Professor Anna Sergeevna Makarova, Doctor of Technical Sciences, of the UNESCO Chair in 'Green Chemistry for Sustainable Development', for her fruitful collaboration and consistently thoughtful academic guidance.

### Conflict of Interest

None declared.

### Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

### Список литературы / References

1. Волкова И.А. Зеленые и бережливые технологии в инновационном развитии сельского хозяйства Омской области / И.А. Волкова, В.В. Леушкина, Е.А. Погребцова и др. // Вопросы инновационной экономики. — 2022. — № 3. — С. 1787–1802. — DOI: 10.18334/vinesc.12.3.116253
2. Апарин Б.Ф. Проблемы оценки деградации почв мира / Б.Ф. Апарин // Вестник СПбГУ. — Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет, 2006. — Вып. 1. — С. 70–80.
3. Пастухов М.В. Распределение ртути в шламонакопителе «УСОЛЬЕХИМПРОМ» и его влияние на окружающую среду / М.В. Пастухов, В.И. Полетаева, Е.В. Бутаков // Географические основы и экологические принципы региональной политики природопользования. — 2019. — № 1. — С. 553–556.
4. Чесноков В.А. Выращивание растений без почвы / В.А. Чесноков // Редакционно-издательский совет Ленинградского университета. — Ленинград: Ленинградский университет, 1960. — Вып. 1. — С. 162–164.
5. Morard P. Plant Injury Due to Oxygen Deficiency in the Root Environment of Soilless Culture / P. Morard, J. Silvester // Plant and Soil. — 1996. — № 184. — P. 243–254.
6. Климентова Е.Г. Приспособление и устойчивость растений / Е.Г. Климентова, Г.А. Сатаров, Т.А. Зудова // Учебное пособие для студентов экологического факультета. — Ульяновск: УлГУ, 2006. — Вып. 1. — С. 53–54.
7. Федулов Ю.П. Устойчивость растений к неблагоприятным факторам среды / Ю.П. Федулов, В.В. Котляров, К.А. Доценко // Учебное пособие КубГАУ. — 2015. — № 1. — С. 64–65.
8. Calmin G. Molecular Identification of Microbial Communities in the Recycled Nutrient Solution of a Tomato Glasshouse Soil-Less Culture / G. Calmin, G. Dennler, L. Belbahri et al. // The Open Horticulture Journal. — 2008. — № 1. — P. 7–14.
9. Пат. 28088361 Российская Федерация, МПК RU. Способ получения концентрата питательного состава для выращивания сельскохозяйственных культур в гидропонных системах / Пищаева К.В.; заявитель и патентообладатель Пищаева Ксения Витальевна. — № 2023117463/34; заявл. 2023-07-03; опубл. 2023-07-03, Google Patents. — 5 с.
10. Dufour L. Nutrient Solution Effects on the Development and Yield of Anthurium Lind. in Tropical Soilless Conditions / L. Dufour, V. Guérin // Scientia Horticulturae. — 2005. — № 2. — P. 269–282.



### Список литературы на английском языке / References in English

1. Volkova I.A. Zeleny'e i berezhlivy'e tekhnologii v innovacionnom razvitii sel'skogo khozyajstva Omskoj oblasti [Green and lean technologies in the innovative development of agriculture in the Omsk Region] / I.A. Volkova, V.V. Leushkina, E.A. Pogrebczova et al. // Issues of innovative economy. — 2022. — № 3. — P. 1787–1802. — DOI: 10.18334/vinec.12.3.116253 [in Russian]
2. Aparin B.F. Problemi otsenki degradatsii pochv mira [Problems of assessing the degradation of the world's soils] / B.F. Aparin // Bulletin of St. Petersburg State University. — Saint Petersburg: St. Petersburg State University, 2006. — Iss. 1. — P. 70–80. [in Russian]
3. Pastuxov M.V. Raspreделение rtuti v shlamonakopitele «USOL'EXIMPROM» i ego vliyanie na okruzhayushhuyu sredu [Distribution of mercury in the 'USOLYEKHIMPROM' sludge storage facility and its impact on the environment] / M.V. Pastuxov, V.I. Poletaeva, E.V. Butakov // Geographical foundations and environmental principles of regional environmental policy. — 2019. — № 1. — P. 553–556. [in Russian]
4. Chesnokov V.A. Virashchivanie rastenii bez pochvi [Growing plants without soil] / V.A. Chesnokov // Editorial and Publishing Council of Leningrad University. — Leningrad: Leningrad University, 1960. — Iss. 1. — P. 162–164. [in Russian]
5. Morard P. Plant Injury Due to Oxygen Deficiency in the Root Environment of Soilless Culture / P. Morard, J. Silvester // Plant and Soil. — 1996. — № 184. — P. 243–254.
6. Klimentova Ye.G. Prispособlenie i ustoichivost rastenii [Adaptation and resistance of plants] / Ye.G. Klimentova, G.A. Satarov, T.A. Zudova // Study guide for students of the Faculty of Ecology. — Ulyanovsk: UIGU, 2006. — Iss. 1. — P. 53–54. [in Russian]
7. Fedulov Yu.P. Ustojchivost' rastenij k neblagopriyatny'm faktoram sredy' [Plant resistance to adverse environmental factors] / Yu.P. Fedulov, V.V. Kotlyarov, K.A. Docenko // KubSAU Training Manual. — 2015. — № 1. — P. 64–65. [in Russian]
8. Calmin G. Molecular Identification of Microbial Communities in the Recycled Nutrient Solution of a Tomato Glasshouse Soil-Less Culture / G. Calmin, G. Dennler, L. Belbahri et al. // The Open Horticulture Journal. — 2008. — № 1. — P. 7–14.
9. Pat. 28088361 Russian Federation, IPC RU. Sposob polucheniya koncentrata pitatel'nogo sostava dlya vy'rashhivaniya sel'skoxozyajstvenny'x kul'tur v gidroponny'x sistemax [Method for obtaining a nutrient concentrate for growing crops in hydroponic systems] / Pishhaeva K.V.; the applicant and the patentee Pishchaeva Kseniya Vitalievna. — № 2023117463/34; appl. 2023-07-03; publ. 2023-07-03, GOOGLE PATENTS. — 5 p. [in Russian]
10. Dufour L. Nutrient Solution Effects on the Development and Yield of Anthurium Lind. in Tropical Soilless Conditions / L. Dufour, V. Guérin // Scientia Horticulturae. — 2005. — № 2. — P. 269–282.