



## ЭКОЛОГИЯ

Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2024. Т. 24, вып. 1. С. 84–95

*Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2024, vol. 24, iss. 1, pp. 84–95

<https://ichbe.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1816-9775-2024-24-1-84-95>

EDN: RVLBVO

Научная статья  
УДК 615.9:577.4

### Анализ природных и антропогенных факторов, влияющих на способность *Lepidium sativum* L. адаптироваться к токсичности триазольных ксенобиотиков

В. А. Исаичкин, Е. С. Селезнева, З. П. Белоусова ✉

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева, Россия, 443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, д. 34

Исаичкин Вадим Александрович, магистрант кафедры биохимии, биотехнологии и биоинженерии, [vadim.isaichkin.99@mail.ru](mailto:vadim.isaichkin.99@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0000-0950-588X>

Селезнева Екатерина Сергеевна, кандидат биологических наук, доцент кафедры биохимии, биотехнологии и биоинженерии, [catana7@yandex.ru](mailto:catana7@yandex.ru), <https://orcid.org/0009-0005-0801-0750>

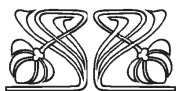
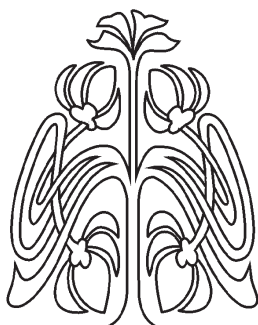
Белоусова Зоя Петровна, доктор химических наук, профессор кафедры неорганической химии, [zbelousova@mail.ru](mailto:zbelousova@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-0165-5140>

**Аннотация.** Исследовали последствия воздействия природными факторами (температуры +34°C и +20°C) и антропогенными ксенобиотиками (1,2,4-TriH; 1-(CH<sub>3</sub>SO<sub>2</sub>)-1H-1,2,4-Tri; 4-(PhSO<sub>2</sub>)-4H-1,2,4-Tri; 4-(TolSO<sub>2</sub>)-4H-1,2,4-Tri) на кресс-салат *Lepidium sativum* L. Для этого были проведены 4 серии экспериментов. В первых двух сериях исследовали влияние концентраций: 0,001; 0,01; 0,1 мг/мл при проращивании в условиях разных температур в течение трех суток. Обнаружили, что с повышением концентрации растворов триазолов возрастает способность соединений ингибировать прорастание семян кресс-салата. Определяющим фактором их токсичности является величина липофильности. Не выявлены различия между влиянием исследованных температур на энергию прорастания семян. С повышением концентрации увеличивается способность синтезированных триазолов ингибировать рост корней и стеблей кресс-салата. При этом их токсичность достоверно выше при более высокой из исследованных температур. В последующих двух сериях изучали способность *Lepidium sativum* адаптироваться к токсичности триазолов. Для этого в течение суток семена проращивали при контрастных температурах в растворах с концентрацией 0,001 мг/мл, затем их двое суток проращивали в растворах 0,1 мг/мл. Обнаружили, что триазолы достоверно по-разному влияют на развитие адаптивного ответа у растений. Только 4-(PhSO<sub>2</sub>)-4H-1,2,4-Tri; 4-(TolSO<sub>2</sub>)-4H-1,2,4-Tri вызывали достоверное развитие адаптивного ответа, величина которого зависела и от температуры культивирования. Мы выявили, если при прямом действии исследуемыми триазолами важна величина их липофильности, то для развития преадаптации важны величины их молекулярной массы и молекулярного объема.

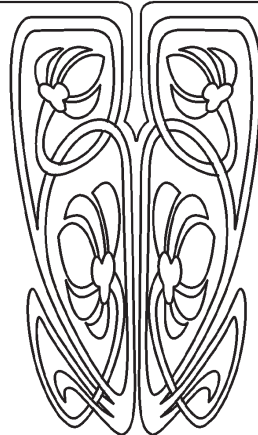
**Ключевые слова:** *Lepidium sativum*, кресс-салат, триазольные пестициды, ретарданты, токсичность, преадаптация, адаптивный ответ

**Для цитирования:** Исаичкин В. А., Селезнева Е. С., Белоусова З. П. Анализ природных и антропогенных факторов, влияющих на способность *Lepidium sativum* L. адаптироваться к токсичности триазольных ксенобиотиков // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2024. Т. 24, вып. 1. С. 84–95. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2024-24-1-84-95>, EDN: RVLBVO

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)



НАУЧНЫЙ  
ОТДЕЛ





Article

## Analysis of natural and anthropogenic factors affecting the ability of *Lepidium sativum* L. to adapt to the toxicity of triazole xenobiotics

V. A. Isaichkin, E. S. Selezneva, Z. P. Belousova ✉

Samara University, 34 Moskovckoe shosse St., Samara 443086, Russia

Vadim A. Isaichkin, vadim.isaichkin.99@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-0950-588X>

Ekaterina S. Selezneva, catana7@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0005-0801-0750>

Zoya P. Belousova, zbelousova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0165-5140>

**Abstract.** The effects of natural factors (temperatures +34°C and +20°C) and anthropogenic xenobiotics (1,2,4-TriH; 1-(CH<sub>3</sub>SO<sub>2</sub>)-1H-1,2,4-Tri; 4-(PhSO<sub>2</sub>)-4H-1,2,4-Tri; 4-(TolSO<sub>2</sub>)-4H-1,2,4-Tri) on watercress *Lepidium sativum* L. was studied. For this, 4 series of experiments were carried out. In the first two series, the effect of concentrations was studied: 0.001, 0.01, 0.1 mg/ml during germination at different temperatures for three days. It was found that the ability of the triazole compounds to inhibit the germination of watercress seeds increased with increasing concentration of the solutions. The magnitude of lipophilicity was the determining factor in their toxicity. Differences between the influence of the studied temperatures on the energy of seed germination weren't revealed. The ability of the synthesized triazoles to inhibit the growth of watercress roots and stems increased with increasing their concentration. At the same time, their toxicity was significantly higher at the higher of the studied temperatures. The next two series examined the ability of *Lepidium sativum* to adapt to the toxicity of triazoles. To do this, the seeds were germinated during the day at contrasting temperatures in solutions with a concentration of 0.001 mg/ml, then they were germinated in solutions of 0.1 mg/ml for two days. It turned out that triazoles had significantly different effects on the development of the adaptive response in plants. Only 4-(PhSO<sub>2</sub>)-4H-1,2,4-Tri; 4-(TolSO<sub>2</sub>)-4H-1,2,4-Tri caused a significant development of an adaptive response, the magnitude of which also depended on the cultivation temperature. We found that the value of lipophilicity of the studied triazoles was of significant importance during their direct action, and the values of their molecular weight and molecular volume were important for the development of preadaptation.

**Keywords:** *Lepidium sativum*, watercress, triazole pesticides, retardants, toxicity, preadaptation, adaptive response

**For citation:** Isaichkin V. A., Selezneva E. S., Belousova Z. P. Analysis of natural and anthropogenic factors affecting the ability of *Lepidium sativum* L. to adapt to the toxicity of triazole xenobiotics. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2024, vol. 24, iss. 1, pp. 84–95 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2024-24-1-84-95>, EDN: RVLBVO

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

## Введение

Для предпосевной обработки часто используют высокоэффективные ретарданты и фунгициды, содержащие триазол [1]. С их помощью решаются проблемы, связанные с болезнями, вредителями и сорными растениями, а также повышением урожайности культурных растений [2]. Однако это приводит к появлению рас растений, устойчивых к данным пестицидам. К тому же существует риск накопления культурными растениями используемых пестицидов, и возникает необходимость постоянного тестирования сельскохозяйственной продукции [3, 4].

Особый интерес вызывает способность растений из экосистем, сопровождающих агроценозы, приспосабливаться к токсическому действию повсеместно применяемых препаратов [5]. Именно возникновение устойчивых к пестицидам форм приводит к тому, что нужно либо увеличивать дозу применяемых веществ, либо синтезировать аналоги применимых препаратов, к которым приспособлений нет. В

сущности оба эти пути создают векторный отбор генотипов у растений-сорняков и паразитарных грибов на устойчивость к антропогенным ксенобиотикам. Необходимы модельные эксперименты, позволяющие оценить, какие природные и антропогенные факторы участвуют в появлении у растений способности адаптироваться к используемым пестицидам.

Целью данного исследования является анализ способности тест-объекта *Lepidium sativum* адаптироваться к разным температурным режимам выращивания (как комфортной температуры, так и повышенной) в условиях воздействия на растения триазола и его производных.

## Материалы и методы

Исследовали влияние двух положительных температур +20 и +34 °С. Токсикантами служили: 1,2,4-TriH (I), 1-(CH<sub>3</sub>SO<sub>2</sub>)-1H-1,2,4-Tri (II), 4-(PhSO<sub>2</sub>)-4H-1,2,4-Tri (III), 4-(TolSO<sub>2</sub>)-4H-1,2,4-Tri (IV). Это химические соединения, относящиеся к классу алкил(арил)сульфонил-



1,2,4-триазолов. Они различаются структурой фрагмента сульфокислоты, это, соответственно, метильная, фенильная и толильная группы. Триазолиды исследовали в концентрациях 0,001; 0,01; 0,1 мг/мл.

Используемые триазолов синтезированы на кафедре неорганической химии Самарского университета с целью выяснения роли физико-химических параметров в развитии биологического ответа, что поможет в будущем синтезировать соединения с высокой избирательной активностью [6].

В качестве тест-объекта использовали *Lepidium sativum* L., широко применяемый в экологических исследованиях [7, 8], сорт «Забава».

Модельные эксперименты длились трое суток. Было проведено 4 серии экспериментов.

Во всех сериях экспериментов семена кресс-салата по 30 штук помещали в чашки Петри на фильтровальную бумагу, пропитанную исследуемыми растворами. Контролем служили семена, пророщенные в воде. Все серии экспериментов проводили в трех повторах для каждой концентрации исследуемого соединения.

Биологические ответы оценивали через трое суток, подсчитывая энергию прорастания семян, среднюю длину стеблей и корней.

**Серия 1.** Культивирование проводили в термостате при температуре +34°C. Контролем служили семена, пророщенные в воде при этой же температуре.

**Серия 2.** Проращивание в экспериментальных растворах и в воде (контроль) проводили при температуре +20°C.

**Серия 3.** Семена проращивали в течение суток при температуре +34°C в растворе исследуемого триазола с концентрацией 0,001 мг/мл. Через сутки тест-объекты переносили в другие чашки Петри, где концентрация раствора этого же вещества была 0,1 мг/мл. Растения проращивали ещё двое суток.

Активным контролем служили семена, пророщенные в растворе исследуемого триазола в концентрации 0,1 мг/мл в течение трех суток при температуре +34°C.

**Серия 4.** Семена проращивали в течение суток при температуре +20°C в растворах исследуемого соединения в концентрации 0,001 мг/мл, затем их переносили в чашки Петри с раствором этого же вещества в концентрации 0,1 мг/мл, где тест-объекты проращивали ещё двое суток.

Активный контроль был тот же, как и в серии 3, но семена проращивали при температуре +20°C.

Достоверность различий между опытом и контролем, разными концентрациями испытуемых соединений и аналогичными концентрациями разных соединений, действующих при разных температурах культивирования, и между биологическими ответами в экспериментах со сменой концентрацией при разных температурах оценивали с применением двухфакторного дисперсионного анализа. С помощью однофакторного дисперсионного анализа выясняли достоверное влияние физико-химических параметров на токсичность соединений [9].

### Результаты и их обсуждение

В регионах с резко континентальным климатом весна характеризуется переменах температур, когда диапазон положительных температур колеблется от +20 до +34°C [10]. Поэтому мы смоделировали процесс, когда тест-объект проращивали при контрастных температурах: +20°C (комфортная температура, рекомендованная ГОСТом 12038-84) и +34°C в водных растворах производных триазола с разной концентрацией. На первом этапе оценивали влияние разных температур на энергию прорастания семян кресс-салата.

Чтобы избежать влияния полиморфизма по генам, отвечающим за регуляцию ранних этапов онтогенеза растения, мы использовали в анализе «дружность всхожести семян» или «энергию прорастания семян», которая, по мнению многих исследователей, является косвенным показателем однородности [11, 12] по генам-регуляторам онтогенеза, координирующих развитие растений в соответствии с внешними факторами [13]. Таким образом, мы наблюдали реакцию сходных генотипов на воздействующие факторы.

Исследование влияния анализируемых факторов на энергию прорастания семян представлено на рис. 1.

Как видно из представленных результатов, при проращивании в растворах всех испытуемых триазолов в концентрации 0,001 мг/мл при разных температурах культивирования достоверных различий по энергии прорастания семян не выявлено. Необходимо отметить, что и в контроле не выявлено статистически значимых отличий по всхожести семян в разных температурных условиях.

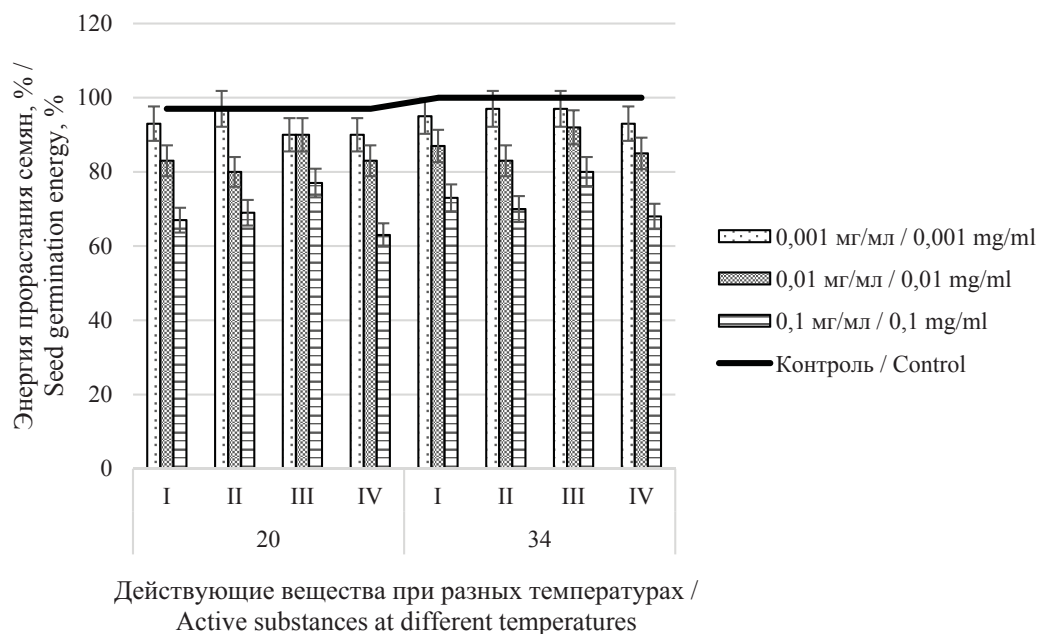


Рис. 1. Влияние водных растворов триазола и его производных на энергию всхожести семян *Lepidium sativum* при проращивании их при контрастных температурах, где 20 – температура +20°C, 34 – температура +34°C; I – 1,2,4-TriH, II – 1-(CH<sub>3</sub>SO<sub>2</sub>)-1H-1,2,4-Tri, III – 4-(PhSO<sub>2</sub>)-4H-1,2,4-Tri, IV – 4-(TolSO<sub>2</sub>)-4H-1,2,4-Tri

Fig. 1. The effect of aqueous solutions of triazole and its derivatives on the germination energy of *Lepidium sativum* seeds when germinating them at contrasting temperatures, where 20 is the temperature +20°C, 34 is the temperature +34°C; I – 1,2,4-TriH, II – 1-(CH<sub>3</sub>SO<sub>2</sub>)-1H-1,2,4-Tri, III – 4-(PhSO<sub>2</sub>)-4H-1,2,4-Tri, IV – 4-(TolSO<sub>2</sub>)-4H-1,2,4-Tri

Двухфакторный дисперсионный анализ позволил выявить, что в более высоких концентрациях исследуемые нами соединения достоверно ингибируют величину проросших семян по сравнению с контролем, и чем выше концентрация, тем сильнее ингибирование ( $p < 0,001$ ). Необходимо отметить, что и триазолы, отличающиеся своими активными группами, по-разному влияют на энергию прорастания ( $p < 0,01$ ), минимальные ингибирующие свойства проявлял 4-(PhSO<sub>2</sub>)-4H-1,2,4-Tri (III) (см. рис. 1). В целом можно отметить, что энергия прорастания семян падала по сравнению с контролем в растворах с концентрацией от 0,01 до 0,1 мг/мл на 20–34%.

Мы исследовали совместное воздействие синтезированных триазолов, отличающихся активными группами и физико-химическими свойствами, и природного фактора температуры. Двухфакторный дисперсионный анализ показал, что при комфортной температуре +20°C ингибирование прорастания семян исследуемыми соединениями в концентрации 0,1 мг/мл было достоверно выше, чем при температуре +34°C ( $p < 0,01$ ). Нам удалось построить ряд, в котором

ингибирование энергии прорастания в высокой концентрации растворов при исследованных температурах падает: 4-(TolSO<sub>2</sub>)-4H-1,2,4-Tri > 1-(CH<sub>3</sub>SO<sub>2</sub>)-1H-1,2,4-Tri > 1,2,4-TriH > 4-(PhSO<sub>2</sub>)-4H-1,2,4-Tri

В системе «HyperChem» мы рассчитали физико-химические параметры синтезированных нами соединений. Результаты представлены в таблице.

Анализ влияния физико-химических характеристик растворов триазолов на энергию прорастания семян кресс-салата показал, что определяющую роль в способности ингибировать прорастание семян при температуре +34°C и при выращивании при +20°C играет величина липофильности исследуемых триазолов, однако при +34°C на способность ингибировать прорастание семян влияет и величина дипольного момента синтезированных триазолов.

Можно предположить, что в теплицах предварительное воздействие триазольными фунгицидами на семена усиливает ингибирующее действие этих препаратов не только на паразитарные грибы, но и на сами культурные растения.



Физико-химические параметры исследуемых триазолов (программа «HyperChem») /  
Table. Physico-chemical parameters of the triazoles under study (HyperChem program)

Исследуемые триазолы / Investigated triazoles	Физико-химические параметры / Physico-chemical parameters				
	Молекулярная масса, г/моль / Molecular weight, g/mol	Молекулярный объем, Å <sup>3</sup> / Molecular volume, Å <sup>3</sup>	Липофильность, lgP / Lipophilicity, lgP	Энергия гидратации, кДж/моль / Hydration energy, kJ/mol	Величина дипольного момента, дб / The magnitude of the dipole moment, db
1,2,4-TriH	69,07	258,91	-0,12	-11,48	2,7
1-(CH <sub>3</sub> SO <sub>2</sub> )-1H-1,2,4-Tri	147,5	407,04	-0,53	-8,07	3,03
4-(PhSO <sub>2</sub> )-4H-1,2,4-Tri	209,22	568,12	-0,04	-8,45	4,76
4-(TolSO <sub>2</sub> )-4H-1,2,4-Tri	223,25	618,7	0,11	-7,2	5,33

При попадании фунгицидов в почву соединения так или иначе влияют на корневую систему. Мы исследовали влияние испытуемых триазольных соединений на рост корней кресс-салата. Результаты представлены на рис. 2.

Полученные результаты показывают (см. рис. 2), что температурный фактор существенно влияет на рост корневой системы. Проращивание при +34°C достоверно ингибирует рост корней по сравнению с ростом при температуре +20°C

в растворах всех исследованных концентраций. С ростом концентрации растворов растут ингибирующие свойства всех триазолов независимо от их строения ( $p < 0,01$ ).

Двухфакторный дисперсионный анализ не выявил различий между исследованными соединениями в их способности ингибировать рост корней. Таким образом, связь между структурой соединений и их ингибирующими свойствами для корневой системы не обнаружено.

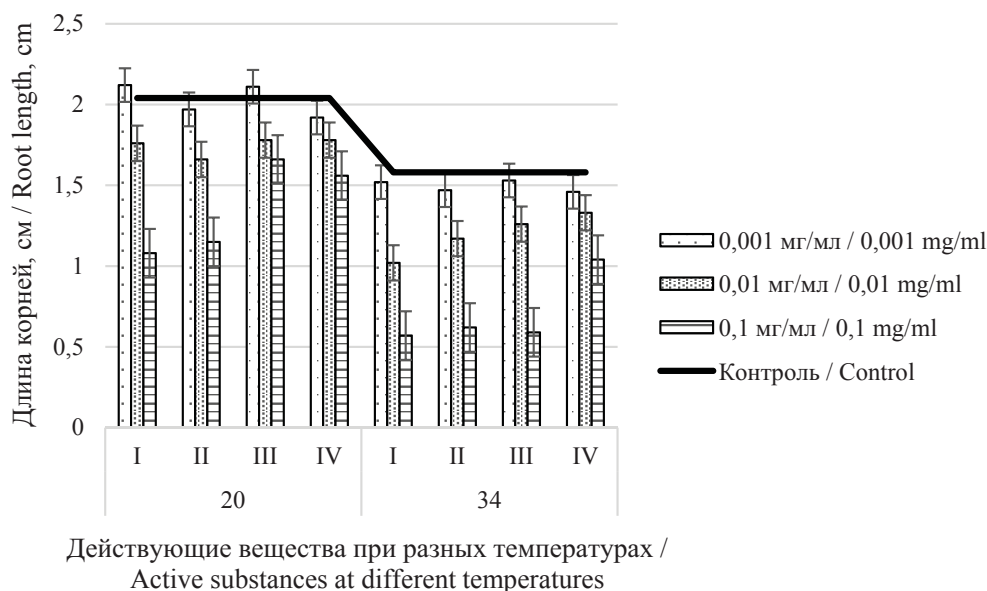


Рис. 2. Влияние водных растворов триазола и его производных на среднюю длину корней *Lepidium sativum* на третьи сутки, при проращивании их при контрастных температурах, где 20 – температура +20°C, 34 – температура +34°C; I – 1,2,4-TriH, II – 1-(CH<sub>3</sub>SO<sub>2</sub>)-1H-1,2,4-Tri, III – 4-(PhSO<sub>2</sub>)-4H-1,2,4-Tri, IV – 4-(TolSO<sub>2</sub>)-4H-1,2,4-Tri

Fig. 2. Effect of aqueous solutions of triazole and its derivatives on the average root length of *Lepidium sativum* on the third day, when germinating them at contrasting temperatures, where 20 is temperature +20°C, 34 is temperature +34°C; I – 1,2,4-TriH, II – 1-(CH<sub>3</sub>SO<sub>2</sub>)-1H-1,2,4-Tri, III – 4-(PhSO<sub>2</sub>)-4H-1,2,4-Tri, IV – 4-(TolSO<sub>2</sub>)-4H-1,2,4-Tri



Анализ влияния водных растворов триазолов на рост побегов при выращивании

кресс-салата в разных температурных условиях показан на рис. 3.

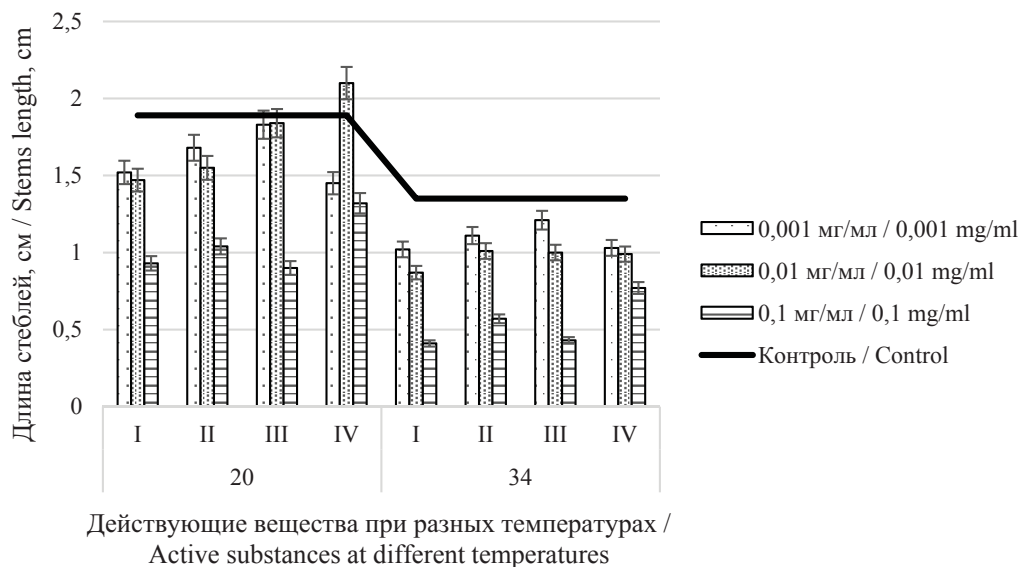


Рис. 3. Влияние водных растворов триазола и его производных на среднюю длину стеблей *Lepidium sativum* на третий сутки, при проращивании их при контрастных температурах, где 20 – температура +20°C, 34 – температура +34°C; I – 1,2,4-TriH, II – 1-(CH<sub>3</sub>SO<sub>2</sub>)-1H-1,2,4-Tri, III – 4-(PhSO<sub>2</sub>)-4H-1,2,4-Tri, IV – 4-(TolSO<sub>2</sub>)-4H-1,2,4-Tri

Fig. 3. Effect of aqueous solutions of triazole and its derivatives on average stem length of *Lepidium sativum* on the third day, when germinating them at contrasting temperatures, where 20 is +20°C, 34 is +34°C; I – 1,2,4-TriH, II – 1-(CH<sub>3</sub>SO<sub>2</sub>)-1H-1,2,4-Tri, III – 4-(PhSO<sub>2</sub>)-4H-1,2,4-Tri, IV – 4-(TolSO<sub>2</sub>)-4H-1,2,4-Tri

Как видно из представленных результатов (см. рис. 3) и проведённого двухфакторного дисперсионного анализа, синтезированные нами триазолы при выращивании при +34°C достоверно сильнее ингибируют рост стеблей кресс-салата, чем при температуре +20°C ( $p < 0,01$ ). Однако следует отметить, что при проращивании при более низкой из исследованных температур минимальными ингибирующими свойствами обладал 4-(PhSO<sub>2</sub>)-4H-1,2,4-Tri в концентрации 0,01 мг/мл, а соединение 4-(TolSO<sub>2</sub>)-4H-1,2,4-Tri проявило стимулирующий эффект в этой же концентрации. В более высокой концентрации все исследованные триазолы ингибируют рост стеблей ( $p < 0,01$ ) независимо от температуры культивирования.

Последнее позволяет предположить, что именно кольцо триазола определяет свойства соединений подавлять рост тест-объекта. Независимо от того, при какой температуре выращивали кресс-салат ретардантные свойства синтезированных триазолов связаны с их липофильностью. Ретардантное действие триазолов, используемых как комплексные фунгициды, обусловлено подавлением биосинтеза гибберел-

лина в трёх его звеньях уже на ранних стадиях развития растений [1]. Возможно, соединения с более высокой липофильностью быстрее достигают клеток апикальных меристем корней и побегов, которые вносят наибольший вклад в формирование растительного организма. В целом существует большое количество механизмов, позволяющих снизить негативное воздействие триазолами, однако данные соединения являются новыми, поэтому наблюдаемые нами ответы – следствие неспецифических реакций.

Многолетнее использование одних и тех же пестицидов приводит к отбору генотипов сорных растений и вредителей, устойчивых к данному соединению, за счёт появления адаптивного ответа [14]. Чтобы доказать это, мы смоделировали эксперимент, позволяющий выяснить, какие факторы влияют на формирование адаптивного ответа: температура или физико-химические свойства триазолидов.

После преадаптации семян в течение суток самой низкой из используемых нами концентрации (0,001 мг/мл) мы переносили проростки в чашки Петри, в которых тест-объект рос на концентрации 0,1 мг/мл при контрастных положи-



тельных температурах. Таким образом, мы преадаптировали кресс-салат слаботоксичной дозой.

Исследования влияния преадаптации на энергию прорастания семян представлены на рис. 4.



Рис. 4. Влияние различных типов воздействия растворами триазола на энергию прорастания семян *Lepidium sativum*, при проращивании кресс-салата при контрастных температурах, где 20 – температура +20°C, 34 – температура +34°C; I – 1,2,4-TriH, II – 1-(CH<sub>3</sub>SO<sub>2</sub>)-1H-1,2,4-Tri, III – 4-(PhSO<sub>2</sub>)-4H-1,2,4-Tri, IV – 4-(TolSO<sub>2</sub>)-4H-1,2,4-Tri; преадаптация – предварительное проращивание в растворах с концентрацией 0,001 мг/мл, с последующим выращиванием в растворах соединений с концентрацией 0,1 мг/мл, прямое действие – культивирование в растворах с концентрацией 0,1 мг/мл

Fig. 4. Effect of different types of exposure to triazole solutions on germination energy of *Lepidium sativum* seeds, during cress germination at contrasting temperatures, where 20 – temperature +20°C, 34 – temperature +34°C; I – 1,2,4-TriH, II – 1-(CH<sub>3</sub>SO<sub>2</sub>)-1H-1,2,4-Tri, III – 4-(PhSO<sub>2</sub>)-4H-1,2,4-Tri, IV – 4-(TolSO<sub>2</sub>)-4H-1,2,4-Tri; pre-adaptation – pre-germination in solutions with a concentration of 0,001 mg/ml, followed by cultivation in solutions with a concentration of 0,1 mg/ml, direct action – cultivation in solutions with a concentration of 0,1 mg/ml

Как видно из представленных результатов (см. рис. 4), преадаптация семян низкотоксичной дозой и последующим выращиванием их в соединениях с высокой концентрацией исследуемых веществ не зависит от температуры культивирования. Однако необходимо отметить, что предварительное воздействие соединениями, имеющими бензольное кольцо – 4-(PhSO<sub>2</sub>)-4H-1,2,4-Tri, 4-(TolSO<sub>2</sub>)-4H-1,2,4-Tri, на 10% повышало прорастание семян по сравнению с прямым действием ( $p < 0,05$ ).

Однофакторный дисперсионный анализ показал, что на развитие адаптивной реакции, выражающейся в увеличении энергии прорастания семян, влияют липофильность, энергия гидратации и величина дипольного момента. Самый сильный адаптивный ответ вызывает 4-(TolSO<sub>2</sub>)-4H-1,2,4-Tri.

Исследования влияния преадаптации растений слаботоксичной дозой на ростовые процессы корней показаны на рис. 5.

Проведённый двухфакторный дисперсионный анализ не выявил достоверных различий в стимуляции адаптивного ответа у корней при действии триазолами с разным строением, не оказал влияние и температурный режим культивирования растений, хотя необходимо отметить, что преадаптация соединениями в низкой концентрации снижает токсичность веществ в дозе 0,1 мг/мл ( $p < 0,05$ ) при культивировании при высокой температуре, преадаптация нетоксичной дозой при комфортной температуре наблюдалась только для 4-(PhSO<sub>2</sub>)-4H-1,2,4-Tri.

Результаты преадаптации нетоксичными дозами на ростовые процессы в стеблях кресс-салата представлены на рис. 6.

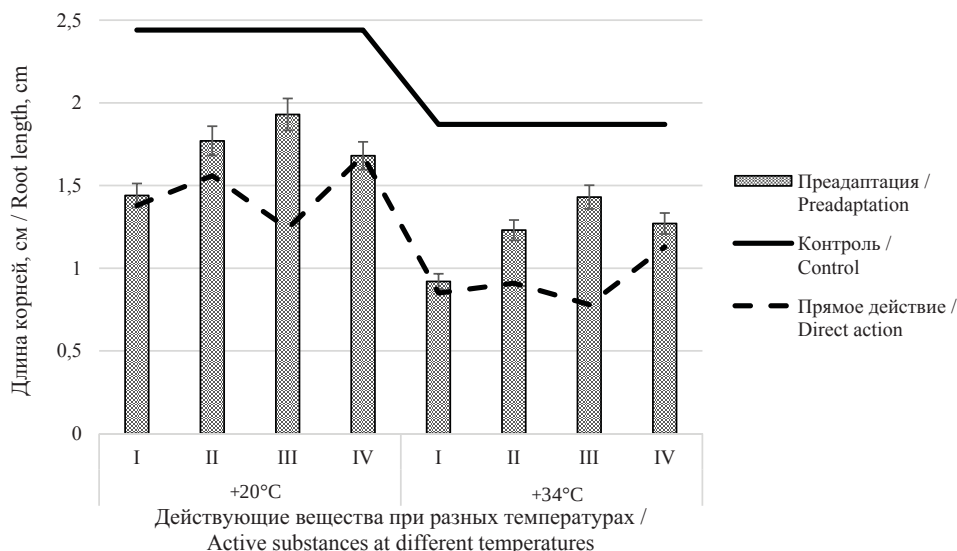


Рис. 5. Влияние различных типов воздействия растворами триазола на длину корней, при проращивании *Lepidium sativum* при контрастных температурах; I – 1,2,4-TriH, II – 1-(CH<sub>3</sub>SO<sub>2</sub>)-1H-1,2,4-Tri, III – 4-(PhSO<sub>2</sub>)-4H-1,2,4-Tri, IV – 4-(TolSO<sub>2</sub>)-4H-1,2,4-Tri; преадаптация – предварительное проращивание в растворах с концентрацией 0,001 мг/мл, с последующим выращиванием в растворах соединений с концентрации 0,1 мг/мл, прямое действие – культивирование в растворах с концентраций 0,1 мг/мл

Fig. 5. Effect of different types of exposure to triazole solutions on root length, when germinating *Lepidium sativum* at contrasting temperatures; I – 1,2,4-TriH, II – 1-(CH<sub>3</sub>SO<sub>2</sub>)-1H-1,2,4-Tri, III – 4-(PhSO<sub>2</sub>)-4H-1,2,4-Tri, IV – 4-(TolSO<sub>2</sub>)-4H-1,2,4-Tri; pre-adaptation – pre-germination in solutions with a concentration of 0,001 mg/ml, followed by cultivation in solutions with a concentration of 0,1 mg/ml, direct action – cultivation in solutions with a concentration of 0,1 mg/ml

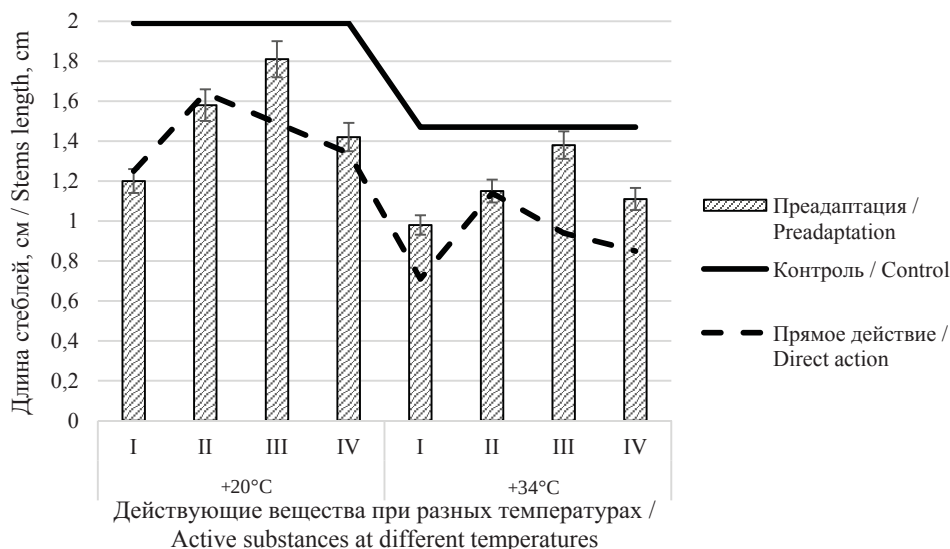


Рис. 6. Влияние различных типов воздействия растворами триазола на длину стеблей *Lepidium sativum*, при проращивании кресс-салата при контрастных температурах; I – 1,2,4-TriH, II – 1-(CH<sub>3</sub>SO<sub>2</sub>)-1H-1,2,4-Tri, III – 4-(PhSO<sub>2</sub>)-4H-1,2,4-Tri, IV – 4-(TolSO<sub>2</sub>)-4H-1,2,4-Tri; преадаптация – предварительное проращивание в растворах с концентрацией 0,001 мг/мл, с последующим выращиванием в растворах веществ с концентрацией 0,1 мг/мл, прямое действие – культивирование в растворах с концентраций 0,1 мг/мл

Fig. 6. Effect of different types of exposure to triazole solutions on stem length of *Lepidium sativum*, when germinating cress at contrasting temperatures; I – 1,2,4-TriH, II – 1-(CH<sub>3</sub>SO<sub>2</sub>)-1H-1,2,4-Tri, III – 4-(PhSO<sub>2</sub>)-4H-1,2,4-Tri, IV – 4-(TolSO<sub>2</sub>)-4H-1,2,4-Tri; pre-adaptation – pre-germination in solutions with a concentration of 0,001 mg/ml, followed by cultivation in solutions with a concentration of 0,1 mg/ml, direct action – cultivation in solutions with a concentration of 0,1 mg/ml





Проведённые эксперименты показали, что развитие адаптивного ответа зависит от строения исследуемых нами триазолов. Так, соединения, в состав которых входило бензольное кольцо, развивают адаптивный ответ независимо от температуры культивирования ( $p < 0,05$ ). При культивировании при  $+34^{\circ}\text{C}$  величина адаптивного ответа достоверно больше, чем при культивировании при  $+20^{\circ}\text{C}$ .

Анализируя физико-химические параметры триазолов, мы обнаружили, что если при прямом действии важна величина их липофильности, то для развития адаптивного ответа важны величины их молекулярной массы и молекулярного объема.

Адаптации к условиям окружающей среды проявляются на различных уровнях биологической организации – от молекулярного до биогеоценотического [15]. Один из этапов адаптивного реагирования – появление адаптивного ответа, выражающегося в величине негативного ответа при предварительном воздействии токсикантом в нетоксичной дозе [16].

Формирование адаптивного ответа зависит от наличия у растений ферментов, способных трансформировать действие токсиканта, скорости поступления ксенобиотика в апикальные меристемы, от строения и физико-химических характеристик синтезированных пестицидов и абиотических факторов, ускоряющих поступление токсикантов в клетки. Разработка оптимизированного применения пестицидов триазольной группы позволит снизить потенциальный вред химической защиты сельскохозяйственных культур от сорных растений [17].

Исследуя триазолы, различающиеся физико-химическими параметрами, мы обнаружили, что все они способны вызывать адаптивный ответ. Быстрее всего развивается адаптивный ответ при воздействии на семена, состояние которых определяется успешностью выживания молодого организма растения. Другие азолы при воздействии на семена также могут создавать состояние преадаптированности [18].

Воздействие ксенобиотиками у растений вызывает стресс, приводящий к активации репаративных процессов, защищающих формообразовательные процессы [19], именно поэтому активируются древние механизмы, создающие состояние преадаптированности.

Таким образом, при создании новых пестицидов, в состав которых входит триазольное кольцо, необходимо учитывать, какие из

физико-химических факторов исследуемого триазола послужат фактором быстрого проникновения соединения в клетку и, следовательно, индукции систем репарации, повышающих устойчивость растений [1].

Несмотря на то что существует много работ, посвященных изучению действия различных триазольных пестицидов, исследований роли структуры соединений очень мало, поэтому наши исследования в некоторой степени заполняют эту брешь [1].

Все изученные нами физико-химические параметры характеризуют степень мембранотропности синтетических триазолов. Наши результаты совпадают с данными некоторых исследователей, которые доказали, что триазольные пестициды вызывают деполяризацию мембран растительных клеток и усиливают проницаемость мембран для изученных пестицидов [20–22].

Можно предположить, что способность растений адаптироваться к триазольным пестицидам определяется скоростью и путями проникновения веществ в клетки апикальных меристем стеблей. Возможно, анализ при мониторинговых исследованиях в первую очередь веществ, характеризующихся высокой мембранотропностью, ускорит оценку потенциального вреда, наносимого пестицидами [23].

Контрастные положительные температуры в период вегетации у овощных культур могут существенно снизить наращивание фитомассы, однако у давно разводимых культур выработаны адаптации к контрастным положительным температурам, при этом сами механизмы адаптации могут быть различными [24].

Проведенные исследования показали, что растения способны развивать адаптивный ответ при предварительном воздействии на них на ранних стадиях развития нетоксичными дозами триазолов. Величина адаптивного ответа для разных типов биологических параметров зависит и от строения соединения и температуры культивирования.

## Заключение

Изучение факторов, определяющих развитие устойчивости у растений к токсичности синтетических триазолов при выращивании растений в контрастных температурных условиях, показало, что в развитии негативного ответа (ингибировании прорастания семян и



ростовых процессов кресс-салата), а также позитивного ответа (появлении адаптивного ответа в модельных экспериментах) играют большую роль температура проращивания и некоторые физико-химические параметры исследованных триазолов.

Выяснили, что энергия прорастания семян зависит как от температуры проращивания, так и от концентраций исследованных триазолов и величины их липофильности.

На рост корней влияет температура проращивания, концентрация растворов анализируемых триазолов, но не влияет их структура в избранном диапазоне концентраций.

Рост побегов тест-объекта зависит от температуры проращивания, концентрации растворов и липофильности исследованных триазолов. Липофильность характеризует способность соединений проходить через клеточные мембраны. Литературных данных об изменении липофильности алкил(арил)сульфонил-1,2,4-триазолов в выбранном нами интервале температур мы не обнаружили.

Состояние преадаптации определяется физико-химическими параметрами используемых азолов. Адаптивный ответ обнаруживается при предварительном воздействии слабotoxicными дозами растворов синтезированных триазолов на всхожесть семян и рост стеблей кресс-салата и зависит от строения веществ.

### Список литературы

1. Побежимова Т. П., Корсукова А. В., Дорофеев Н. В., Грабельных О. И. Физиологические эффекты действия на растения фунгицидов триазольной природы // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2019. Т. 9, № 3. С. 461–476. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2019-9-3-461-476>
2. Комарова О. П., Земляничина С. В. Снижение пестицидной нагрузки как основа экологической безопасности сельских территорий // Фундаментальные исследования. 2020. № 3. С. 54–59. <https://doi.org/10.17513/fr.42699>
3. Захарченко В. А. Особенности проявления рисков химического загрязнения, связанного с применением пестицидов // Защита и карантин растений. 2017. № 6. С. 3–7.
4. Петрова М. О., Черменская Т. Д. Поиск остаточных веществ пестицидов в сельскохозяйственной продукции – путь к безопасному продовольствию // Междисциплинарный научный и прикладной журнал «Биосфера». 2019. Т. 11, № 1. С. 40–47.
5. Кротова Л. А., Чибис С. П. Эколого-генетическое влияние химических соединений на адаптацию растений // Современные проблемы науки и образования. 2017. № 6. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=27139> (дата обращения: 12.01.2023).
6. Склюев П. В., Белоусова З. П., Зарубин Ю. П., Пурьгин П. П. Синтез и антибактериальная активность 1-[алкил(арил)сульфонил]-1H-азолов // Бутлеровские сообщения. 2011. Т. 25, № 6. С. 47–54.
7. Кубрина Л. В., Супиниченко Е. А. Использование кресс-салата как тест-объекта для оценки загрязнения снежного покрова // Биологические науки. Научное обозрение. 2021. № 1. С. 11–15.
8. Зейферт Д. В., Опарина Ф. Р., Тукумбетова Н. Р., Князева О. А., Уразаева А. И., Конкина И. Г. Оценка фитотоксичности глюконатов и хлоридов ряда d-элементов с использованием кресс-салата (*Lepidium sativum*) // Башкирский химический журнал. 2012. Т. 19, № 4. С. 20–23.
9. Лакин Г. Ф. Биометрия. М.: Высшая школа, 1990. 352 с.
10. Дзюба А. В., Панин Г. Н. Механизм формирования многолетних направленных изменений климата в прошлом и текущем столетиях // Метеорология и гидрология. 2007. № 5. С. 5–27.
11. Hayashi E., Aoyama N., Still D. W. Quantitative trait loci associated with lettuce seed germination under different temperature and light environments // Genome. 2008. Vol. 51. P. 928–947.
12. Kazmi R. H., Khan N., Willems L. A. J., Van Heusden A. W., Ligterink W., Hilhorst H. W. M. Complex genetics controls natural variation among seed quality phenotypes in a recombinant 17 inbred population of an interspecific cross between *Solanum lycopersicum* × *Solanum pimpinellifolium* // Plant, Cell and Environment. 2012. Vol. 35. P. 929–951.
13. Лутова Л. А. Современные аспекты генетики развития растений // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2013. Т. 17, № 4/2. С. 1003–1014.
14. Ижевский С. С. Негативные последствия применения пестицидов // Защита и карантин растений. 2006. № 5. С. 16–19.
15. Срослова А. А., Постнова М. В., Зимица Ю. А. Особенности адаптации живых организмов // Вестник ВолГУ. Сер. 11. Естественные науки. 2017. Т. 7, № 4. С. 32–38.
16. Засухина Г. Д. Адаптивный ответ – общебиологическая закономерность: факты, гипотезы, вопросы // Радиационная биология. Радиоэкология. 2008. Т. 48, № 4. С. 464–473.
17. Наумов М. М., Зимица Т. В., Хрюкина Е. И., Рябчинская Т. А. Роль полифункциональных регуляторов роста растений в преодолении гербицидного стресса // Агрехимия. 2019. № 5. С. 21–28. <https://doi.org/10.1134/S0002188119050077>
18. Селезнева Е. С. Анализ влияния бензотриазола на некоторые морфофизиологические показатели *Allium fistulosum* // Самарский научный вестник. 2019. Т. 8, № 1 (26). С. 105–109.



19. Неведьева Е. Э. Физиолого-биохимические процессы и морфогенез у растений после действия импульсного давления на семена: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М., 2011. 45 с.
20. Дитченко Т. И., Юрин В. Б., Голубович В. П., Кудряшов А. П. Молекулярные механизмы мембранотропного действия производных 1,2,4-триазола // Ученые записки БГУ. 2002. № 1 (4). С. 11–18.
21. Дитченко Т. И., Голубович В. П., Юрин В. М., Фигловский В. А., Кудряшов А. П. Анализ натрий-калиевой селективности плазматической мембраны растительной клетки при действии фунгицидов триазоловой природы // Вестник БГУ. Сер. 2. 2002. № 1. С. 29–32.
22. Дитченко Т. И., Кудряшов А. П., Юрин В. М. Модификация активности протонного насоса плазмалеммы растительной клетки под действием производных 1,2,4-триазола // Доклады НАН Б. 2002. Т. 46, № 1. С. 78–82.
23. Селезнева Е. С., Теньгаев Е. И. К вопросу об использовании в мониторинге окружающей среды анализа физико-химических параметров ксенобиотиков // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2010. Т. 12, № 1 (4). С. 1149–1152.
24. Попов В. Н., Антипина О. В. Особенности низкотемпературной адаптации теплолюбивых растений // Интенсификация и оптимизация продукционного процесса сельскохозяйственных растений: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Орел: Орловский гос. аграр. ун-т, 2009. С. 128–132.
6. Sklyuyev P. B., Belousova Z. P., Zarubin Yu. P., Purygin P. P. Synthesis and antibacterial activity of 1-[alkyl(aryl)sulfonyl]-1H-azoles. *Butlerov Messages*, 2011, vol. 25, no. 6, pp. 47–54 (in Russian).
7. Kubrina L. V., Supinichenko E. A. The use of watercress as a test object for assessing snow cover pollution. *Biological Sciences. Scientific Review*, 2021, no. 1, pp. 11–15 (in Russian).
8. Seifert D. V., Oparina F. R., Tukumbetova N. R., Knyazeva O. A., Urazaeva A. I., Konkina I. G. Evaluation of phytotoxicity of gluconates and chlorides of a number of d-elements using watercress (*Lepidium sativum*). *Bashkir Chemical Journal*, 2012, vol. 19, no. 4, pp. 20–23 (in Russian).
9. Lakin G. F. *Biometriya* [Biometrics]. Moscow, Vysshaya shkola, 1990. 352 p. (in Russian).
10. Dzyuba A. V., Panin G. N. The mechanism of formation of long-term directional climate changes in the past and current centuries. *Meteorology and Hydrology*, 2007, no. 5, pp. 5–27 (in Russian).
11. Hayashi E., Aoyama N., Still D. W. Quantitative trait loci associated with lettuce seed germination under different temperature and light environments. *Genome*, 2008, vol. 51, pp. 928–947.
12. Kazmi R. H., Khan N., Willems L. A. J., Van Heusden A. W., Ligterink W., Hilhorst H. W. M. Complex genetics controls natural variation among seed quality phenotypes in a recombinant 17 inbred population of an interspecific cross between *Solanum lycopersicum* × *Solanum pimpinellifolium* p. *Plant, Cell and Environment*, 2012, vol. 35, pp. 929–951.
13. Lutova L. A. Modern aspects of plant development genetics. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*, 2013, vol. 17, no. 4/2, pp. 1003–1014 (in Russian).
14. Izhevsky S. S. Negative consequences of the use of pesticides. *Protection and Quarantine of Plants*, 2006, no. 5, pp. 16–19 (in Russian).
15. Sroslova A. A., Postnova M. V., Zimina Yu. A. Features of adaptation of living organisms. *Bulletin of the Volga. Episode 11. Natural Sciences*, 2017, vol. 7, no. 4, pp. 32–38 (in Russian).
16. Zasukhina G. D. Adaptive response – general biological regularity: Facts, hypotheses, questions. *Radiation Biology. Radioecology*, 2008, vol. 48, no. 4, pp. 464–473 (in Russian).
17. Naumov M. M., Zimina T. V., Khryukina E. I., Ryabchinskaya T. A. The role of multifunctional plant growth regulators in overcoming herbicidal stress. *Agrochemistry*, 2019, no. 5, pp. 21–28 (in Russian). <https://doi.org/10.1134/S0002188119050077>
18. Selezneva E. S. Analysis of the effect of benzotriazole on some morphophysiological parameters of *Allium fistulosum*. *Samara Scientific Bulletin*, 2019, vol. 8, no. 1 (26), pp. 105–109 (in Russian).
19. Nefedieva E. E. *Physiological and biochemical processes and morphogenesis in plants after the action of pulsed pressure on seeds*. Thesis Diss. Dr. Sci. (Biol.). Moscow, 2011. 45 p. (in Russian).

## Reference

1. Pobezhimova T. P., Korsukova A. V., Dorofeev N. V., Grabelnykh O. I. Physiological effects of triazole fungicides in plants. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya* [Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology], 2019, vol. 9, no. 3, pp. 461–476 (in Russian). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2019-9-3-461-476>
2. Komarova O. P., Zemlyanitsyna S. V. Reduction of pesticide load as a basis for ecological safety of rural territories. *Fundamental Research*, 2020, no. 3, pp. 54–59 (in Russian). <https://doi.org/10.17513/fr.42699>
3. Zakharchenko V. A. Features of the manifestation of risks of chemical pollution associated with the use of pesticides. *Protection and Quarantine of Plants*, 2017, no. 6, pp. 3–7 (in Russian).
4. Petrova M. O., Chermenskaya T. D. Search for pesticide residues in agricultural products – the way to safe food. *Interdisciplinary scientific and applied journal "Biosphere"*, 2019, vol. 11, no. 1, pp. 40–47 (in Russian).
5. Krotova L. A., Chibis S. P. Ecological and genetic influence of chemical compounds on plant adaptation. *Modern Problems of Science and Education*, 2017, no. 6. Available at: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=27139> (accessed January 12, 2023).



20. Ditchenko T. I., Yurin V. B., Golubovich V. P., Kudryashov A. P. Molecular mechanisms of membranotropic action of 1,2, 4-triazole derivatives. *Scientific Notes of BSU*, 2002, no. 1 (4), pp. 11–18 (in Russian).
21. Ditchenko T. I., Golubovich V. P., Yurin V. M., Figlovsky V. A., Kudryashov A. P. Analysis of sodium-potassium selectivity of plant cell plasma membrane under the action of triazole fungicides. *Bulletin of BSU. Ser. 2*, 2002, no. 1, pp. 29–32 (in Russian).
22. Ditchenko T. I., Kudryashov A. P., Yurin V. M. Modification of proton pump activity of plant cell plasmalemma under the action of 1,2,4-triazole derivatives. *Reports of NAS B*, 2002, vol. 46, no. 1, pp. 78–82 (in Russian).
23. Selezneva E. S., Tengaev E. I. On the use of analysis of physico-chemical parameters of xenobiotics in environmental monitoring. *Izvestiya Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2010, vol. 12, no. 1 (4), pp. 1149–1152 (in Russian).
24. Popov V. N., Antipina O. V. Features of low-temperature adaptation of heat-loving plants. In: *Intensification and optimization of the production process of agricultural plants: Materials of the International scientific and practical conference*. Oryol, Oryol Agrarian University Publ., 2009, pp. 128–132 (in Russian).

Поступила в редакцию 12.04.2023; одобрена после рецензирования 21.05.2023; принята к публикации 01.07.2023  
The article was submitted 12.04.2023; approved after reviewing 21.05.2023; accepted for publication 01.07.2023