

# СОДЕРЖАНИЕ

---

---

Номер 11, 2020

---

---

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

### Плодородие почв

Термическая характеристика и применение пиролитической масс-спектрометрии для исследования изменений свойств и структуры гуминовых кислот почв под влиянием удобрений. Сообщение 2

*Л. К. Шевцова, В. А. Черников, М. В. Беличенко, О. В. Рухович, О. И. Иванова* 3

---

### Регуляторы роста растений

Фитотестирование ростстимулирующей активности биочара и лигногумата на почвах разного гумусного статуса

*А. П. Кирюшина, А. И. Парамонова, Е. В. Прудникова, П. С. Королев, В. А. Терехова* 14

---

### Пестициды

Влияние различных приемов борьбы с сорняками на засоренность посевов нута

*Ю. Я. Спиридонов, Н. И. Будынков, Н. И. Стрижков, Н. Б. Суминова, Б. З. Шагиев* 21

Эффективность химического метода борьбы с зимующими сорняками в допосевной период при возделывании яровой пшеницы

*А. С. Филиппов, В. В. Немченко, А. Ю. Кекало, Н. Ю. Заргарян* 28

---

### Агрэкология

Роль ауксинпродуцирующих бактерий в преодолении стресса растениями пшеницы в условиях обработки гербицидом чисталан

*М. Д. Тимергалин, А. В. Феоктистова, Т. В. Рамеев, Г. Р. Кудоярова, С. П. Четвериков* 35

Эффективность применения азотфиксирующей бактерии при выращивании растений в различных почвенных условиях

*В. П. Шабает* 41

---

### Экотоксикология

Закономерности варьирования величин диффузионных параметров вертикальной миграции тяжелых металлов и фтора в разных почвах при загрязнении

*А. С. Фрид, Т. И. Борисочкина* 53

Влияние фильтрационных вод полигона твердых коммунальных отходов на биомассу и элементный состав растений ячменя

*С. Е. Витковская, Ю. О. Шилова* 66

---

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Определение обменного магния в одномолярной КС1-вытяжке из почв модифицированным спектрофотометрическим методом с титановым желтым

*Ю. М. Логинов, Е. В. Газов* 74

---

## ОБЗОРЫ

Реакция сорного компонента агрофитоценозов на изменение климата

*Е. И. Кошкин, И. В. Андреева, Г. Г. Гусейнов, К. Г. Гусейнов, Ф. С.-У. Джалилов* 83

---

---

# Contents

---

---

No. 11, 2020

---

---

## EXPERIMENTAL ARTICLES

### Soil Fertility

Thermal Characteristics and Application of Pyrolytic Mass Spectrometry to Study Changes in the Structure of Humic Acids under the Influence of Fertilizers. Message 2

*L. K. Shevtsova, V. A. Chernikov, M. V. Belichenko, O. V. Rukhovich, O. I. Ivanov* 3

---

### Plant Growth Regulators

Phytotesting of Growth-Stimulating Activity of Biochar and Lignomhumate on Soils of Different Humus Status

*A. P. Kiryushina, A. I. Paramonova, E. V. Prudnikova, P. S. Korolev, V. A. Terekhova* 14

---

### Pesticides

Influence of Various Methods of Weed Control on Weed Infestation of Chickpea

*Yu. Ya. Spiridonov, N. I. Budynkov, N. I. Strizhkov, N. B. Semenova, B. Z. Shagiev* 21

Effectiveness of Chemical method of Controlling Winter Weeds in the Pre-Sowing Period during the Cultivating of the Spring Wheat

*A. S. Filippov, V. V. Nemchenko, A. Yu. Kekalo, N. Yu. Zargaryan* 28

---

### Agroecology

Role of Aauxin-Producing Bacteria in Overcoming the Stress of Wheat Plants under Treatment with the Herbicide Chistalan

*M. D. Timergalin, A. V. Feoktistova, T. V. Rameev, G. R. Kudoyarova, S. P. Chetverikov* 35

Efficiency of Using N<sub>2</sub>-Fixing Bacterium under Growing Plants in Various Soil Conditions

*V. P. Shabayev* 41

---

### Ecotoxicology

Factors Influencing the Diffusion Parameters of the Vertical Migration of Heavy Metals and Fluorine in Different Soils during Pollution

*A. S. Frid, T. I. Borisochkina* 53

Influence of Filtration Waters of the Solid Municipal Waste Landfill on Biomass and the Elemental Composition of Barley Plants

*S. E. Vitkovskaya, Yu. O. Shilova* 66

---

## RESEARCH METHODS

Determination of Exchange Magnesium in Unipolar KCl Extract from Soil by Modified Spectrophotometric Method with Titanium Yellow

*Yu. M. Loginov* 74

---

## REVIEWS

Response of Weeds in the Canopy to Climate Change

*E.I. Koshkin, I.V. Andreeva, G.G. Guseinov, K.G. Guseinov, F. S.-U. Dzhililov* 83

---

---

## ТЕРМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И ПРИМЕНЕНИЕ ПИРОЛИТИЧЕСКОЙ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ СВОЙСТВ И СТРУКТУРЫ ГУМИНОВЫХ КИСЛОТ ПОЧВ ПОД ВЛИЯНИЕМ УДОБРЕНИЙ. СООБЩЕНИЕ 2

© 2020 г. Л. К. Шевцова<sup>1</sup>, В. А. Черников<sup>2</sup>, М. В. Беличенко<sup>1,\*</sup>,  
О. В. Рухович<sup>1,\*\*</sup>, О. И. Иванова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова  
127550 Москва, ул. Прянишникова, 31а, Россия*

<sup>2</sup> *РГАУ–МСХА им. К.А. Тимирязева  
127550 Москва, ул. Тимирязевская, 49, Россия*

*\*E-mail: mvbelichenko@gmail.com*

*\*\*E-mail: o\_ruhovich@mail.ru*

Поступила в редакцию 04.10.2019 г.

После доработки 10.04.2020 г.

Принята к публикации 10.08.2020 г.

Представлены результаты исследования, дополняющие первое сообщение [1] новыми данными об изменении свойств и молекулярной структуры гуминовых кислот (ГК) почвы при воздействии длительного применения различных систем удобрения, полученные при использовании новых современных методов: дифференциально-термического анализа, в сочетании с пиролитической масс-спектрометрией. Это позволило не только исследовать структуру гумусовых кислот, но и идентифицировать продукты их деструкции, выделяющиеся при термических эффектах. Исследования показали, что длительное применение различных систем удобрения оказывало существенное воздействие на гумусное состояние почв на всех уровнях – от запасов углерода, качественных характеристик гумуса до молекулярных свойств и структуры макромолекулы ГК, что проявлялось в снижении устойчивых к пиролизу циклических структур, разрушающихся при температуре 600–1000°C и увеличении периферических алифатических компонентов, деструктурирующих при *t* до 400°C. Это, в свою очередь, приводило к увеличению содержания подвижных, активных, быстро разлагаемых компонентов состава гумуса почв и уменьшению его устойчивости к внешним природным и техногенным вызовам.

*Ключевые слова:* гуминовые кислоты, молекулярные свойства, структура, длительные опыты, удобрения, дифференциально-термический анализ, пиролиз-масс-спектрокопия.

**DOI:** 10.31857/S0002188120110095

### ВВЕДЕНИЕ

Использование термографического метода анализа дает возможность характеризовать молекулярную структуру гумусовых кислот. Работами ряда исследователей установлено, что деструкция гумусовых веществ в процессе пиролиза позволяет количественно учесть соотношение в молекулах гумусовых кислот ядерных и периферических группировок, что определяет их свойства, способность к химическим реакциям, устойчивость к микробиологическому воздействию, подвижность, и является показателем степени их зрелости. Дифференциально-термический анализ четко демонстрирует двухкомпонентный состав гумусовых кислот, наличие ядерной части молекулы,

устойчивой к воздействию температур, подвергающейся деструкции только в высокотемпературной области и периферической части, представленной алифатическими компонентами, подвергающимися деструкции в низкотемпературной области [2–10]. Термический анализ был использован рядом авторов для установления генетических особенностей почв разных типов, изменения химической структуры гумусовых кислот по профилю почвы [2, 3, 6, 7]. В то же время влияние антропогенных факторов на химическую структуру органического вещества почв, его термоустойчивость пока еще слабо изучено.

Цель работы – методами дифференциально-термического и пиролиз-масс-спектрометриче-

ского анализом исследовать гуминовые кислоты (ГК), выделенные из почв контрастных вариантов длительных полевых опытов: контроль (без удобрений), системы органических удобрений, системы минеральных удобрений (НРК), расположенных на основных типах почв.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объекты исследования и методы выделения и подготовки препаратов ГК изложены в сообщении 1 [1]. Для дифференциально термических исследований препараты гуминовых кислот из дерново-подзолистых и черноземных почв Мироновского НИИ селекции озимой пшеницы (Украина) исследовали на установке системы Ф. Паулик, Дж. Паулик, Л. Эрдеи (Венгрия), применяя следующий режим съемки: скорость поднятия температуры – 5°С/мин, продолжительность нагрева – 200 мин, интервал нагрева – 20–1000°С. Навеска препаратов составляла 30–100 мг, размещалась между слоями прокаленного  $Al_2O_3$ .

Гуминовые кислоты, выделенные из почв длительных опытов Галле (Германия) и Аккавакской опытной станции (Узбекистан) исследовали на установке фирмы “Nereus” (США). Скорость съемки 50°С/мин, навеска образца – 0.8 мг, продолжительность нагрева от комнатной температуры до 1000°С – 200 мин.

Различный режим съемки, определенный использованными приборами, проявлялся в количестве эффектов и их интенсивности, поэтому трудно сравнивать термограммы, полученные для различных типов почв. Однако исследовать действие различных систем удобрения в пределах вариантов опыта возможно.

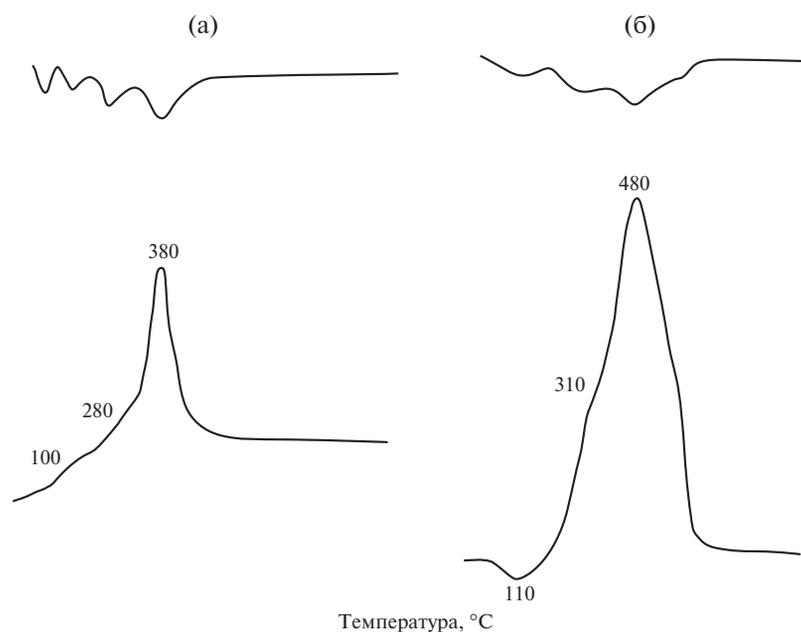
Следует учесть, что результаты анализа: количество эндо- и экзо-термических эффектов, температура их возникновения, величина потери массы, которой сопровождаются эти реакции, в большой степени определялись условиями проведения анализа и зольностью препарата. Например, по данным [8], наличие в золе двухвалентных ионов:  $Ca^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  и др., а также  $Fe^{3+}$  и  $Al^{3+}$  смещали второй эффект в область пониженных температур. Отмечали [4, 9], что существует прямая связь между содержанием золы в гумусовых кислотах и их термостабильностью.

Большое значение имеет скорость нагрева препарата. При длительном нагреве гуминовые кислоты разрушаются на 40–60% даже при 170°С. Уменьшение скорости нагрева снижает температуры эффектов и их интенсивность [4].

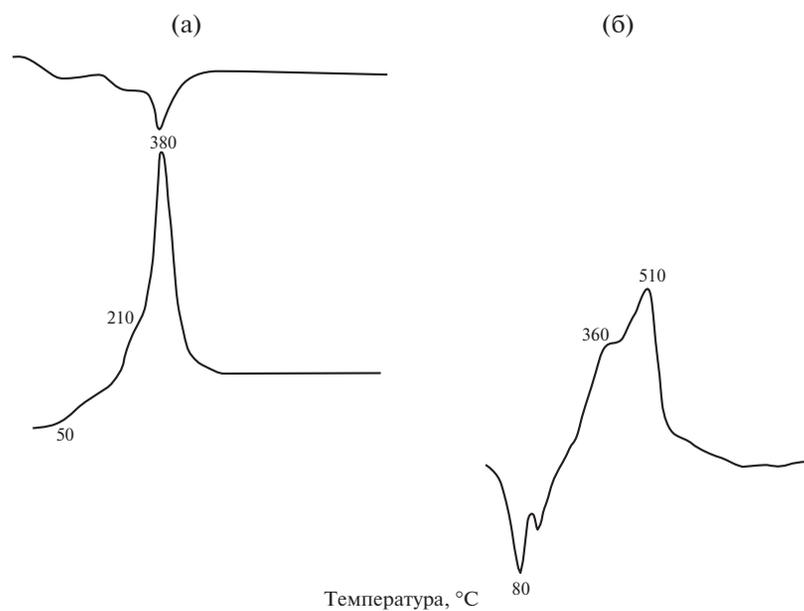
Работая на дериватографе, необходимо учитывать и величину навески препарата. При большой навеске эффекты выражены более четко, температура возникновения экзотермических реакций увеличивается в сравнении с малой массой препарата [4]. В то же время высокая чувствительность термовесов фирмы “Nereus” позволяет исследовать очень маленькие навески препаратов.

Дериватограммы гуминовых кислот, выделенных из почв опыта Мироновского НИИ в вариантах контроль, навоз, НРК, представлены на рис. 1, где четко видно, что кривые дифференциального термического анализа (ДТА) для маленьких навесок дают только один эффект в области 380°С. Даже эндотермический эффект, наиболее характерный для гуминовых кислот, соответствующий потере гигроскопической воды, на этих кривых отсутствует. В виде небольшого плеча намечаются эффекты в области 220–280°С. В то же время кривые ДТА четко указывают на наличие 3-х пиков потери массы (в том числе и потери воды). Увеличение навески до 60 мг при том же режиме съемки приводит к заметному проявлению эндотермического эффекта при  $t = 100–110^{\circ}C$  и смещению третьего эффекта в высокотемпературную область. Теперь он проявляется при  $t = 460–480^{\circ}C$ . Второй эффект, слабо выраженный при массе образца 30 мг, остается таким же нечетким, его температура практически не меняется.

Значительное уменьшение зольности препарата с 27.5 до 5.0% путем центрифугирования 0.1% н. раствора NaOH и гуминовой кислоты при 14000 об./мин, как это было проведено с гуминовой кислотой, извлеченной из почвы того же опыта, в варианте с применением максимальной дозы навоза, способствовало еще большему смещению второго и третьего эффектов в высокотемпературную область (рис. 2). Теперь они проявляются соответственно при  $t = 360$  и  $510^{\circ}C$ . В обеззоленном препарате ясно проявился второй экзотермический эффект. Эти данные важны, в основном, с точки зрения методических подходов к исследованию гумусовых веществ почв методом дериватографии. Они указывают на необходимость строгого соблюдения идентичных условий для работы со сравниваемыми объектами в отношении величины навески препаратов и содержания в них золы. Характер термических эффектов настолько различен, что можно сравнивать данные, полученные на разных приборах (дериватограф производства ВНР и термовесы – США).



**Рис. 1.** Дериватограммы ГК почв опыта Мироновского НИИ пшеницы (контроль): (а) – навеска ГК 30 мг, (б) – навеска ГК 60 мг.



**Рис. 2.** Дериватограммы ГК почв опыта Мироновского НИИ пшеницы (навоз, максимальная доза): (а) – зольность ГК 27.5%, (б) зольность ГК 5%.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По литературным данным, дериватограммы гумусовых кислот характеризуются наличием 3–6 и более максимумов на кривых ДТГ и ДТА, показывающих, что в ходе их пиролиза происходит ряд превращений: расщепление углеродного скелета, отщепление функциональных групп, конденсация как исходных веществ, так и продуктов

их превращения, отщепление водорода и выделение свободного углерода [4, 7, 11].

Все эффекты условно можно разделить на 3 области:

1. Область удаления адсорбционной воды (80–120°C). Начало эффектов наблюдается уже при 50–60°C, что явно связано с обезвоживанием препаратов.

2. Низкотемпературная область (200–400°C). Здесь происходит термическое разрушение боковых алифатических цепочек, отщепление функциональных групп и частичное окисление образовавшихся продуктов, т.е. происходит разрушение структурных компонентов, входящих в состав периферической части молекул гумусовых кислот.

3. Высокотемпературная область (400–600°C и более), в которой происходит разрушение более устойчивых алифатических цепей, предположительно соединяющих между собой ароматические кольца, отщепление более устойчивых функциональных групп, а также отдельных гетероциклов и ароматических колец. Выше 600°C может происходить деструкция конденсированной ароматики, выделение углерода и его окисление. Термогравиметрическая характеристика гуминовых кислот разных типов почв представлена в табл. 1.

Кривые ДТА и ДТГ гуминовых кислот разных типов почв резко отличаются по количеству эффектов. Наиболее просто происходит пиролиз гуминовых кислот дерново-подзолистых и сероземных почв. В этом случае отмечено всего 3 эффекта: 2 – в низкотемпературной и один – в высокотемпературной области. Что касается гуминовых кислот из черноземных почв опыта Германии, то в высокотемпературной области они дают 5 эффектов, сопровождавшихся значительной потерей массы.

Гуминовые кислоты типичных сероземов давнего орошения характеризуются четкой дифференциацией алифатических и ядерных структур, выражаемых одним экзотермическим эффектом в низко- и высокотемпературной области соответственно при  $t = 350\text{--}380^\circ$  и  $610\text{--}675^\circ\text{C}$ .

Полная деструкция гуминовых кислот, выделенных из дерново-подзолистой почвы, заканчивается уже при температуре 400–480°C, что указывает на слабое участие устойчивых циклических компонентов в их структуре. Данные термографического анализа указывают на различия в структуре гуминовых кислот почв разных типов при длительном применении различных систем удобрения.

Для количественной оценки участия периферических радикалов и центральных (ядерных) группировок в построении молекул гумусовых кислот было предложено использовать коэффициент  $Z$  – отношение потери массы вещества в низкотемпературной области к потере массы в высокотемпературной области [6, 8]. Следует отметить, что температурные пределы этих обла-

стей условны, ибо они устанавливаются на основе экспериментально полученных термограмм, и для отдельных гумусовых кислот эти пределы могут изменяться. Различные температурные пределы могут быть у одних и тех же веществ в зависимости от скорости проведения пиролиза. Важно также учитывать, что исследованы подвижные гуминовые кислоты (1-фракция, без декальцирования почвы).

Наиболее низкие величины коэффициента  $Z$  отмечены в вариантах с длительным применением минеральных систем удобрения, что указывает на уменьшение в атомных структурах гуминовых кислот этих вариантов устойчивых фракций и увеличение подвижных, легко разлагающихся периферических структур.

В то же время в черноземных почвах длительного опыта “вечная рожь”, Германия (самый продолжительный опыт в нашем исследовании) ядерная часть молекулы гуминовых кислот представлена большим набором компонентов различной термической устойчивости, деструкция которых сопровождается каскадом экзотермических эффектов.

На основании показателя  $Z$  можно говорить о тенденции к увеличению периферической части молекулы ГК при длительном воздействии удобрений, особенно минеральных систем, в сравнении с контролем и уменьшении центральных (бензоидных), устойчивых структур. Для черноземов Мироновского НИИ и опыта “вечная рожь” в Германии величины коэффициента  $Z$  значительно больше, что указывает на обогащение черноземных почв большим разнообразием органических веществ, в том числе подвижных, быстро разлагаемых фракций, что сохраняет даже в условиях многолетнего использования статус высокоплодородных почв.

*Применение пиролитической масс-спектрометрии для исследования изменений структуры гуминовых кислот почвы под влиянием удобрений.* Наиболее перспективным способом исследования химической структуры высокомолекулярных органических веществ является сочетание термического разложения с масс-спектрометрической идентификацией продуктов деструкции. Этот метод используют сравнительно недавно для исследования гумусовых веществ как в нашей стране [7, 12–14], так и за рубежом [10, 11].

Нами совместно с кафедрой физической и коллоидной химии ТСХА был использован этот метод для выявления состава химических соединений, образующихся при термических эффектах ГК, выделенных из образцов черноземных почв

Таблица 1. Термогравиметрическая характеристика гуминовых кислот почв

Длительность наблюдений, число лет	Вариант опыта	Т°-термоэффекта (над чертой) Потеря массы ГК,% (под чертой)			Коэффициент Z*
		удаление воды	периферическая часть	ядерная часть	
Соликамская опытная станция, севооборот, дерново-подзолистая легкосуглинистая почва					
36	Контроль	50°/14.0	280°/25.0	400°/57.0	0.44
	Навоз	50°/13.0	310°/27.0	430°/55.0	0.49
	НПК	60°/13.0	290°/21.0	420°/58.0	0.36
	НПК + известь	70°/14.0	300°/30.0	460°/56.0	0.54
Скерневице (Польша), севооборот, подзолистая песчаная почва					
51	Контроль	80°/6.0	530°/42.6	950°/54.8	0.78
	НПК-(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	100°/5.1	350°/30.6	580°/64.3	0.48
ДАОС, севооборот, дерново-подзолистая тяжелосуглинистая почва					
35	Контроль	100°/13	260–330°/21	460°/46	0.46
	N400PK	98°/8.0	260–330°/19	460°/43	0.44
	N600PK	100°/12	269–330°/19	460°/46	0.41
	Навоз	80°/5	230°/15 330°/15	450°/44	0.68
Мироновский НИИ, озимая пшеница, чернозем выщелоченный					
57	Контроль	120°/10.0	300°/22.5 400°/37.5	960°/25.0	2.4
	Навоз	80°/12.5	300°/25.0 440°/37.5	960°/20.0	3.13
	НПК	120°/12.5	300°/25.0 450°/35.0	960°/20.0	3.0
Галле, “вечная рожь”, Германия, черноземовидная глинисто-песчаная почва					
100	Контроль	115°/7.8	350°/22.3	850°/8.7	3.0
			500°/23.3	960°/13.6	
			560°/8.7 650°/11.7		
	Навоз	125°/6.4	325°/18.0	830°/12.7	2.7
			525°/27.4	970°/11.9	
			575°/9.1 650°/10.9		
НПК	130°/7.8	350°/19.3	850°/10.3	2.0	
		525°/25.2	950°/11.8		
		560°/8.9 650°/10.3			
Аккавакская опытная станция, Узбекистан, хлопково-люцерновый севооборот, типичный серозем					
16	Контроль	125°/3.5	325°/25.0	676°/65.0	0.38
	НПК	125°/3.5	380°/28.0	610°/62.5	0.45

\*Коэффициент Z – отношение масс низкотемпературных и высокотемпературных эффектов.

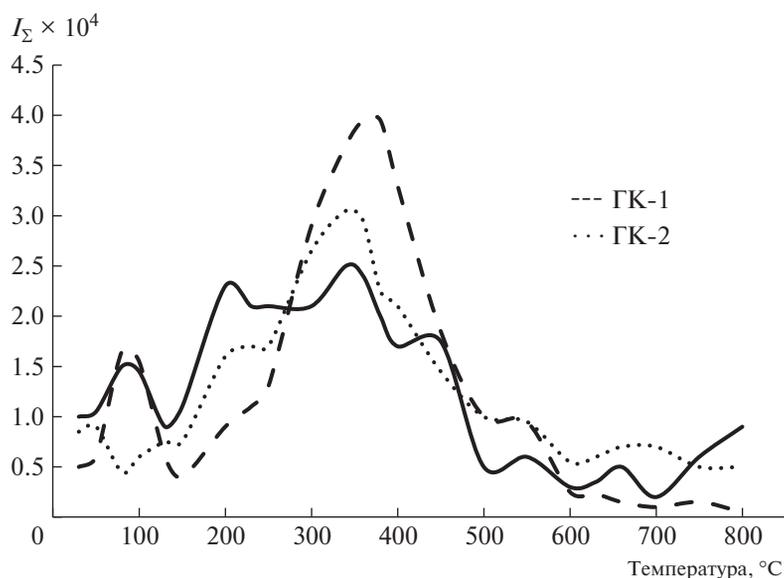


Рис. 3. Масс-термограмма полного ионного тока (ПИТ).

Мироновского НИИ озимой пшеницы. Изучали препараты подвижных гуминовых кислот, извлекаемых 0.1 н. NaOH без декальцирования в вариантах: контроль (без удобрений) (образец 1), органические удобрения (образец 2) и системы минеральных NPK-удобрений (образец 3).

Исследование проводили на установке, включающей пиролизер из нержавеющей стали, присоединенный через вакуумный вентиль к ионному источнику масс-спектрометра МХ-1303. После вакуумирования образца температура увеличивалась от комнатной до 800°C со скоростью 20°/мин, масс-спектры летучих продуктов деструкции регистрировались в диапазоне 15–250 атомных единиц массы через каждые 2 мин, энергия ионизирующих электронов была равна 50 эВ, температура ионного источника 250°C.

Полученные масс-спектры обрабатывали путем измерения интенсивности пиков и выписки их в специальные таблицы гомологических рядов ионов. Качественный анализ масс-спектров продуктов деструкции проводили по характеристическим группам ионов в гомологических рядах, соответствующих молекулярным и осколочным ионам определенных классов соединений, а также по характеру изменения интенсивностей пиков в зависимости от температуры. Основную трудность при анализе масс-спектров продуктов деструкции таких сложных объектов как ГК представляют взаимные наложения масс-спектров разных компонентов. Для учета взаимных наложений использовали корреляционный анализ.

Термограммы по полному ионному току (ПИТ), характеризующие суммарное выделение летучих продуктов пиролиза, показывают наличие 3-х основных температурных областей, в которых происходят основные процессы деструкции ГК: до 150°C, от 150 до 500°C и выше 500°C (рис. 3).

ГК-1 — гумусовые кислоты выделены из почвы контрольного варианта, ГК-2 — из варианта с максимальной дозой навоза и ГК-3 — из варианта с максимальной дозой NPK. Начальная область соответствует разложению наиболее слабо связанных структурных групп. ГК-1 и ГК-2 характеризуются наличием четкого максимума на термограммах в области низких температур пиролиза (80–90°C), на кривой ГК-3 такой максимум отсутствует.

Во второй температурной области, в которой, по-видимому, происходят основные процессы деструкции ГК и выделяется большое количество продуктов деструкции, кривые имеют сложный характер и содержат ряд максимумов. Температурное положение этих максимумов для всех 3-х кривых ГК одинаково, но сами максимумы имеют разную величину. Первый максимум в области 210°C имеет наибольшую величину для ГК-1, соответствующий максимум на кривой для ГК-3 значительно меньше, а для ГК-2 он представляет собой лишь небольшое плечо. Максимум в области 270°C имеет примерно одинаковую величину для всех ГК, но для ГК-2 и ГК-3 он выражен в виде плеча на более интенсивном пике с максимумом в области 330°C. Этот последний сливается с

другим пиком, имеющим максимум в области 360–370°C, который наиболее сильно выражен для ГК-3. На спаде этих больших пиков находится максимум или плечо в области 450°C.

При более высоких температурах пиролиза интенсивность выделения летучих продуктов заметно снижается. В этом случае происходит деструкция наиболее прочно связанных структурных групп и разрушение вторичных структур.

Для характеристики термического поведения разных ГК, отражающего различия в их структуре, можно использовать относительные интенсивности процессов выделения летучих продуктов деструкции на разных этапах пиролиза (оцениваемые по интегральной величине полного ионного тока) (табл. 2). Гуминовые кислоты, выделенные из удобренных почв, характеризуются несколько меньшей относительной интенсивностью выделения летучих продуктов деструкции на первом этапе пиролиза и увеличением на втором. Для ГК-2 характерно относительное уменьшение интенсивности деструкции на третьем этапе пиролиза.

Масс-спектры продуктов деструкции имеют сложный характер, обусловленный наложением масс-спектров большого числа индивидуальных компонентов. На первом этапе пиролиза продукты деструкции ГК содержат ароматические углеводороды (ионы с массами 77.91), ароматические карбоновые кислоты и их сложные эфиры ( $m/z = 105, 119, 133, 149$ ), алкилнафталины ( $m/z = 141, 155$ ). Происходит выделение фенола ( $m/z = 94$ ) (но отсутствуют замещенные фенолы), фуранов ( $m/z = 67, 68, 81, 82$ ). На этом этапе пиролиза наблюдается выделение структурных фрагментов ( $m/z = 168, 189, 190, 217, 231, 193$  и др.), точная идентификация которых в данных условиях невозможна. Общий характер масс-спектров типичен для алифатических и алициклических кислотодосодержащих соединений.

На втором этапе разложения общий вид масс-спектров меняется мало, но становится больше интенсивность пиков, несколько увеличивается вклад пиков ионов, характерных для ароматических структур: бензолов, нафталинов, полициклических ароматических соединений ( $m/z = 153, 154, 165$  и др.). Группы ионов, соответствующих фурановым соединениям, не выражены достаточно четко в гомологических рядах. Интенсивность выделения фенолов увеличивается при повышении температуры, при этом образуется фенол ( $m/z = 94$ ) его метилзамещенные производные ( $m/z = 108, 122$ ), двухатомные фенолы ( $m/z = 110, 124$ ). Образование фенолов характерно для деструкции лиг-

**Таблица 2.** Интенсивность процессов выделения летучих продуктов деструкции на разных этапах пиролиза

Этапы пиролиза	ГК-1	ГК-2	ГК-3
I	0.195	0.151	0.128
II	0.702	0.802	0.769
III	0.101	0.048	0.103

**Таблица 3.** Выделение H<sub>2</sub>O при пиролизе

Этапы пиролиза	ГК-1	ГК-2	ГК-3
I	0.29	0.19	0.25
II	0.63	0.58	0.59
III	0.07	0.23	0.16
Сумма по отношению к ПИТ	0.045	0.027	0.120

ниновой части органического вещества почвы. В этой области температур в масс-спектрах можно выделить пики ионов с массами 98, 113, 114, 126, 140, 154, 168, 182, которые, по-видимому, соответствуют разложению полисахаридных структур. Интенсивные пики ионов с четкими массами ( $m/z = 26, 40, 54$ ), по-видимому, соответствуют нитрилам, образующимся при деструкции аминокислот и пептидов.

На третьем этапе пиролиза (>500°C) масс-спектры становятся менее интенсивными, наблюдается относительное увеличение интенсивности пиков ионов, соответствующих ароматическим структурам, фенолы практически отсутствуют в продуктах деструкции.

Таким образом, в слабосвязанной части структуры ГК, при сравнительно низких температурах содержатся полисахаридные, лигнинные, аминокислотные компоненты, такие же, как и в основной части структуры, разрушающейся при более высоких температурах. В основной части масс-спектра эти компоненты сильнее связаны между собой и с металлами, образуя сшитую трехмерную структуру, включающую ароматические и алициклические группы.

Термограммы, характеризующие выделение отдельных продуктов деструкции, свидетельствуют о больших различиях в структуре ГК, выделенных из почвы разных вариантов опытов. Прежде всего эти различия связаны с выделением H<sub>2</sub>O и CO<sub>2</sub>, образующихся из гидроксильных и карбоксильных групп, кроме начального этапа повышения температуры, когда возможны процессы десорбции. Выделение воды при пиролизе характеризуется различными

**Таблица 4.** Выделение CO<sub>2</sub> при пиролизе

Этапы пиролиза	ГК-1	ГК-2	ГК-3
I	0.08	0.09	0.05
II	0.54	0.66	0.64
III	0.38	0.25	0.30
Сумма по отношению к ПИТ	0.015	0.028	0.050

**Таблица 5.** Выделение фенола (масса иона 34) при пиролизе

Этапы пиролиза	ГК-1	ГК-2	ГК-3
I	0.15	0.12	0.03
II	0.78	0.83	0.89
III	0.07	0.05	0.08
Сумма по отношению к ПИТ	0.0030	0.0069	0.0030

**Таблица 6.** Выделение белковоподобных веществ (масса 30) при пиролизе

Этапы пиролиза	ГК-1	ГК-2	ГК-3
I	0.20	0.12	0.15
II	0.62	0.75	0.69
III	0.18	0.13	0.16
Сумма по отношению к ПИТ	0.009	0.017	0.013

относительными ее количествами, выделившимися на разных стадиях (табл. 3).

Обращает на себя внимание резкое увеличение общего количества выделяемой воды при пиролизе ГК-3 по сравнению с ГК-1 и ГК-2. В случае ГК-2 и ГК-3, выделенных из удобренных почв, относительная интенсивность выделения воды на последнем этапе пиролиза значительно больше, чем для ГК-1.

Выделение CO<sub>2</sub> также характеризуется тремя этапами (табл. 4). Относительная интенсивность выделения CO<sub>2</sub> для ГК на всех этапах пиролиза близка, лишь для ГК-1 она несколько больше на третьем этапе. Суммарное количество выделившегося CO<sub>2</sub> для ГК-2, и особенно для ГК-3, значительно больше, чем для ГК-1.

Подобные примеры можно продолжить. Хотелось бы привести еще один пример – масс-термограмму для Σ68 и других ионов, характеризующих разложение полисахаридных структур, интенсив-

ный процесс как в высокотемпературной, так и в низкотемпературной областях пиролиза, соответствующих выделению фуранолов и фурфурола (рис. 3). Кривая ГК-1 в этом случае имеет острый пик в низкотемпературном интервале и широкий пик со сложной структурой в основной области разложения. Кривая ГК-2 имеет такой же характер, но пики имеют большую интенсивность. На кривой ГК-3 пик в низкотемпературной области практически отсутствует. Таким образом, влияние удобрений существенно сказывается на количестве и форме связи гидроксильных и карбоксильных групп.

Выделение фенолов, характеризующих деструкцию лигниновых компонентов ГК (рис. 3), имеет разный характер в вариантах опытов. Масс-термограмма пика иона с массой 94 (фенол) для ГК-1 имеет целый ряд максимумов во всех 3-х областях пиролиза (табл. 5). Кривая для ГК-2, при увеличении общей интенсивности, качественно подобна кривой для ГК-1. Кривая же для ГК-3 не имеет максимума в начальной области пиролиза. А в основной области имеет широкий пик, соответствующий по температуре одному из пиков на сложных кривых для ГК-1 и ГК-2. Общая суммарная интенсивность выделения фенола для ГК-2 значительно больше, чем для ГК-1 и ГК-3.

ГК-2 из почв, удобрявшихся навозом, отличаются большим развитием полисахаридных и лигниновых компонентов в слабосвязанной и в основной части структуры.

Относительные интенсивности выделения белковоподобных веществ, которые приближенно можно характеризовать пиком иона с массой 30, имеет следующие величины (табл. 6). По относительной интенсивности выделения этих продуктов на разных этапах пиролиза все ГК близки между собой. По суммарной интенсивности образования этих продуктов по отношению к интегральному ПИТ гуминовые кислоты, выделенные из удобренных почв, отличаются более высокими показателями.

Термограммы по пику иона с массой 15 характеризуют выделение СН<sub>4</sub>, происходящее при сравнительно высоких температурах пиролиза. Для ГК-2 и ГК-3, выделенных из удобренных почв, характерно преобладание более высокотемпературных процессов выделения СН<sub>4</sub> по сравнению с ГК-1, а также увеличение их общей интенсивности.

Таким образом, пиролиз-масс-спектрометрические исследования ГК, выделенных из почв длительного опыта Мироновского НИИ под посе-

вами озимой пшеницы (Украина), в вариантах контроль (без удобрений), навоз и минеральные удобрения (НРК) позволили провести глубокий количественный и структурный анализ органических соединений, выделяющихся при термическом разрушении наиболее ценной группы состава гумуса почв – гуминовых кислот. На основе дериватографических и масс-спектрометрических исследований показано, что сложная, высокомолекулярная система гумусовых веществ при термической деструкции распадается на множество ионных потоков и приводит к значительным изменениям структуры ГК.

ГК-2 (вариант с внесением навоза) отличается более интенсивным отщеплением слабо связанных алифатических и других структурных групп, активным разрушением полисахаридных, лигнинных, аминокислотных компонентов и выделением широкой гаммы алифатических, алициклических, ароматических соединений, главным образом, кислородсодержащих. Интенсивность процессов дегидратации и декарбоксилирования ГК-2 слабее, по сравнению с ГК-1 (контрольный вариант).

Органические удобрения вызывают как бы “разрыхление” структуры ГК, что приводит к ее более интенсивному разрушению в начальном и основном температурных интервалах пиролиза и к относительно малой интенсивности выделения продуктов деструкции при самых высоких температурах.

Внесение минеральных удобрений также увеличивает интенсивность процессов деструкции полисахаридных и белковоподобных компонентов ГК, но сравнительно мало меняет процессы деструкции лигнинных компонентов. Минеральные удобрения приводят к более сильному связыванию периферийных компонентов ГК, вызывая относительное уменьшение продуктов деструкции на первом этапе пиролиза.

Относительно слабосвязанная часть структуры ГК, разрушающаяся при сравнительно низких температурах, включает такие же полисахаридные, лигнинные, аминокислотные фрагменты, которые характеризуют и основную часть структуры ГК, деструктирующую при более высоких температурах.

В основной части структуры эти фрагменты сильнее связаны между собой и с металлами, образуя трехмерную структуру, включающую алифатические, ароматические и алициклические структурные группы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение химической природы препаративно выделенных гуминовых кислот (ГК) из разных типов почв длительных (16–100 лет) опытов показало, что длительное применение различных систем удобрения оказывает существенное воздействие на химическую структуру, состав и свойства органического вещества почв в сравнении с контролем (без удобрений).

Эти изменения имеют одинаковую направленность в почвах разных генетических типов и проявляются на молекулярном уровне в изменении элементного состава макромолекул гуминовых кислот, повышении содержания метоксильных функциональных групп, уменьшении устойчивости ГК удобренных почв к пиролизу.

Использование современных методов и приборов: дифференциально-термического анализа и пиролитической масс-спектрометрии позволили исследовать структуру и свойства выделенных препаративно гуминовых кислот (ГК), и идентифицировать вещества, выделяющиеся в процессе их пиролиза.

В сообщении 1 [1] было показано, что в отличие от контроля (без удобрения) в вариантах с органическими удобрениями и особенно с системами минеральных удобрений, почвенное органическое вещество трансформируется в подвижные гидрофильные соединения, что указывает на их меньшую химическую зрелость, нахождение на ранних стадиях гумификации.

Дополнительные исследования с использованием современных методов и оборудования, подтверждают и углубляют эти выводы за счет новых данных.

Показано, что ГК почв разных типов существенно различаются по количеству термоэффектов и температуре прохождения полной термической деструкции. Наиболее просто деструкция ГК происходит в малогумусных дерново-подзолистых и сероземных почвах. Полная деструкция отмечена при температуре 400–480°C.

В черноземных почвах длительного опыта с бессменной рожью в Галле (Германия) пиролиз ядерной части молекулы ГК сопровождался каскадом экзотермических реакций в диапазоне 500–970°C.

На основании показаний коэффициента Z, наблюдается тенденция к увеличению периферической части молекул ГК при применении органических и особенно минеральных удобрений в сравнении с контролем и уменьшение центральной, наиболее устойчивой части гуминовых кислот.

Применение метода пиролитической масс-спектрометрии позволило исследовать вещества, выделяющиеся на разных этапах термического разрушения гуминовых кислот в виде потоков ионов, атомов, осколков высокомолекулярных органических соединений. Идентификация выделяющихся фрагментов пиролиза по анализу масс-спектров, характеру и интенсивности ионных потоков, взаимодействию с потоками других соединений позволяет определить классы органических веществ почвы, являющиеся исходным источником соединений, выделяющихся в процессе пиролиза.

Гуминовые кислоты, выделенные из почв варианта с внесением навоза (ГК-2) характеризуются более сложным исходным составом органического вещества почвы в сравнении с другими вариантами.

ГК-3, выделенные из почв, удобрявшихся минеральными удобрениями, отличаются более сильным связыванием периферийных компонентов ГК, вызывая относительное уменьшение продуктов деструкции на первом этапе пиролиза, но сравнительно мало меняют процессы деструкции лигнинных компонентов.

Относительно слабосвязанная часть структуры ГК, разрушающаяся при сравнительно низких температурах, включает такие же полисахаридные, лигнинные, аминокислотные фрагменты, которые характеризуют основную часть структуры ГК, разрушающуюся при более высоких температурах. В основной части структуры эти фрагменты сильнее связаны между собой и с металлами, образуя трехмерную структуру, включающую алифатические, ароматические и алициклические структурные группы.

Полученные результаты четко указывают на возможность направленного воздействия на процессы трансформации гумуса почв, такие, как сохранение устойчивости к усиливающимся климатическим и техногенным вызовам и оптимизации качественного состава почвенного органического вещества путем разработки специальных целенаправленных систем удобрения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шевцова Л.К., Черников В.А., Сычев В.Г., Беличенко М.В., Рухович О.В., Иванова О.И. Влияние длительного применения удобрений на состав, свойства и структурные характеристики гумусовых кислот основных типов почв. Сообщение 1 // *Агрохимия*. 2019. № 10. С. 3–15.
2. Дубин В.Н. Физико-химическая характеристика гуминовых кислот основных почв Молдавии: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Кишинев, 1968. 21 с.
3. Орлов Д.С., Дубин В.Н., Елькина Д.Ш. Пиролиз и дифференциальный термоанализ гумусовых веществ почв // *Агрохимия*. 1968. № 1. С. 68–78.
4. Орлов Д.С. Гумусовые кислоты почв. М.: Изд-во МГУ, 1974. 333 с.
5. Бацула А.А. Характеристика органического вещества основных типов почв левобережной Украины и его изменение при сельскохозяйственном освоении целинных почв: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1974. 18 с.
6. Боинчан Б.П., Кончиц В.А., Черников В.А. Исследование гумусового состояния пахотных черноземных почв республики Молдова дериватографическим методом // *Изв. ТСХА*. 1998. Вып. 2. С. 127–146.
7. Черников В.А. Диагностика гумусового состояния почвы по показателям структурного состава и физико-химическим свойствам: Автореф. дис. ... д-р с.-х. наук. М., 1984. 39 с.
8. Шурыгина Е.А., Ларина Н.К., Чубарова М.А., Кононова М.М. Дифференциально-термический и термовесовой анализ гумусовых веществ почвы // *Почвоведение*. 1971. № 6. С. 35–44.
9. Драгунов С.С. Химическая природа гуминовых кислот // *Гуминовые удобрения. Теория и практика их применения*. Днепропетровск: Днепропетровский СХИ, 1980. Т. VII. С. 5–21.
10. Schnitzer M. Recent findings on the characterization of humic substances extracted from soils widely differing climatic zones. Vienna: IAEA, 1977. V. 2. P. 117–131.
11. Saiz-Jimenez C., Haider K., Meuzelaar H.L.C. Comparisons of soil organic matter and its fractions by pyrolysis mass-spectrometry // *Geoderma*. 1979. V. 22. № 1. P. 25–37.
12. Хмельницкий Р.А., Черников В.А., Лукашенко И.М. Исследование состава и свойств гумусовых кислот почв комплексом физико-химических методов // *Проблемы почвоведения. Советские почвоведы к 12-му Международ. конгр. почвоведов*. М.: Знание, 1982. С. 37–41.
13. Шевцова Л.К., Бродский Е.С., Лукашенко И.М., Калинин Г.А., Хмельницкий Р.А., Рябченко С.И. Исследование изменений структуры гуминовых кислот и фульвокислот черноземной почвы методом ПМС при внесении удобрений // *Изв. ТСХА*. 1985. № 4. С. 78–84.
14. Бродский Е.С., Никитин Л.Я., Лукашенко И.М., Шевцова Л.К. Анализ гуминовых кислот почв методом пиролитической масс-спектрометрии // *Почвоведение*. 1983. № 1. С. 91–99.

## Thermal Characteristics and Application of Pyrolytic Mass Spectrometry to Study Changes in the Structure of Humic Acids under the Influence of Fertilizers. Message 2

L. K. Shevtsova<sup>a</sup>, V. A. Chernikov<sup>b</sup>, M. V. Belichenko<sup>a, #</sup>,  
O. V. Rukhovich<sup>a, ##</sup>, and O. I. Ivanova<sup>a</sup>

<sup>a</sup> D.N. Pryanishnikov All-Russian Research Institute of Agrochemistry  
ul. Pryanishnikova 31a, Moscow 127550, Russia

<sup>b</sup> RSAU—K.A. Timiryazev Moscow Agricultural Academy  
ul. Timiryazevskaya 49, Moscow 127550, Russia

<sup>#</sup> E-mail: mvbelichenko@gmail.com

<sup>##</sup> E-mail: o\_ruhovich@mail.ru

It was presented research results complementing Message 1 [1], on the effects of the long-term use of various fertilizer systems on the molecular structure and properties of humic acids (HA) using new methods: differential thermal analysis, and pyrolytic mass spectrometry, which allows not only to investigate the structure of humic acids, but also to identify the degradation products released during the thermal effects of HA preparations. Complementary studies have shown that long-term use of various fertilizer systems has a significant impact on the humus state of the soil at all levels, from carbon stocks and its quality characteristics to molecular properties and structure. Complementary studies have shown that long-term use of various fertilizer systems has a significant impact on the humus status of the soil at all levels, from carbon stocks and its quality characteristics to molecular properties and structure. This is manifested in a decrease in the composition of HA of pyrolysis-resistant cyclic structures that break down at temperatures up to 600–1000°C and an increase in peripheral aliphatic components that decompose at t to 400°C, which in turn increases the content of mobile, active, rapidly decomposable components of soil humus and reduces its resistance to external natural and technogenic challenges.

*Key words:* humic acids, molecular properties, structure, long-term experiments, fertilizers, differential thermal analysis, pyrolysis-mass spectroscopy.

УДК 631.98:631.445:631.417.2

## ФИТОТЕСТИРОВАНИЕ РОСТСТИМУЛИРУЮЩЕЙ АКТИВНОСТИ БИОЧАРА И ЛИГНОГУМАТА НА ПОЧВАХ РАЗНОГО ГУМУСНОГО СТАТУСА<sup>1</sup>

© 2020 г. А. П. Кирюшина<sup>1,\*</sup>, А. И. Парамонова<sup>1,2</sup>, Е. В. Прудникова<sup>2</sup>,  
П. С. Королев<sup>2</sup>, В. А. Терехова<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН  
119071 Москва, Ленинский просп., 33, Россия

<sup>2</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, факультет почвоведения  
119991 Москва, Ленинские горы, 1, стр. 12, Россия

\*E-mail: [apkiryushina@gmail.com](mailto:apkiryushina@gmail.com)

Поступила в редакцию 26.03.2020 г.

После доработки 17.04.2020 г.

Принята к публикации 10.08.2020 г.

В лабораторном опыте методом аппликатного и элюатного фитотестирования оценивали ростстимулирующий эффект углеродсодержащих добавок биочара (5%) и лигногумата (0.05%) в образцах 2-х типов почв, содержание органического углерода ( $C_{орг}$ ) в которых различалось более чем в 3 раза (чернозем – 5.4% и агрозем – 1.5%), по изменению длины корней и побегов проростков высших растений. В качестве тест-культур использовали овес посевной (*Avena sativa* L.), горчицу белую (*Sinapis alba* L.) и редьку посевную (редис) (*Raphanus sativus* var.). Тестирование образцов почв, незагрязненных и искусственно загрязненных тяжелыми металлами (ТМ), выдержанных в течение 120 сут в сосудах с ремедиантами при контролируемой влажности (60% ПВ) и температуре ( $22 \pm 2^\circ\text{C}$ ), проводили в пластиковых планшетах. Ремедиационная (ростстимулирующая) активность исследованных углеродсодержащих добавок на разных почвах различалась: значимое снижение негативного фитотоксического эффекта ТМ при совместном внесении биочара и лигногумата проявилось в образцах высокогумусированной почвы. При сравнении чувствительности тест-растений к токсиканту установлено, что она зависела от почвенных условий: редис и овес оказались наиболее восприимчивыми к тяжелым металлам на агроземе, горчица – на черноземе.

**Ключевые слова:** тяжелые металлы, фитотестирование, ремедиация, углеродсодержащие добавки биочара и лигногумата, агрозем, чернозем.

**DOI:** 10.31857/S0002188120110058

### ВВЕДЕНИЕ

Современное состояние почв агроценозов представляется в большинстве регионов как неудовлетворительное ни по плодородию, зависящему от содержания гумуса, ни по уровню химического загрязнения. Загрязнение почв тяжелыми металлами (ТМ) длительное время остается важной проблемой при экологической оценке почв. Оно наносит существенный урон микробиологическим, растительным и животным сообществам. При этом самоочищение почв – процесс длительный. В настоящее время популярны высокомолекулярные углеродистые вещества, такие как гуминовые препараты и биоугли, способ-

ные связывать ТМ в почве, предотвращая их дальнейшие превращения в пищевых цепях биоценозов, в частности, в растениях. Эти вещества способствуют секвестрации органического углерода в почвах агроценозов [1, 2].

Биочар (древесный уголь, или биоуголь) представляет собой продукт пиролиза древесных остатков, характеризующийся пористой структурой, с высокой сорбционной емкостью [3]. Его производство в настоящее время осуществляется в ряде европейских стран (Германии, Швейцарии, Великобритании и др.), в США, а также в России.

В глобальном понимании внесение биочара в почву может служить таким важным целям как уменьшение парникового эффекта за счет секвестрации углерода в почве и снижения тем самым

<sup>1</sup> Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 18-04-01218 (в части постановки эксперимента).

**Таблица 1.** Химические свойства почв

Почва	pH <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	Содержание				Влагоудерживающая способность, %
		C <sub>орг</sub> , %	NH <sub>4</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	N, %	
Агрозем	7.3	1.5	0.72	16.8	0.1	95.9
Чернозем	6.7	5.4	3.90	12	0.2	83.3

выделения CO<sub>2</sub>, а также более мощных парниковых газов N<sub>2</sub>O и CH<sub>4</sub> [4, 5]. Неоднократно показана его способность к улучшению физико-химических свойств почв (водного режима, дренажа, структуры почвы) [6–8], агрохимических характеристик (сорбции питательных веществ, повышения плодородия почв, увеличения урожайности культур) [9, 10], улучшения жизнедеятельности микробиоты почвы [6, 11, 12] и очищения почвы от загрязнителей, в частности ТМ [1, 13] путем фиксации последних в своих полиароматических соединениях.

Перед внесением углеродсодержащих ремедиантов важен расчет эффективной дозы индивидуально для каждой почвы, поскольку они в высоких концентрациях при взаимодействии с конкретной почвой могут негативно влиять как на биоту [14], так и на развитие сельскохозяйственных культур и их урожайность [5].

Кроме того, важным является сырьевой источник, тип древесины и режим термической обработки, которые могут определять эффект биоугля [6]. В связи с этими различиями получаемого продукта в Великобритании разрабатывают “Мандат качества биоугля”. Его первая версия содержит критерии качества биоугля, который можно использовать в сельском хозяйстве, и он может быть безопасным для окружающей среды [15]. В данной работе был использован биочар, соответствующий качеству, описанному в мандате.

Лигногуматы – широко известные продукты так называемой “зеленой химии”, представляют собой полусинтетические вещества на основе солей гуминовых и фульвовых кислот, полученных в результате окислительно-гидролитической деградации лигносодержащего сырья. Лигногуматы рекомендуют для применения в качестве стимуляторов роста и антистрессантов [16]. Показана их способность к сорбционному комплексообразованию с подвижными формами ТМ [14, 17]. При этом их эффекты в разных почвах изучены недостаточно.

Цель работы – исследование ремедиационного влияния биочара (Б) и лигногумата (ЛГ) на об-

разцы почв с высоким и невысоким содержанием органического углерода, незагрязненные и загрязненные ТМ по показателям развития растений в стандартизованных лабораторных тест-системах. Задачи исследования сводились к выявлению и сравнению предполагаемого положительного фитоеффекта от добавленных углеродсодержащих компонентов (биочара и лигногумата) в незагрязненных образцах почв, а также и при их полиметаллическом загрязнении.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в условиях модельного эксперимента в 2018 г. в лаборатории экотоксикологического анализа почв и химико-аналитическом центре факультета почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова. Использовали образцы 2-х типов почв, отобранных из верхнего почвенного горизонта (0–20 см): агрочернозем глинисто-иллювиальный и агрозем альфегумусовый глеевый [18]. Почву освобождали от посторонних включений (фрагментов растений, камней и пр.), высушивали до воздушно-сухого состояния, просеивали через сито с крупным диаметром отверстий (1 см). Почвы различались химическими свойствами и прежде всего – содержанием органического углерода: в черноземе – 5.4, в агроземе – 1.5% (табл. 1).

Влагоудерживающую способность почв определяли согласно ГОСТ 26713-85, pH<sub>H<sub>2</sub>O</sub> – по ГОСТу 26423-85, содержание органического углерода – по ГОСТу 26213-91, содержание подвижных форм фосфора – по ГОСТу 26207-91, аммонийный азот – по ГОСТу 26951-86, общий азот определяли на экспресс-анализаторе CHNS analyzer, VARIO III-EL (Германия).

Обе почвы (агрозем и чернозем) исследовали в нескольких вариантах – натурные (условно незагрязненные), после искусственного полиметаллического загрязнения и после добавок ремедиантов (биочара и лигногумата).

Для вариантов с полиметаллическим загрязнением образцы готовили следующим образом. В сосуды с почвой массой 400 г тяжелые металлы

(ТМ) вносили в виде водных растворов солей:  $\text{CuSO}_4$ ,  $\text{ZnSO}_4$ ,  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ , в дозах 660, 1100 и 650 мг/кг соответственно, что составляло 5 ориентировочно-допустимых концентраций (ОДК) для каждого катиона металла. В вариантах с ремедиантами углеродсодержащие добавки вносили через 7 сут экспозиции образцов с солями металлов в концентрациях: биочар – 5, лигногумат – 0.25%. Все образцы почв инкубировали в контролируемых условиях в течение 120 сут при температуре 22–24°C и относительной влажности воздуха 60%.

Фитотестирование проводили в пластиковых планшетах аппликатным и элюатным способами, согласно методике “Фитоскан” [19].

При аппликатном фитотестировании увлажненную (60% ПВ) почву массой 60 г помещали в нижнюю камеру пластикового двухкамерного планшета, укрывали фильтровальной бумагой, на которую раскладывали семена растений по 10–12 семян в каждый планшет (в зависимости от размера семян). При элюатном способе фитотестирования оценивали эффект водной вытяжки (элюата) из образцов почв, приготовленной стандартным способом в соотношении почва : вода = 1 : 4. В этом варианте в нижнюю камеру пластикового планшета помещали фильтровальную бумагу, пропитанную водной вытяжкой из почвенных образцов (8 мл в каждый планшет). Планшеты выдерживали при температуре 22–24°C в течение 96 ч. По окончании экспозиции у проростков семян регистрировали тест-параметры (длину корней и проростков). Контролем служили проростки семян в планшетах на увлажненной дистиллированной водой фильтровальной бумаге. Фитоэффекты оценивали по изменению тест-параметров относительно контроля (холостого опыта). Каждый вариант опыта имел трехкратную повторность.

В качестве стандартизованных тест-культур, как принято в международной практике, использовали представителей однодольных – овес посевной (*Avena sativa* L.) и двудольных растений – горчицу белую (*Sinapis alba* L.) и редьку посевную (редис) (*Raphanus sativus* var.).

Препарат лигногумата, полученный в ходе искусственной гумификации лигносульфоната, предоставлен компанией НПО “РЭТ” (Россия). Он хорошо растворим в воде, и его использовали в виде водного раствора. Содержание золы в нем составляло 40, N – 0.25, H – 3.72, S – 4.84%, C : N = 135,  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$  9.0.

Биочар, произведенный компанией МЕТАКОМ (Пермь), имел в своем составе фракции биоугля размером 2–8 мм, 88.2% фиксированного углеро-

да, 3% воды, сопутствующие элементы (N – 0.44, H – 0.82, S – 0.19%, C : N = 21.4),  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$  8.9. Биочар применяли в виде порошка.

Ремедианты использовали в смеси и отдельно. Всего проанализировано 8 вариантов опыта для каждого типа почв: контроль, биочар (Б), лигногумат (ЛГ), биочар + лигногумат (Б + ЛГ), тяжелые металлы (ТМ), тяжелые металлы + биочар (ТМ + Б), тяжелые металлы + лигногумат (ТМ + ЛГ), тяжелые металлы + биочар + лигногумат (ТМ + Б + ЛГ).

Статистическую обработку данных проводили в программе Excel 2007.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные при фитотестировании результаты показали различия в проявлении как токсического эффекта от полиметаллического загрязнения 2-х почв, так и в действии углеродсодержащих препаратов, рекомендованных производителями в качестве “почвоулучшителей” [20, 21].

В малогумусированном агроземе угнетающий эффект от внесения ТМ достоверно был зарегистрирован на проростках редиса при анализе почвенных образцов аппликатным способом: длина проростков снижалась на 23 (с 75 до 58 мм), длина корней – на 19% (с 77 до 62 мм) (табл. 2). Для проростков овса наблюдали сходную тенденцию: уменьшение длины побегов на 14 (с 44 до 38 мм) и корней на 9% (72 до 66 мм). При добавлении к загрязненным образцам биочара и лигногумата угнетающий эффект ТМ на тест-культуры не снижался. При этом проростки семян горчицы в малогумусированной почве оказались менее чувствительными к воздействию полиметаллического загрязнения, что свойственно всем сидератным культурам [22].

При анализе водной вытяжки из загрязненных солями металлов почвенных образцов обнаружена стимуляция развития проростков овса: их длина увеличивалась с 23 до 34 мм, длина корней – с 64 до 73 мм. Аналогичную закономерность отметили при сравнении длины корней проростков горчицы (произошло увеличение их длины с 62 до 70 мм). Это, вероятно, свидетельствовало о том, что большая часть ТМ не находилась в водорастворимой форме в отличие от элементов питания, которые легко экстрагируются водой из почвенных образцов и способствуют росту растений. Стимулирующего эффекта на фоне загрязнения ТМ от внесения как биочара, так и лигногумата в агроземе не выявлено.

**Таблица 2.** Результаты фитотестирования образцов агрозема, загрязненных тяжелыми металлами (ТМ) и незагрязненных, с добавками биочара (Б), лигногумата (ЛГ)

Вариант	Длина побегов, мм			Длина корней, мм		
	редис	горчица	овес	редис	горчица	овес
Образцы агрозема						
Контроль	75 ± 8.0	76 ± 5.2	44 ± 6.0	77 ± 7.5	85 ± 8.7	72 ± 11.0
Б	73 ± 12.5	48 ± 7.6	39 ± 7.7	83 ± 10.0	84 ± 2.6	76 ± 4.1
ЛГ	80 ± 10.5	64 ± 5.0	41 ± 9.0	70 ± 8.5	86 ± 13.7	73 ± 7.9
Б + ЛГ	68 ± 7.0	79 ± 6.6	50 ± 4.9	84 ± 9.0	91 ± 8.1	83 ± 12.8
ТМ	58 ± 6.5	79 ± 9.5	38 ± 9.8	62 ± 7.0	89 ± 13.0	66 ± 7.9
ТМ + Б	55 ± 11.5	81 ± 8.1	37 ± 7.6	66 ± 9.5	80 ± 15.1	65 ± 13.3
ТМ + ЛГ	45 ± 6.0	80 ± 13.5	38 ± 9.3	65 ± 9.1	82 ± 10.1	69 ± 3.8
ТМ + Б + ЛГ	57 ± 13.0	90 ± 11.0	44 ± 7.4	68 ± 10.8	85 ± 13.0	67 ± 1.0
Водная вытяжка из образцов агрозема						
Контроль	35 ± 6.3	36 ± 5.9	23 ± 5.6	93 ± 14.7	62 ± 4.2	64 ± 13.2
Б	31 ± 8.7	31 ± 3.1	25 ± 12.4	92 ± 23.1	68 ± 5.3	62 ± 2.9
ЛГ	31 ± 4.9	28 ± 1.1	29 ± 11.8	88 ± 13.9	56 ± 3.8	59 ± 3.2
Б + ЛГ	33 ± 5.1	29 ± 0.1	32 ± 7.2	100 ± 22.8	68 ± 3.7	73 ± 7.8
ТМ	30 ± 7.5	31 ± 4.7	34 ± 0.5	93 ± 17.4	70 ± 6.1	73 ± 7.2
ТМ + Б	28 ± 8.2	32 ± 0.1	37 ± 5.2	87 ± 20.1	73 ± 5.8	69 ± 6.3
ТМ + ЛГ	31 ± 1.4	34 ± 4.8	39 ± 4.0	86 ± 7.6	74 ± 5.0	59 ± 2.6
ТМ + Б + ЛГ	30 ± 7.1	33 ± 2.9	37 ± 6.3	87 ± 20.1	71 ± 5.6	66 ± 1.5

Примечание. ± – стандартное отклонение. То же в табл. 3.

В вариантах с образцами чернозема, в которых аппликатным способом исследовали твердые образцы почв, угнетающий эффект от внесения ТМ отмечен на горчице: длина проростков снижалась на 28% (с 65 до 47 мм) по сравнению с контролем (табл. 3). Внесение лигногумата и биочара отдельно привело к увеличению этого показателя выше контроля (75 мм). Наибольший эффект наблюдали при совместном внесении углеродсодержащих удобрений в чернозем как в вариантах с загрязнением ТМ, так и в не загрязненных.

Угнетающий эффект водной вытяжки из почв в опытах с черноземом при внесении ТМ отмечен для длины проростков овса: она снизилась на 17% (с 36 до 30 мм). Внесение биочара привело к усилению отрицательного эффекта (на 20% относительно варианта с ТМ), лигногумата – к увеличению длины проростков (на 33%). Совместное действие биочара и лигногумата вызвало положительный эффект: длина проростков овса возросла на 22% по сравнению с контролем и на 47% по сравнению с вариантом почвы с ТМ.

Кроме этого, совместное внесение биочара и лигногумата положительно сказалось на развитии корней редиса и горчицы в вариантах с загрязненной почвой при анализе водной вытяжки

(элюата). Длина корней проростков в таких вариантах значительно превышала контроль: на 20% у редиса и 18% у горчицы. Действие одного биочара вызвало снижение длины как проростков (на 20%), так и корней (на 25%) овса относительно варианта почвы с ТМ. Неоднозначный эффект гуминовых продуктов и биочара и ранее отмечали исследователи, наряду с многочисленными публикациями о положительном воздействии их на почвы для секвестрации углерода или как сорбентов токсикантов [13]. Например, при обработке дерново-подзолистой почвы этого типа почв, загрязненной ТМ, токсичность образцов не только не снизилась, а даже увеличилась, что проявилось в гибели дождевых червей [14]. Можно предполагать, что подавляющее рост растений действие биочара вызвано, возможно, его высокой дозой, примененной в эксперименте с культурой овса. Подобное, например, наблюдали при увеличении дозы биочара, примененного под бобовые культуры в качестве удобрения, когда с ростом концентрации биочара снижалась фиксация азота растениями и, как следствие, их урожайность [5]. В любом случае требуются длительные вегетационные и полевые эксперименты для составления прогноза ремедиационного эффекта биочара и

**Таблица 3.** Результаты фитотестирования образцов чернозема, загрязненных тяжелыми металлами (ТМ) и незагрязненных, с добавками биочара (Б), лигногумата (ЛГ)

Вариант	Длина побегов, мм			Длина корней, мм		
	редис	горчица	овес	редис	горчица	овес
Образцы чернозема						
Контроль	46 ± 1.5	65 ± 5.1	51 ± 7.6	60 ± 10.5	83 ± 5.8	67 ± 11.1
Б	45 ± 1.2	64 ± 7.6	59 ± 1.1	71 ± 8.5	95 ± 9.8	81 ± 2.8
ЛГ	51 ± 3.2	82 ± 9.0	58 ± 4.4	67 ± 6.7	88 ± 6.9	75 ± 7.8
Б + ЛГ	64 ± 2.0	75 ± 10.5	67 ± 4.8	75 ± 8.7	88 ± 8.7	88 ± 6.7
ТМ	46 ± 6.6	47 ± 5.5	55 ± 6.5	72 ± 6.0	84 ± 3.4	66 ± 2.4
ТМ + Б	51 ± 4.9	60 ± 12.5	62 ± 3.4	82 ± 7.1	85 ± 8.0	63 ± 3.2
ТМ + ЛГ	48 ± 0.6	64 ± 7.6	58 ± 2.4	72 ± 8.3	83 ± 6.9	74 ± 5.2
ТМ + Б + ЛГ	55 ± 1.3	75 ± 9.7	51 ± 1.1	75 ± 8.9	96 ± 4.0	78 ± 3.9
Водная вытяжка из образцов чернозема						
Контроль	34 ± 4.8	36 ± 2.0	36 ± 2.3	82 ± 4.0	83 ± 2.9	77 ± 2.3
Б	38 ± 2.8	37 ± 1.7	45 ± 5.1	85 ± 3.7	91 ± 7.1	79 ± 4.5
ЛГ	33 ± 2.9	34 ± 0.1	43 ± 5.9	84 ± 4.0	93 ± 0.6	75 ± 2.3
Б + ЛГ	32 ± 4.0	33 ± 1.4	41 ± 7.0	90 ± 4.8	94 ± 7.8	71 ± 1.7
ТМ	36 ± 2.8	35 ± 4.8	30 ± 3.7	87 ± 1.8	83 ± 2.4	75 ± 9.1
ТМ + Б	38 ± 4.5	35 ± 3.9	24 ± 1.2	92 ± 3.5	87 ± 2.5	56 ± 4.6
ТМ + ЛГ	35 ± 3.1	36 ± 3.8	40 ± 1.7	92 ± 6.9	86 ± 4.7	81 ± 6.3
ТМ + Б + ЛГ	40 ± 8.2	38 ± 4.2	44 ± 7.8	98 ± 8.1	98 ± 3.9	83 ± 4.0

лигногумата в длительной перспективе. В настоящее время уже есть попытки описать ремедиационный фитотест биочара на загрязненных ТМ дерново-подзолистых почвах в вегетационном опыте в сосудах с культурой горчицы в лаборатории экотоксикологического анализа почв факультета почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова. Результаты были представлены на VIII съезде Общества почвоведов им. В.В. Докучаева в 2020 г., но еще не опубликованы. Согласно этой работе корреляция между результатами, полученными за весь период вегетации горчицы (хронический фитотест) и краткосрочным фитотестированием на планшетах (острый фитотест) была высокой. Исходя из этого, авторы рекомендуют фитотестирование в планшетном варианте как надежный метод определения токсичности почв и ремедиационных свойств исследуемых углеродсодержащих добавок.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Согласно данным проведенного фитотестирования, можно заключить, что ростостимулирующий эффект от применения ремедиационных препаратов в почвах разного гумусного статуса существенно различался. Ремедиационные свой-

ства исследованных углеродсодержащих добавок были более выражены в высокогумусированной почве, чем в слабогумусированной. Добавки биочара совместно с лигногуматом снижали ингибирующее действие полиметаллического загрязнения на рост растений в черноземе и практически оказались бездейственными в слабогумусированных образцах агрозема.

Необходимо отметить, что достоверные различия в реакции разных почв на углеродсодержащие добавки были установлены на фоне различий в чувствительности тест-растений к тяжелым металлам. В опытах редис оказался наиболее чувствителен к тяжелым металлам в агроземе, а горчица и овес — в черноземе.

При сопоставлении результатов фитотестирования почв в вариантах аппликатного и элюатного способа, сходное для обеих почв действие ТМ в большей степени проявилось при аппликатном фитотестировании. При элюатном фитотестировании действие растворимых питательных компонентов в водной вытяжке даже из почв, загрязненных ТМ, оказалось стимулирующим рост проростков растений (в вариантах с агроземом). Принимая во внимание положительную корреляцию результатов лабораторного фитотестирования аппликатным способом (твердой массы поч-

вы) с вегетационными фитотестами, можно прогнозировать, что выявленный стимулирующий эффект от совместного применения лигногумата и биочара будет распространен на полный цикл вегетации высших растений.

Таким образом, показано, что стимулирующие и ремедиационные свойства исследованных углеродсодержащих добавок (биочара и лигногумата) в большой степени зависели от почвенных свойств, в частности, от наличия нативного органического углерода. Различия в реакциях проростков разных тест-видов растений на добавленные “почвоулучшители” свидетельствовали о необходимости учитывать вид сельскохозяйственных культур, которые предполагается выращивать на обработанной биочаром и лигногуматом почве.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Abbas T., Rizwan M., Al S.* Biochar application increased the growth and yield, and reduced cadmium in drought-stressed wheat grown in an aged contaminated soil // *Ecotoxicol. Environ. Safety*. 2018. № 148. P. 825–833.
2. *Amoah-Antwi C., Kwiatkowska-Malina J., Thornton S.F.* Restoration of soil quality using biochar and brown coal waste: A review // *Sci. Total Environ*. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137852>
3. *Гимаева А.Р., Валинурова Э.Р., Игдавлетова Д.К., Кудашева Ф.Х.* Сорбция ионов тяжелых металлов из воды активированными углеродными адсорбентами // *Сорбц. и хроматограф. процессы*. 2011. Т. 11. Вып. 3. С. 350–356.
4. *Preston C.M., Schmidt M.W.I.* Black (pyrogenic) carbon in boreal forests: a synthesis of current knowledge and uncertainties // *Biogeosci. Discus*. 2006. № 3. P. 211–271.
5. *Rondon M.A., Lehmann J., Ramirez J., Hurtado M.* Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with bio-char additions // *Biol. Fertil. Soils*. 2007. № 43(6). P. 699–708.
6. *Григорьян Б.Р., Грачев А.Н., Кулагина В.И., Сунгатуллина Л.М., Кольцова Т.Г., Рязанов С.С.* Влияние биоугля на рост растений, микробиологические и физико-химические показатели малогумусированной почвы в условиях вегетационного опыта // *Вестн. технол. ун-та*. 2016. Т.19. № 11. С. 186–189.
7. *Повова А.Д., Семаль В.А., Брикманс А.В., Нестерова О.В., Колесникова Ю.А., Бовсун М.А.* Применение биоугля как мелиоранта и его влияние на изменение физических свойств агропочв юга Приморского края // *Вестн. Алтай. ГАУ*. 2019. № 6 (176). С. 57–63.
8. *Edeh I.G., Mašek O., Buss W.* A meta-analysis on biochar’s effects on soil water properties – New insights and future research challenges // *Sci. Total Environ*. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136857>
9. *Мухина И.М.* Влияние карбонизированной биомассы на параметры плодородия дерново-подзолистых почв и эмиссию парниковых газов: Дис. ... канд. биол. наук в форме научн. докл. СПб., 2017. 187 с.
10. *Громакова Н.В.* Исследования влияния биочара на рост и развитие салата-латука на черноземе обыкновенном // *Овощи России*. 2017. № 5(38). С. 72–73.
11. *Ameloot N., Graber E.R., Verheijen F.G.A., De Neve S.* Interactions between biochar stability and soil organisms: review and research needs // *Europ. J. Soil Sci*. 2013. № 64(4). P. 379–390.
12. *Anders E., Watzinger A., Rempt F., Kitzler B., Wimmer B., Zehetner F., Stahr K., Zechmeister-Boltenstern S.* Biochar affects the structure rather than the total biomass of microbial communities in temperate soils // *Agricult. Food Sci*. 2013. № 22. P. 404–423.
13. *Lehmann J., Gaunt J., Rondon M.* Biochar sequestration in terrestrial ecosystems – a review // *Mitig. Adapt. Strat. Glob. Change*. 2006. № 11. P. 403–427.
14. *Пукальчик М.А., Терехова В.А., Якименко О.С., Акулова М.И.* Сравнение ремедиационных эффектов биочара и лигногумата на почвы при полиметаллическом загрязнении // *Теор. и прикл. экол*. 2016. № 2. С. 79–85.
15. *Shackley S., Ibarrola Esteinou R., Hopkins D., Hammond J.* Biochar Quality Mandate (BQM) version 1.0, British Biochar Foundation, 2014. 58 p.
16. *Пукальчик М.А., Панова М.И., Терехова В.А., Якименко О.С., Федосеева Е.В.* Действие гуминовых препаратов на активность почвенных ферментов в модельном опыте // *Агрохимия*. 2017. № 8. С. 84–91.
17. *Степанов А.А., Якименко О.С.* Ремедиация загрязненных городских почв с применением гуминовых препаратов // *Электр. журн. “Живые и биокосные системы”*. <http://www.jbks.ru>. 2016. № 18.
18. *Шишов Л.Л.* Классификация и диагностика почв России. М.: Ойкумена, 2004. 343 с.
19. *Терехова В.А., Якименко О.С., Воронина Л.П., Кыдралиева К.А.* Методика измерения биологической активности гуминовых веществ методом фитотестирования (“Фитоскан”). М.: Доброе слово, 2014. 24 с.
20. *Novak J.M., Lima I., Xing B., Gaskin J.W., Steine, C., Das K.C., Ahmedna M., Rehrh D., Watts D.W., Busscher W.J., Schomberg H.* Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand // *Ann. Environ. Sci*. 2009. № 3. P. 195–206.
21. *Olk D.C., Dinnes D.L., Scoresby R., Callaway C.R., Darlington J.W.* Humic products in agriculture: potential benefits and research challenges – a review // *J. Soils Sediments*. 2018. № 18. P. 2881–2891.
22. *Шевченко В.А., Соловьев А.М.* Биология растений с основами экологии. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2006. 370 с.
23. *Прудникова Е.В., Кирюшина А.П., Терехова В.А.* Оценка фитотоксичности почв: сопоставление тест-параметров в острых и хронических фитотестах // *Мат-лы VIII съезда Общ-ва почвоведов им. В.В. Докучаева*. 2020 (в печати).

## Phytotesting of Growth-Stimulating Activity of Biochar and Lignohumate on Soils of Different Humus Status

A. P. Kiryushina<sup>a,#</sup>, A. I. Paramonova<sup>a,b</sup>, E. V. Prudnikova<sup>b</sup>,  
P. S. Korolev<sup>b</sup>, and V. A. Terekhova<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> *A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution  
Leninskij prosp. 33, Moscow 119071, Russia*

<sup>b</sup> *M.V. Lomonosov Moscow State University, Soil Science Faculty  
Leninskie Gory 1, bld. 12, Moscow 119991, Russia*

<sup>#</sup> *E-mail: apkiryushina@gmail.com*

Under laboratory conditions, the growth-promoting effect of biochar (5%) and lignohumate (0.05%) in samples of two soil types was evaluated. Two types of soil were used with different contents of organic carbon ( $C_{org}$ ): chernozem – 5.4% and agrozem – 1.5%. The method of applicative and eluate phytotesting was used. The measured parameters were the length of the roots and shoots of seedlings of higher plants. We used test cultures of inoculated oats (*Avena sativa* L.), white mustard (*Sinapis alba* L.) and inoculated radishes (radish) (*Raphanus sativus* var.). Testing of soil samples was carried out in plastic tablets. Soil samples were uncontaminated and artificially contaminated with heavy metals (HM). They were kept for 120 days in vessels with re- mediants at a controlled humidity (60% of the total moisture capacity) and temperature ( $22 + 2^{\circ}C$ ). The re- mediation (growth-promoting) activity of carbon-containing additives on two soils was different: the com- bined application of biochar and lignohumate reduced the negative phytoeffect of HM in samples of highly humus soil. Soil conditions affected the sensitivity of the test plants to the toxicant: radishes and oats were most susceptible to heavy metals on agrozem, and mustard on chernozem.

*Key words:* heavy metals, phytotesting, remediation, biochar, lignohumate, agrozem, chernozem.

УДК 632.51:631.963

## ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ПРИЕМОВ БОРЬБЫ С СОРНЯКАМИ НА ЗАСОРЕННОСТЬ ПОСЕВОВ НУТА

© 2020 г. Ю. Я. Спиридонов<sup>1,\*</sup>, Н. И. Будынков<sup>1</sup>, Н. И. Стрижков<sup>2,\*\*</sup>,  
Н. Б. Суминова<sup>3,\*\*\*</sup>, Б. З. Шагиев<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии  
143050 Московская обл., Одинцовский р-н, р.п. Большие Вяземы, ул. Институт, влад. 5, Россия*

<sup>2</sup> *Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Юго-Востока  
410010 Саратов, ул. Тулайкова, 7, Россия*

<sup>3</sup> *Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова  
410012 Саратов, Театральная пл., 1, Россия*

\*E-mail: spiridonov@vniif.ru

\*\*E-mail: raiser-saratov@mail.ru

\*\*\*E-mail: suminovan@mail.ru

Поступила в редакцию 14.04.2020 г.

После доработки 25.04.2020 г.

Принята к публикации 10.08.2020 г.

Приведены результаты исследования влияния агротехнических и комплексных приемов борьбы с сорняками в севообороте в посевах нута в различные по влагообеспеченности годы.

*Ключевые слова:* нут, агротехнические приемы, комплексные приемы, засоренность, многолетние и однолетние сорные растения.

**DOI:** 10.31857/S0002188120110101

### ВВЕДЕНИЕ

Повышение культуры земледелия достигается за счет введения в севооборот перспективных культур, использование в производстве многих мероприятий, в том числе высокоэффективной обработки почвы, оптимальных норм высева и доз удобрений [1–6], фитосанитарного мониторинга и борьбы с вредными организмами [7–9]. Только из-за сорных растений можно не добрать до 1/3 урожая с одновременным ухудшением его качества [10–14]. Данные многолетних опытов показывают, что лучшие результаты в борьбе с вредными организмами достигаются за счет применения высокоэффективных средств защиты растений, используемых на фоне зональной агротехники [15–20].

Меры борьбы с сорняками в Поволжье в посевах нута и, в частности, в Саратовской обл., практически не разработаны вследствие малой распространенности культуры им не уделялось должного внимания. Длительные исследования оценки продуктивности нута в засушливой зоне Поволжья показали, что эта культура может быть страховой в экстремальных условиях. Например, урожай нута в этих условиях может достигать 18–

22 ц/га, что сравнимо только с продуктивностью озимой пшеницы. Цель работы – разработка систем борьбы с сорняками в посевах нута.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Почвы опытных полей НИИСХ Юго-Востока – южные черноземы тяжелосуглинистые средне-мощные. Пахотный слой (0–30 см) содержит: гумус – 4.56, азот – 0.238, фосфор – 0.127%. Сумма поглощенных оснований в горизонте А – 40.0 мг-экв/100 г почвы, рН 7.0.

Площадь учетной делянки – 252 м<sup>2</sup>, четырехкратная повторность, расположение делянок последовательное. Агротехника возделывания нута – общепринятая для этой зоны. Предшественник культуры – яровая пшеница. Норма высева – 1.0 млн семян/га. Обработку гербицидом проводили опрыскивателем “Монсанто”. Обработку гербицидами проводили в варианте с препаратом фронтьер оптим в довсходовый период, в остальных – в фазе 1–3-х листьев.

Урожай убирали комбайном “Сампо-500” сплошным методом, урожай взвешивали с каждой делянки отдельно. Определяли массу зерна в

**Таблица 1.** Влияние комплексного применения различных приемов борьбы с сорняками на засоренность посевов нута в разные по влагообеспеченности годы

Меры борьбы с сорняками	Сухие			Средние			Благоприятные			Среднее		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Без удобрений												
Агротехнические методы (контроль)	36.0	9.6	26.4	43.5	0.0	43.5	62.1	20.4	41.7	49.8	14.0	35.8
Первый комплекс	<u>15.8</u>	<u>6.4</u>	<u>9.4</u>	<u>20.0</u>	<u>7.0</u>	<u>13.0</u>	<u>30.3</u>	<u>15.7</u>	<u>14.6</u>	<u>23.5</u>	<u>11.1</u>	<u>12.4</u>
	56.1	33.3	64.4	54.0	700	70.1	51.2	23.0	65.0	52.8	20.7	65.4
Второй комплекс	<u>11.1</u>	<u>3.4</u>	<u>7.7</u>	<u>17.3</u>	<u>2.8</u>	<u>14.5</u>	<u>17.1</u>	<u>9.0</u>	<u>8.1</u>	<u>14.7</u>	<u>6.1</u>	<u>8.6</u>
	69.2	64.6	70.8	60.2	280	66.7	72.5	55.9	80.6	70.5	56.4	76.0
Третий комплекс	<u>13.1</u>	<u>5.3</u>	<u>7.8</u>	<u>30.0</u>	<u>1.8</u>	<u>28.2</u>	<u>17.3</u>	<u>7.2</u>	<u>10.1</u>	<u>16.9</u>	<u>5.9</u>	<u>11.0</u>
	63.6	44.8	70.4	31.0	180	53.6	72.1	64.7	75.8	66.1	57.8	69.3
Четвертый комплекс	<u>10.6</u>	<u>3.3</u>	<u>7.3</u>	<u>20.4</u>	<u>0.3</u>	<u>20.2</u>	<u>21.4</u>	<u>7.8</u>	<u>13.6</u>	<u>16.9</u>	<u>5.2</u>	<u>11.7</u>
	70.6	65.6	72.3	53.1	20.0	53.6	65.5	61.8	67.4	66.1	62.8	67.3

Примечания. 1. В графе 1 – всего, 2 – многолетние, 3 – однолетние сорняки. То же в табл. 2. 2. Над чертой – шт./м<sup>2</sup>, под чертой – % их гибели. 3. Фон А – удобрения, фон Б – системы гербицидов. 4.  $HCP_{0.5\text{фон А}} = 5.8$ ,  $HCP_{0.5\text{фон Б}} = 9.2$ ,  $HCP_{0.5\text{А} \times \text{Б}} = 13.1$  шт./м<sup>2</sup>.

пересчете на 1 га при 100%-ной чистоте и 14%-ной влажности.

В исследовании использовали сорт Краснокутский 36. Объектом исследования были следующие гербициды: фронтьер оптима, пивот, пульсар.

Схема опыта, варианты: 1 – контроль (агротехнические методы), 2 – фронтьер оптима 1.0 л/га (1-й комплекс), 3 – фронтьер оптима 1.2 л/га (2-й комплекс), 4 – пивот 0.8 л/га (3-й комплекс), 5 – пульсар 1.0 л/га (4-й комплекс).

Годы исследования (2002–2016 гг.) разбиты на 3 группы: благоприятные, средние и сухие. В благоприятные по увлажнению годы выпало за май–июль 184 мм, за год – 585 мм осадков; в средние – за май–июль – 129 мм, за год – 434 мм; в сухие – 81 мм за май–июль, за год – 399 мм, при среднемноголетней сумма осадков за май–июль – 139 мм, за год – 451 мм.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В исследовании было установлено, что количество и биомасса сорных растений изменялись по годам в зависимости от сложившихся погодных условий в период вегетации. Максимальная засоренность отмечена во влажные годы: при исходном учете в благоприятные годы она составила 206 шт., в сухие – только 72.2 шт./м<sup>2</sup> или была в 3.3 раза меньше. К первому учету (через 1 мес. после внесения почвенных препаратов) общая засоренность снизилась в контроле до 185 шт. в благоприятные годы и до 54.3 шт./м<sup>2</sup> – в сухие. Об-

щая закономерность сохранилась – количество сорных растений как в сухие, так и во влажные годы снижалась на одну и ту же величину. Количество многолетних сорняков к этому учету во влажные годы возросло на 54.1%, в сухие – только на 5.3%. В сухие годы количество злаковых сорняков составило ≈50, во влажные – 73.1%. На фоне применения удобрений общее количество сорняков в сухие годы возросло на 4.2, во влажные – на 33.0%. Среди однолетних сорняков, как и на неудобренном фоне, преобладали во влажные годы влаголюбивые злаковые сорняки – куриное просо и щетинники, их доля составила – 78.2%. К концу вегетационного периода засоренность уменьшалась и составила 36 шт./м<sup>2</sup> в сухие годы, в средние по влагообеспеченности годы количество сорняков возросло на 20.8%, во влажные – на 72.5% по сравнению с сухими. Масса сорных растений в сухие и влажные годы была почти одинаковой – 921 г – в сухие и 999 г/м<sup>2</sup> – во влажные, т.е. во влажные годы она была на 8.6% больше.

Внесенные препараты резко уменьшили как число, так и массу сорняков. В вариантах с применением гербицидов к первому учету засоренность посевов нута значительно снизилась. Наиболее сильное снижение засоренности отмечено во влажные годы (68.4–87.2%), в сухие – 60.3–73.3%.

К уборке количество сорняков в сухие годы сократились на 56.1–70.6%, во влажные – на 51.2–72.5% (табл. 1). Масса сорных растений наиболее интенсивно снижалась от применения гербици-

**Таблица 2.** Влияние комплексного применения различных приемов борьбы с сорняками на снижение массы сорняков в посевах нута в разные по влагообеспеченности годы

Меры борьбы с сорняками	Сухие			Средние			Благоприятные			Среднее		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Без удобрений												
Агротехнические методы (контроль)	920.9	258.3	662.6	1036.5	0.0	1036.5	999.3	438.9	560.4	971.7	322.8	648.9
Первый комплекс	<u>220.6</u>	<u>22.6</u>	<u>198.0</u>	<u>340.2</u>	81.2	<u>259.0</u>	<u>408.1</u>	<u>216.6</u>	<u>191.5</u>	<u>326.3</u>	<u>125.4</u>	<u>200.9</u>
	76.0	91.2	70.1	67.2		75.0	59.2	50.6	65.8	66.4	61.2	69.0
Второй комплекс	<u>147.6</u>	<u>15.0</u>	<u>132.7</u>	<u>514.7</u>	73.5	<u>441.2</u>	<u>372.7</u>	<u>181.2</u>	<u>191.5</u>	<u>296.9</u>	<u>104.0</u>	<u>192.9</u>
	84.0	94.2	80.0	50.3		57.4	62.7	56.4	65.8	69.4	67.8	70.3
Третий комплекс	<u>204.7</u>	<u>20.7</u>	<u>184.0</u>	<u>631.0</u>	45.8	<u>585.2</u>	<u>340.5</u>	<u>140.6</u>	<u>199.9</u>	<u>315.3</u>	<u>83.2</u>	<u>232.1</u>
	77.8	92.0	72.2	39.1		43.5	65.9	68.0	64.3	67.6	74.2	64.2
Четвертый комплекс	<u>175.6</u>	<u>14.1</u>	<u>161.5</u>	<u>773.8</u>	3.8	<u>770.0</u>	<u>414.9</u>	<u>136.4</u>	<u>278.5</u>	<u>353.9</u>	<u>73.1</u>	<u>280.8</u>
	80.6	94.5	75.6	74.6		25.7	58.5	68.9	50.3	63.6	77.4	56.4

Примечания. 1. Над чертой – г/м<sup>2</sup>, под чертой – % их гибели. 2.  $HCP_{05 \text{ фон А}} = 110$ ,  $HCP_{05 \text{ фон Б}} = 180$ ,  $HCP_{05 \text{ А} \times \text{Б}} = 250$  г/м<sup>2</sup>.

дов в сухие годы (на 76.0–80.9%), во влажные – только на 58.7–65.9% (табл. 2).

Применение удобрений увеличило токсичность гербицидов в весенний период в сухие годы менее значительно (всего до 7%), во влажные более сильно – до 9%. В сухие годы гербициды снижали более интенсивно вегетативную массу сорных растений на 76–84%, во влажные только на 38.1–64.3%, т.е. в 1.3 раза эффект в сухие годы был больше. Масса сорняков на удобренном фоне, как в сухие, так и во влажные годы была на 21.4–20.2% больше.

При применении гербицидов произошло изменение соотношения разных биологических групп сорняков. В контроле в сухие годы преобладали двудольные однолетники – 61.7%, злаковые однолетники составили всего 11.6%, но на долю многолетних пришлось 26.7%. Под влиянием гербицидов во многих вариантах двудольные однолетники составили не более половины всех сорняков, многолетники составили 30.6–40.5% (табл. 3).

Во влажные годы в контроле все группы сорняков были представлены почти в равной пропорции: 32.8% многолетних, 36.9% двудольных однолетних и 30.3% злаковых однолетних. Препараты уменьшили количество однолетних сорняков, и их доля в фитоценозе сократилась до 48.2–64.6%, но возросла доля многолетних – от 36.4 до 52.6%. На удобренных контрольных делянках доля многолетних в засушливые годы сократилась до 20.2, однолетних – до 79.8, в т.ч. злаковых – до 16.5%. Гербициды на этом фоне заметно уменьшили долю однолетних сорняков до

60.0–68.2%, это повлекло за собой увеличение численности многолетников до 31.6–40.0%. Во влажные годы в общем фитоценозе резко повысилась доля корнеотпрысковых сорняков: в контроле они составили 31.7%, доля однолетних двудольных сорных растений уменьшилась почти в 1.5 раза и составила 44.8%, но возросла численность злаковых до 23.5%. Под влиянием препарата Фронтьер оптимума резко уменьшилась доля двудольных однолетников до 15.6, но увеличилась засоренность злаками до 46.7%. В остальных вариантах под влиянием гербицидов резко сократилась численность злаковых сорняков до 3.7–8.6%. Следовательно, во влажные годы почвенные гербициды оказывали более сильное влияние на однолетние двудольные сорняки, менее – на злаковые, в сухие годы отмечена обратная закономерность.

После всходов препараты во влажные годы сильнее снижали засоренность злаковыми сорняками, чем в сухие. В среднем за годы исследования применение гербицидов позволило на 65.8–83.1% снизить засоренность по сравнению с контролем (табл. 4).

К концу вегетационного периода эффективность всех систем гербицидов значительно снизилась и составила 52.8–70.5%. Под влиянием удобрений общая численность сорняков возросла на 25.9%. Удобрения усиливали токсичность препаратов в среднем на 6.8%. Масса сорных растений к уборке под влиянием препаратов сократилась на 63.6–69.4%. Удобрения увеличили массу сорняков на 12.4%. Кроме этого они усилили воздействие препаратов на снижение массы сорняков в вариантах, где применяли системы герби-

**Таблица 3.** Изменения урожайности нута в зависимости от численности сорняков в посевах

Вариант	Урожайность нута			Сорняки			Снижение урожая на 1 сорняк	
	кг/га	прибавка		всего, г/м <sup>2</sup>	состав, %		кг	%
		кг/га	%		многолетние	однолетние		
Без удобрений								
Сухие годы								
Агротехнические методы (контроль)	1130			36.0	26.7	73.3		
Первый комплекс	1440	310	27.2	15.8	40.5	59.5	15.2	1.35
Второй комплекс	1480	350	30.8	11.1	30.6	69.4	14.0	1.24
Третий комплекс	1370	240	21.2	13.1	40.4	59.6	10.4	0.92
Четвертый комплекс	1370	250	21.7	10.6	31.1	68.9	9.6	0.85
Средние годы								
Агротехнические методы (контроль)	1470			43.5	0.0	100		
Первый комплекс	1600	130	9.0	20.0	35.0	65.0	5.6	0.38
Второй комплекс	1700	230	15.5	17.3	16.2	83.8	8.7	0.59
Третий комплекс	1360	–110	–7.4	30.0	6.0	94.0		
Четвертый комплекс	1340	–130	–8.7	20.4	1.0	99.0		
Благоприятные годы								
Агротехнические методы (контроль)	1060			62.1	32.8	67.2		
Первый комплекс	1510	450	42.9	30.3	51.8	48.2	14.2	1.35
Второй комплекс	1770	720	67.7	17.1	52.6	47.4	15.9	1.50
Третий комплекс	1730	670	63.7	17.3	41.6	58.4	15.0	1.42
Четвертый комплекс	1630	570	53.8	21.4	36.4	63.6	14.0	1.32
Среднее								
Агротехнические методы (контроль)	1130			49.8	28.1	75.9		
Первый комплекс	1490	360	32.1	23.5	4.72	52.8	14.2	1.26
Второй комплекс	1650	520	46.1	14.7	41.5	58.5	14.8	1.31
Третий комплекс	1560	430	38.2	16.8	34.9	65.1	13.1	1.16
Четвертый комплекс	1500	370	32.7	16.9	30.8	69.2	11.2	0.99

цидов с послеуборочным внесением, а на делянках с применением почвенных препаратов получены обратные результаты – эффективность препаратов снижалась.

Примененные различные системы гербицидов изменили соотношения между различными группами сорняков: возросла доля многолетников с 28.1 шт./м<sup>2</sup> в контроле до 30.8–47.2% в опытных вариантах. Наибольшее количество многолетников отмечено при применении почвенных гербицидов – 11.1 шт./м<sup>2</sup> (47.2%). В этом варианте двудольные однолетние составили 28.1, злаковые – 24.7%. На делянках с послеуборочным внесением

препаратов резко сократились как численность, так и доля злаковых сорняков до 5.3–12.9%.

Под влиянием удобрений общее количество сорняков возросло на 25.9, в том числе двудольных – на 8.1, более значительно увеличилось число злаковых – на 23.6, количество корнеотпрысковых уменьшилось на 8.5%.

В посевах нута сорные растения наиболее вредоносны, их вредность проявляется сильнее в благоприятные годы. Например, в сухие годы в среднем во всех вариантах снижение урожая на одно сорное растение составило 12.3 кг, в благоприятные – 14.8 кг, при урожае в контроле в сухие годы, равном 1130 кг/га, во влажные – 10560 кг/га.

**Таблица 4.** Влияние комплексного применения различных приемов борьбы с сорняками и удобрений на засоренность посевов нута в течение вегетационного периода

Вариант	Количество сорняков, шт./м <sup>2</sup>								
	при полных всходах			через 1 мес. после внесения гербицидов			перед уборкой		
	всего	в т.ч.		всего	в т.ч.		всего	много-летние	одно-летние
		много-летние	одно-летние		много-летние	одно-летние			
без удобрений									
Агротехнические приемы (контроль)	142	12.4	129	123	17.6	105	49.8	14.0	35.8
Первый комплекс	78.2	30.6	82.8	71.5	28.4	78.6	52.8	20.7	65.4
Второй комплекс	81.8	29.8	86.8	83.1	54.5	87.6	70.5	56.4	76.0
Третий комплекс	64.1	37.1	66.7	78.6	65.3	80.8	66.1	57.8	69.3
Четвертый комплекс	0.4	41.1	4.4	65.8	55.1	67.6	66.1	62.8	67.3

**Таблица 5.** Изменения урожайности нута в зависимости от массы сорняков в посевах

Вариант	Урожайность			Сорняки			Снижение урожая на 1 г массы сорняков, кг/га		
	кг/га	прибавки		всего, шт./м <sup>2</sup>	состав, %		кг	%	
		кг/га	%		многолетние	однолетние			
Без удобрений									
Сухие годы									
Агротехнические методы (контроль)	1130			921	28.0	72.0			
Первый комплекс	1440	310	27.2	221	10.2	89.8	0.44	0.04	
Второй комплекс	1480	350	30.8	148	10.2	89.8	0.45	0.04	
Третий комплекс	1370	240	21.2	205	10.2	89.9	0.33	0.03	
Четвертый комплекс	1370	250	21.7	176	8.0	92.0	0.33	0.03	
Средние годы									
Агротехнические методы (контроль)	1470			1040	0	100			
Первый комплекс	1600	130	9.0	340	23.9	76.1	0.19	0.01	
Второй комплекс	1700	230	15.5	515	14.3	85.7	0.44	0.03	
Третий комплекс	1360	-110	-7.4	631	7.2	92.8			
Четвертый комплекс	1340	-130	-8.7	77	0.5	99.5			
Благоприятные годы									
Агротехнические методы (контроль)	1060			999	43.9	56.1			
Первый комплекс	1510	450	42.9	408	53.1	46.9	0.77	0.07	
Второй комплекс	1770	720	67.7	373	48.6	51.4	1.14	0.11	
Третий комплекс	1730	670	63.7	341	41.3	58.7	1.02	0.10	
Четвертый комплекс	1630	570	53.8	415	32.9	67.1	0.97	0.09	
Среднее									
Агротехнические методы (контроль)	1130			972	33.2	66.8			
Первый комплекс	1490	360	32.1	326	38.4	61.6	0.56	0.05	
Второй комплекс	1650	520	46.1	297	35.0	65.0	0.77	0.07	
Третий комплекс	1560	430	38.2	315	26.4	73.6	0.66	0.06	
Четвертый комплекс	1500	370	32.7	354	20.6	79.4	0.60	0.05	

Удобрения в опыте увеличивали вредоносность сорных растений, применение удобрений на гербицидном фоне ее усиливали. Например, на удобренном фоне в среднем в опыте вредоносность одного растения возросла в сухие годы с 12.3 до 14.3 кг, т.е. увеличилась на 16.3%, во влажные – только на 5.4%, т.е. возросла с 14.8 до 15.6 кг. Также во влажные годы происходило максимальное снижение урожая на 1 г вегетативной массы сорных растений от 0.07 до 1.1% в сухие – 0.03–0.04%, т.е. во влажные годы вредоносность 1 г сорняка была в 2.3–2.7 раза больше, чем в сухие. Примененные удобрения в вариантах с гербицидами несколько снизили вредоносность 1-го г массы сорняка только в благоприятные годы: с 0.093 до 0.083 кг, т.е. на 7.5%. За весь период исследования удельная вредоносность одного сорного растения менялась от 11.2 до 14.8 кг/га (от 0.99 до 1.31%). Удобрения увеличили вредоносность сорных растений до 13.1–17.6 кг/га (1.13–1.52%) (табл. 5).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, наиболее сильное снижение засоренности посевов нута отмечено во влажные годы – до 87.2, наименьшее в сухие – 73.3%. Удобрения увеличивали эффективность препаратов в сухие годы на 7, во влажные – более значительно – до 9%. В сухие годы гербициды снижали более эффективно массу сорняков – на 76.0–84.0%, во влажные – на 38.1–64.3%. Масса сорняков на удобренном фоне была на 20.2–21.4% больше. Препараты на удобренном фоне более интенсивно снижали массу сорняков во влажные годы, в сухие эффект на всех фонах удобрения был одинаковым.

Изученные комплексы методов борьбы с сорняками с использованием современных гербицидов оказались наиболее эффективными. Лучшим препаратом за годы исследования показал себя фронтьер оптим. Использование препарата фронтьер оптим в дозе 1.2 л/га приводило к гибели 70.5% сорных растений, что способствовало повышению урожайности на 520 кг/га (на 46.1%). При использовании одних агротехнических методов оказалось невозможно добиться очищения полей от сорняков.

Следовательно, проведенное исследование показало перспективность использования при возделывании нута препаратов для борьбы против основных видов сорных растений. В результате значительно снизилась засоренность посевов, что обеспечило получение более высокого урожая.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Nikolaichenko N.V.* Productivity of nontraditional medicinal and forage crops in the conditions of dry steppe of the Volga region // *Inter. J. Adv. Biotechnol. Res.* 2019. Т. 10. № 2. С. 384–391.
2. *Nikolaichenko N.V., Eskov I.D., Muraveva M.V., Strizhkov N.I., Azizov Z.M.* Influence of the seeding rate, sowing methods and disease and pest control measures on the yield and quality of seeds for different varieties of milk thistle // *J. Pharmaceut. Sci. Res.* 2017. Т. 9. № 11. С. 2263–2268.
3. *Nikolaichenko N.V., Eskov I.D., Muraveva M.V., Strizhkov N.I., Azizov Z.M.* Productivity and plant protection from diseases and pests of milk thistle (variety amulet) in chernozems in the steppe zone of the Volga region // *J. Pharmaceut. Sci. Res.* 2017. Т. 9. № 7. С. 1164–1168.
4. *Nikolaichenko N.V., Eskov I.D., Druzhkin A.F., Shyurova N.A., Kishnikatina A.N., Strizhkov N.I.* Yield, oil content and biochemical composition of seeds of milk thistle, depending on the methods of soil cultivation in the Volga region steppe zone // *J. Pharmaceut. Sci. Res.* 2018. Т. 10. № 1. С. 223–227.
5. *Strizhkov N.I., Azizov Z.M., Suminova N.B., Eskov I.D., Nikolaichenko N.V., Molchanova A.V.* The effect of the sowing methods and the seeding rate on the yield of nicaandra physalodes biomass in single-species and mixed with sugar sorghum phytocenoses in the steppe zone of the Volga region // *J. Pharmaceut. Sci. Res.* 2018. Т. 10. № 4. С. 323–329.
6. *Спиридонов Ю.Я., Будынков Н.И., Стрижков Н.И., Суминова Н.Б., Сайфуллина Л.Б., Ленович Д.Р., Султанов А.С.* Последствие гербицидов и динамика их разложения в различных агроландшафтах // *Аграрн. научн. журн.* 2019. № 4. С. 27–31.
7. *Спиридонов Ю.Я., Будынков Н.И., Дудкин И.В., Стрижков Н.И., Суминова Н.Б., Курасова Л.Г., Даулетов М.А.* Распределение вредных организмов по различным элементам рельефа и агроландшафта // *Аграрн. научн. журн.* 2018. № 6. С. 16–20.
8. *Каменченко С.Е., Стрижков Н.И., Наумова Т.В.* Эколого-биоценологические закономерности размножения лугового мотылька в агроценозах Нижнего Поволжья // *Земледелие.* 2013. № 3. С. 37–39.
9. *Каменченко С.Е., Стрижков Н.И., Наумова Т.В.* Вредоносность остроголовых клопов на зерновых культурах в Поволжье // *Земледелие.* 2015. № 2. С. 37–38.
10. *Каменченко С.Е., Стрижков Н.И., Наумова Т.В.* Факторы, влияющие на динамику популяций вредных саранчовых в Нижнем Поволжье // *Земледелие.* 2012. № 1. С. 41–43.
11. *Спиридонов Ю.Я., Будынков Н.И., Дудкин И.В., Стрижков Н.И., Суминова Н.Б., Николайченко Н.В., Даулетов М.А., Ленович Д.Р.* Взаимодействие культурных растений и вредных объектов в агрофитоценозах // *Аграрн. научн. журн.* 2018. № 7. С. 26–30.
12. *Лебедев В.Б., Стрижков Н.И.* Основные направления борьбы с пыреем ползучим // *Достиж. науки и техн. АПК.* 2007. № 8. С. 30–31.
13. *Стрижков Н.И.* Экологически обоснованные минимально необходимые нормы и сроки примене-

- ния гербицидов на полевых культурах // Достиж. науки и техн. АПК. 2007. № 9. С. 19–20.
14. *Стрижков Н.И., Лебедев В.Б., Каменченко С.Е., Долгополов Ю.И., Якушева Л.Д., Власенко Г.И.* Влияние различных факторов на формирование видового состава сорняков и уровень засоренности культур в севооборотах Поволжья // Достиж. науки и техн. АПК 2010. № 5. С. 15–17.
  15. *Спиридонов Ю.Я., Бudyнков Н.И., Стрижков Н.И., Суминова Н.Б., Николайченко Н.В., Ленович Д.Р.* Оптимальные нормы применения перспективных химических средств защиты растений для склоновых агроландшафтов // Аграрн. научн. журн. 2019. № 6. С. 32–37.
  16. *Спиридонов Ю.Я., Бudyнков Н.И., Автаев Р.А., Стрижков Н.И., Атаев С.С.Х., Суминова Н.Б., Даулетов М.А., Ленович Д.Р.* Разработка интегрированной технологии защиты посевов полевых культур от болезней, вредителей и сорняков на основе биологических и химических методов // Аграрн. научн. журн. 2017. № 9. С. 37–42.
  17. *Спиридонов Ю.Я., Бudyнков Н.И., Автаев Р.А., Стрижков Н.И., Суминова Н.Б., Даулетов М.А.* Применение препарата Гермес при возделывании подсолнечника // АПК России. 2017. Т. 24. № 2. С. 303–307.
  18. *Спиридонов Ю.Я., Бudyнков Н.И., Автаев Р.А., Стрижков Н.И., Суминова Н.Б., Критская Е.Е.* Возделывание льна с применением секатора Турбо, Фуроре супер, Баритона и других препаратов в условиях Поволжья // Там же. С. 308–313.
  19. *Спиридонов Ю.Я., Бudyнков Н.И., Автаев Р.А., Стрижков Н.И., Суминова Н.Б., Критская Е.Е.* Применение Экспресса при возделывании подсолнечника // АПК России. 2017. Т. 24. № 3. С. 631–635.
  20. *Спиридонов Ю.Я., Бudyнков Н.И., Автаев Р.А., Стрижков Н.И., Суминова Н.Б., Критская Е.Е.* Разработка технологии борьбы с вредными организмами с помощью секатора Турбо, Ламадора, Фалькона и других препаратов в посевах яровой пшеницы // Там же. С. 636–642.

## Influence of Various Methods of Weed Control on Weed Infestation of Chickpea

**Yu. Ya. Spiridonov<sup>a,#</sup>, N. I. Budykov<sup>a</sup>, N. I. Strizhkov<sup>b,##</sup>,  
N. B. Semenova<sup>c,###</sup>, and B. Z. Shagiev<sup>c</sup>**

<sup>a</sup> *All-Russian Research Institute of Phytopathology  
ul. Institute, vlad. 5, Moscow region, Odintsovo district, Bolshye Vyazemy 143050, Russia*

<sup>b</sup> *All-Russian Research Institute of the South-East  
ul. Tulikova 7, Saratov 410010, Russia*

<sup>c</sup> *N.I. Vavilov Saratov State Agrarian University  
Teatralnaya pl. 1, Saratov 410012, Russia*

<sup>#</sup> *E-mail: spiridonov@vniif.ru*

<sup>##</sup> *E-mail: raiser-saratov@mail.ru*

<sup>###</sup> *E-mail: suminovan@mail.ru*

It is presented the results of research on the influence of agrotechnical and complex methods of weed control in the crop rotation on chickpea crops in different years of moisture availability.

*Key words:* chickpeas, agrotechnical techniques, complex techniques, weeds, perennial and annual weeds.

УДК 632.9: 633.11"321"

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ХИМИЧЕСКОГО МЕТОДА БОРЬБЫ С ЗИМУЮЩИМИ СОРНЯКАМИ В ДОПОСЕВНОЙ ПЕРИОД ПРИ ВОЗДЕЛЫВАНИИ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ<sup>1</sup>

© 2020 г. А. С. Филиппов<sup>1,\*</sup>, В. В. Немченко<sup>1</sup>, А. Ю. Кекало<sup>1</sup>, Н. Ю. Заргарян<sup>1</sup><sup>1</sup>Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения РАН  
620142 Екатеринбург, ул. Белинского, 112а, Россия

\*E-mail: tolifil@yandex.ru

Поступила в редакцию 04.02.2020 г.

После доработки 07.03.2020 г.

Принята к публикации 10.06.2020 г.

Рассмотрена проблема вредоносности зимующих сорняков в посевах яровой пшеницы и причины их распространения в современных условиях минимализации обработки почвы. Для этого провели полевые испытания различных избирательных гербицидов (на основе сульфонилмочевины и сложного эфира 2.4-Д) и одного общеистребительного (на основе глифосата) против зимующих сорняков в допосевной период технологии возделывания яровой пшеницы. Были определены гербициды с наибольшей биологической эффективностью против зимующих сорняков из семейства капустные (Brassicaceae), которые обеспечили максимальный уровень сохраненного урожая яровой пшеницы. На основании полученных результатов рекомендуется проводить раннюю допосевную обработку гербицидами на паровых полях, засоренных зимующими сорняками.

**Ключевые слова:** селективные гербициды, глифосат, зимующие сорняки, пастушья сумка *Capsella bursa-pastoris*, применение гербицидов до посева, биологическая эффективность, яровая пшеница, урожайность.

DOI: 10.31857/S0002188120090045

### ВВЕДЕНИЕ

Зимующие сорные растения занимают промежуточное положение между ранними яровыми и типично озимыми сорняками и могут вести себя, в зависимости от складывающихся условий, и как яровые, и как озимые. Для зимующих сорняков зимний период в их развитии является возможным, но не обязательным. Обычно они дают всходы к осени (2-я половина августа, сентябрь–октябрь), к зиме образуют прикорневую розетку листьев разной мощности и корневую систему, проникающую в почву с осени до 50–80 см, и в такой фазе зимуют [1].

В процессе длительного отбора зимующие сорняки максимально приспособились к разви-

тию в посевах озимых зерновых культур. Ряд авторов выделяет, что именно зимующие сорняки являются наиболее вредоносными в сорняковом ценозе посевов озимой пшеницы и в последние годы доля этих сорняков в общей засоренности малолетними видами только увеличивается [2–5]. При этом эффективным средством борьбы с зимующими видами в посевах озимой пшеницы становится осенняя химическая прополка гербицидами на основе сульфонилмочевин [4, 6].

Однако в Зауралье за последние 10–15 лет зимующие сорняки стали серьезной проблемой и при возделывании яровых культур, в частности яровой пшеницы, как основной зерновой культуры в Курганской обл. Наиболее распространены и вредоносны в регионе виды зимующих сорняков из семейства капустные (Brassicaceae): пастушья сумка (*Capsella bursa-pastoris* (L.) Medik.), крупка перелесковая (*Draba nemorosa* L.), ярутка полевая (*Thlaspi arvense* L.) и некоторые другие, также встречаются ромашка непахучая (*Matricaria inodora* L.) и мелколепесник канадский (*Erigeron canadensis* L.) из семейства астровые (Asteraceae) и стержнекорневой сорняк одуванчик лекарствен-

<sup>1</sup> Исследование выполнено в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования по направлению 153 Программы ФНИ государственных академий наук по теме “Усовершенствовать систему интегрированной защиты растений в ресурсосберегающих технологиях на основе одностороннего применения биологических и химических средств защиты растений нового поколения и комплексного их использования с регуляторами роста и внекорневыми подкормками”.

ный (*Taraxacum officinale* Wigg.), осенние розетки которого также перезимовывают и начинают рано вегетировать вместе с зимующими видами.

Причина распространения этой группы сорняков — массовый переход на минимизацию обработки почвы и технологии с элементами системы “no-till” (оставление стерни, прямой посев), при которых основная обработка (вспашка) заменена мелкими и поверхностными обработками или вообще отсутствует. В отсутствии глубокой вспашки происходит накопление семян сорняков в поверхностном слое, а без проведения механической обработки зяби создаются оптимальные условия для их массового прорастания и развития розеток зимующих сорняков в осенний период [7–10]. При этом весной эти сорняки первыми возобновляют вегетацию (буквально сразу после таяния снега). Активно потребляя влагу и питательные вещества, эти растения быстро иссушают и истощают почву, что приводит не только к значительному снижению урожайности высеваемой культуры, но даже может затруднить сам посев и получение полноценных всходов (в случае высокой плотности засорения) [11, 12].

Отсутствие поздней механической обработки почвы на паровых полях в осенний период характерно для систем земледелия во многих хозяйствах Курганской обл. и в регионе в целом, и обусловлено нехваткой свободных единиц техники или механизаторов и сжатыми сроками благоприятной погоды. При этом в отличие от стерневых фонов на паровых участках проблема с зимующими сорняками зачастую стоит даже острее, т.к. богатый пищей и влагой паровой предшественник является наиболее “удобным” для прорастания зимующих сорняков и обеспечивает их быстрый рост и развитие как осенью, так и весной. В результате уже к 10–15 мая перезимовавшие осенние розетки могут достигнуть фазы бутонизации или начала цветения, после чего они станут весьма устойчивыми к большинству гербицидов и химическая прополка будет малоэффективной.

Стоит отметить, что из агротехнических мер борьбы в весенний период использовать боронование против укоренившихся с осени розеток неэффективно, а заблаговременная культивация или дискование в данной зоне иссушит почву, поэтому можно применить лишь предпосевную культивацию с последующим посевом в ранние сроки (в первой декаде мая), что на практике редко применимо по ряду причин. В этих условиях оперативная допосевная химическая прополка может помочь в борьбе с зимующими сорняками, но при этом остаются вопросы с подбором наиболее

эффективных гербицидов, в частности — обязательен ли к использованию против зимующих сорняков общеистребительный гербицид на основе глифосата (применяемый чаще всего для допосевной обработки) или будет достаточно применить селективные противодвудольные гербициды?

Для решения данной задачи и были проведены исследования, целью которых являлась оптимизация приема допосевной химической прополки против зимующих сорняков в технологии возделывания яровой пшеницы путем определения наиболее эффективных гербицидов.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование провели в полевом опыте в Курганском научно-исследовательском институте сельского хозяйства — филиале УрФАНИЦ УрО РАН в лаборатории регуляторов роста и защиты растений в 2017–2018 гг. Условия вегетации наиболее благоприятными были в 2017 г. (ГТК = 1.24), за счет обильного увлажнения в 3-й декаде мая, 2-й декаде июня и 1-й декаде июля (2–3-кратное превышение декадных норм осадков). В 2018 г. погодные условия были менее благоприятными для растений, ввиду значительного недостатка тепла в мае и июне (на 2.1–2.9°C ниже средне-многолетней температуры), при этом июль был жарким и засушливым, особенно в 1-й декаде (превышение температурной нормы на 2.3°C в отсутствие продуктивных осадков), в целом ГТК за май–август составил 1.2.

Почва опытного участка — чернозем выщелоченный маломощный малогумусный тяжелосуглинистый с содержанием гумуса в пахотном слое (0–20 см) — 4.12%, рН<sub>H<sub>2</sub>O</sub> 6.0, содержание подвижного Р<sub>2</sub>О<sub>5</sub> (по Чирикову) — 97 мг/кг почвы (среднее), обменного К<sub>2</sub>О — 195 мг/кг почвы (очень высокое). Содержание нитратного азота (N-NO<sub>3</sub>) приведено в разделе с результатами опыта.

Предшественник в опыте — ранний пар, технология подготовки которого включала весеннюю обработку стерни предшествующей культуры (пшеницы) на глубину 8–10 см с помощью дисковой бороны БДТ-3 в агрегате с МТЗ-82 и проведение 4–5 культиваций (на глубину 5–7 см) с помощью КПС-4У + МТЗ-82 в течение дальнейшей вегетации. При этом в осенний период (после 20 сентября) культивацию пара уже не проводили.

Агротехника в опыте включала в себя весеннее боронование, затем в сроки 5 и 11 мая — допосевную химическую прополку делянок гербицидами

**Таблица 1.** Эффективность допосевого применения гербицидов при возделывании яровой пшеницы (среднее за 2017–2018 гг.)

Вариант	Исходная засоренность (перед обработкой), розеток/м <sup>2</sup>	Засоренность зимующими сорняками через 30 сут после допосевной химической прополки			
		количество, шт./м <sup>2</sup>	гибель, %	сырая масса, г/м <sup>2</sup>	снижение массы, %
Контроль (без обработки)	92	90	–	978	–
Ларен Про 10 г/га	79	31	66	335	66
Шанстар 15 г/га + + тренд-90 0.2 л/га	78	14	84	93	90
Эстерон 0.6 л/га	77	27	71	282	71
Эстерон 0.4 л/га + + ларен Про 5 г/га	80	18	81	198	80
Торнадо-500 1.5 л/га	79	41	54	210	79
Торнадо-500 1.0 л/га + + ларен Про 5 г/га	78	32	64	226	77
Торнадо-500 1.0 л/га + + эстерон 0.4 л/га	91	19	79	178	82

Примечание. Доминирующий сорняк – *Capsella bursa-pastoris* (L.) Medik.

на основе разных действующих веществ: сульфонилмочевин (метсульфурон-метил и трибенурон-метил), сложного эфира 2,4-Д кислоты (564 г/л) и глифосата (500 г/л) (согласно схеме опыта), а также их баковых смесей. Через 6–10 сут после химической прополки (15–17 мая) проводили посев стерневой сеялкой СКП-2.1 с долотообразными сошниками с нормой высева 4.5 млн всхожих зерен/га. После посева провели прикатывание катками ЗККШ-6. Использовали сорт яровой мягкой пшеницы Зауралочка. Гербициды в опыте вносили ручным опрыскивателем “Solo-456” с расходом рабочего раствора 250 л/га только в допосевной срок, в фазе кушения химическую прополку не проводили. Уборку выполняли комбайном “Сампо-130”. Учеты засоренности, анализ структуры урожая и содержания клейковины были сделаны по общепринятым методикам [13–15]. Статистическую обработку данных провели методом дисперсионного анализа по [16]. Влажность зерна определяли влагомером “Фауна”. Анализ почвенных образцов на содержание НРК проводили в ГСАС “Курганская” по – ГОСТ 26951-86 и ГОСТ 26204-91. Повторность в опыте трехкратная, расположение вариантов систематическое, размер делянок 42 м<sup>2</sup> (3 × 14 м).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Опыт с допосевным применением разноплановых гербицидов (селективных и общеистреби-

тельного) был заложен на паровом поле в связи с его высокой исходной засоренностью зимующими сорняками, сформировавшими розетки еще осенью. В среднем за 2017–2018 гг. исходная засоренность была представлена в основном пастушьей сумкой (*Capsella bursa-pastoris* (L.) Medik.), доля которой в сорном ценозе варьировала от 87 до 98%, кроме пастушьей сумки встречались крупка перелесковая (*Draba nemorosa* L.), единичные розетки одуванчика лекарственного (*Taraxacum officinale* Wigg.) и ромашки непахучей (*Matricaria inodora* L.). Средняя численность сорняков составляла 82 розетки/м<sup>2</sup> (при варьировании на делянках от 77 до 92 шт./м<sup>2</sup>) (табл. 1).

Допосевную химическую прополку проводили 5 мая 2017 г. и 11 мая 2018 г. В это время основная часть зимующих сорняков была в фазе розетки, но некоторые растения уже находились в начале цветения. На 2–3-и сут после обработки в вариантах с применением 2,4-Д эфира была хорошо видна деформация вегетативной массы сорняков, на 5–6-е сут хорошо выделялись по изменению окраски сорняков (побледнение, пожелтение) варианты с применением гербицидов на основе сульфонилмочевины (ларен Про и шанстар). В вариантах с чистым глифосатом обработанные сорняки визуально почти не отличались от контроля и только через 7–8 сут становилось заметным изменение окраски (побурение). Посев пшеницы проводили через 6–10 сут после опрыски-

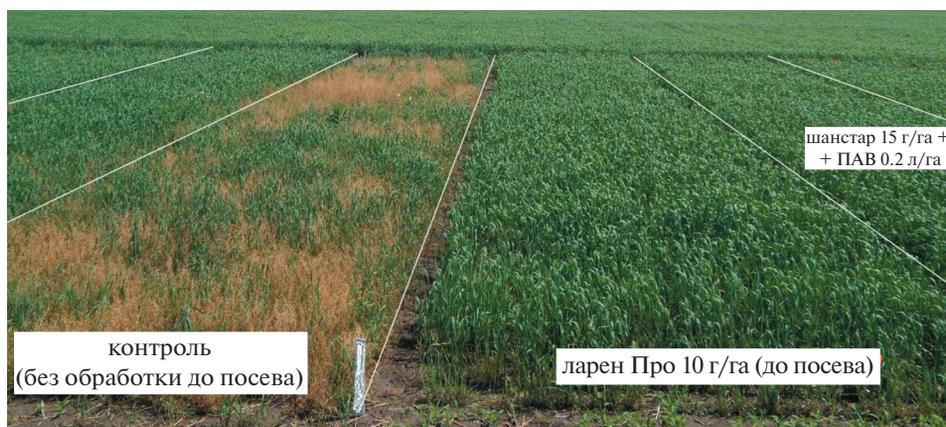


Рис. 1. Состояние посевов пшеницы в зависимости от вариантов допосевной обработки, июнь 2017 г.

вания гербицидами. В вариантах с обработкой всходы пшеницы появлялись на 8–9-е сут, в контроле – позднее (на 10–12-е сут) и были “рваными” в местах наибольшей плотности сорняков.

Следует отметить, что в условиях холодной погоды в мае 2018 г. была отмечена недостаточная гербицидная эффективность против пастушьей сумки (слабее чем в 2017 г.) у гербицидов эстерон и ларен Про, т.к. спустя 7–10 сут после химической прополки угнетенные и деформированные (при применении эстерона) розетки сорняка в большинстве своем продолжили отрастание и даже дальнейшее цветение.

Учет засоренности, проведенный через 30 сут после допосевной химической прополки показал, что засоренность зимующими сорняками (в основном пастушьей сумкой и единичной крупкой перелесковой) в контрольном варианте составляла 90 шт./м<sup>2</sup> с массой 978 г/м<sup>2</sup>. При этом было отмечено, что бóльшая часть сорных растений уже находилась в фазе созревания и их вегетативная масса начинала желтеть. В среднем за 2017–2018 гг. наибольшую эффективность снижения численности сорняков обеспечили варианты: шанстар 15 г/га + тренд-90 (прилипатель) 0.2 л/га, эстерон 0.4 л/га + ларен Про 5 г/га и торнадо-500 1.0 л/га + эстерон 0.4 л/га – 79–84%. По снижению сырой массы сорняков максимальную эффективность (90%) обеспечил вариант с препаратом на основе трибенурон-метила в смеси с прилипателем (шанстар 15 г/га + тренд-90 0.2 л/га), высокие показатели снижения сорной массы (>75% к контролю) обеспечили все остальные варианты, за исключением эстерон 0.6 л/га и ларен Про 10 г/га, в которых подавление массы сорняков было на уровне 66 и 71% к контролю соответственно. Следует отметить, что из 2-х испытанных сульфонилмочевин вариант с шанстаром

(трибенурон-метил) + тренд-90 был значительно эффективнее, чем метсульфурон-метил в чистом виде, что было заметно даже визуально. Также стоит отметить, что смесь эстерон 0.4 л/га + ларен Про 5 г/га также была эффективнее, чем чистый эстерон, а из вариантов с торнадо-500 лучшие показатели эффективности были при использовании смеси с эстероном. Стоит добавить, что и визуально контрольные и обработанные до посева делянки по плотности стеблестоя отличались кардинально (рис. 1).

В период появления всходов культуры в 2018 г. отбирали средний почвенный образец с глубины 0–20 и 20–40 см на определение содержания нитратного азота в нескольких вариантах опыта (включая контроль) и для сравнения отдельные образцы на участке без сорняков в непосредственной близости от опыта (который был обработан механически с осени) (табл. 2). Анализ почвы показал, что уже в начальный период роста (до цветения) пастушья сумка (*Capsella bursa-pastoris* (L.) Medik.), как доминирующий сорняк, и другие зимующие виды активно потребляли нитратный азот: его потери составили 16 мг/кг почвы в слое 0–40 см (или 38 кг/га), и это отмечено еще только в начале вегетации.

В результате учет урожая в среднем за 2017–2018 гг. показал, что в варианте без использования гербицидов до посева продуктивность пшеницы сорта Зауралочка составила всего 12.3 ц/га (табл. 3). Допосевное применение гербицидов в этих условиях обеспечило сохранение урожайности на уровне 22.9–27.7 ц/га, таким образом прибавки к контролю варьировали в пределах 10.7–15.5 ц/га. Наименьшая прибавка была получена в варианте ларен Про 10 г/га – 10.7 ц/га, остальные гербициды и их смеси, за исключением эстерона, обеспечили прибавки урожайности существенно

**Таблица 2.** Результаты анализа почвенных образцов опытного поля, предшественник – пар (среднее, май 2017 и 2018 гг.)

№ образца	Глубина отбора, см	Содержание N-NO <sub>3</sub> , мг/кг почвы	Назначение участка
1	0–20	9.8	Опыт с допосевным применением гербицидов
2	20–40	11.5	
3	0–20	19.5	Незасеянный участок вблизи опыта, чистый от сорняков
4	20–40	17.8	

**Таблица 3.** Урожайность и качество зерна яровой пшеницы в зависимости от вариантов допосевной обработки гербицидами (среднее за 2017–2018 гг.)

Вариант	Урожайность, ц/га		Содержание клейковины в зерне		Упругость клейковины, ед. ИДК-1
	всего	прибавки от допосевной обработки	всего	+/- к контролю	
Контроль (без обработки)	12.3	–	25.4	–	65
Ларен про 10 г/га	22.9	10.7	24.6	–0.8	60
Шанстар 15 г/га + + тренд-90 0.2 л/га	27.7	15.5	25.8	0.4	65
Эстерон 0.6 л/га	25.8	13.5	26.0	0.6	60
Эстерон 0.4 л/га + + ларен Про 5 г/га	26.4	14.2	25.6	0.1	65
Торнадо-500 1.5 л/га	26.5	14.3	26.3	0.9	60
Торнадо-500 1.0 л/га + + ларен про 5 г/га	26.5	14.2	26.3	0.9	65
Торнадо-500 1.0 л/га + + эстерон 0.4 л/га	27.2	14.9	–	–	–
<i>HCP</i> <sub>05</sub>	3.4				

больше – 14.2–15.5 ц/га. Анализ корреляционной зависимости показал очень сильную отрицательную связь между сырой массой сорняков и урожайностью, при этом коэффициент корреляции был равен –0.99.

Лабораторный анализ качества зерна пшеницы сорта Зауралочка показал, что при возделывании после пара формировалось содержание клейковины >25%, что в сочетании с ее хорошим качеством (60–70 ед. ИДК – 1-я группа) позволяло относить полученное зерно к 3-му классу. Существенного отрицательного или положительного влияния на качество зерна яровой пшеницы варианты допосевной химической прополки не оказали.

Результаты анализа структуры урожая яровой пшеницы показали (табл. 4), что на фоне высокой засоренности зимующими сорняками допосевная химическая прополка оказала наибольшее положительное влияние на выживаемость растений (она увеличилась на 13–23%) и густоту продуктивного стеблестоя, при этом среднее увеличение этого показателя составило 119 стеблей/м<sup>2</sup> или 49% к контролю (при варьировании прироста стеблей от 83 до 132 стеблей/м<sup>2</sup>). Также отмечено значительное возрастание озерненности колоса (в пределах 30–43% к контролю) – с 18.6 зерен с колоса в контроле до 24.2–26.5 в вариантах применения гербицидов. Прирост озерненности в сочетании с увеличением массы 1000 зерен (на 1.3–1.6 г или на 4–5% к контролю) обеспечили

**Таблица 4.** Структура урожая яровой пшеницы в зависимости от допосевного применения гербицидов (среднее за 2017–2018 гг.)

Вариант	Выживаемость, %	Количество продуктивных стеблей, шт./м <sup>2</sup>	Количество, шт.		Масса зерна с 10-ти колосьев, г	Масса 1000 зерен, г
			колосков в колосе	зерен в колосе		
Контроль (без обработки)	51	242	10.2	18.6	5.7	30.2
Шанстар 15 г/га + тренд-90 0.2 л/га	71	365	13.7	26.5	8.5	31.6
Эстерон 0.6 л/га	64	325	13.3	25.8	8.2	31.6
Эстерон 0.4 л/га + ларен Про 5 г/га	74	370	12.6	24.4	7.8	31.7
Торнадо-500 1.5 л/га	70	373	13.3	25.5	8.1	31.5
Торнадо-500 1.0 л/га + ларен Про 5 г/га	68	369	12.7	24.2	7.6	31.5

возрастание и массы зерна с 10-ти колосьев (на 35–50% к контролю). Это в итоге определило удвоение урожайности зерна яровой пшеницы в вариантах с защитой от зимующих сорняков.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из результатов проведенных полевых опытов, следует, что на фоне минимализации обработки почвы группа зимующих сорняков, особенно виды семейства капустные (*Brassicaceae*), стала очень вредоносной и распространенной, и не только при возделывании озимых культур, но и пшеницы яровой. Поэтому допосевная химическая прополка на паровых участках со степенью засорения в осенний период >15–20 розеток/м<sup>2</sup> такими зимующими сорняками как пастушья сумка (*Capsella bursa-pastoris* (L.) Medik.), крупка перелесковая (*Draba nemorosa* L.) и некоторыми другими из семейства капустные, является обязательным приемом в отсутствие возможности механического уничтожения данной сорной растительности в осенний период. Однако, как показывает производственная практика, весной существует риск по каким-либо причинам (организационно-техническим или погодным) не успеть провести химическую прополку в оптимальный срок (фаза розетки зимующих видов), в этом случае применение гербицидов будет практически бесполезным. Поэтому следует особо подчеркнуть, что эффективность данного приема в сильной степени зависит от своевременности и оперативности обработки.

В результате испытаний определено, что в борьбе с зимующими сорняками из семейства капустные при возделывании яровой пшеницы не

обязательно использовать дорогостоящие общеистребительные гербициды на основе глифосата, а достаточно применить противодудольный гербицид на основе трибенурон-метила (15 г/га) в смеси с препаратом тренд-90 или другим прилипателем, а также сложного 2,4-Д эфира (0.4 л/га) в смеси с метсульфурон-метилом (5 г/га). В случае необходимости использования гербицида на основе глифосата (при наличии падалицы зерновых или ранних всходов овсяга) для снижения стоимости обработки и повышения биологической эффективности против зимующих видов следует применить смесь глифосат 50% 1.0 л/га + -Д эфир 0.4 л/га.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Токаренко В.Н., Решетняк Н.В., Коваленко И.А. Особенности роста и развития летних всходов зимующих сорняков // Вестн. ДонГАУ. 2017. № 1 (23). С. 60–65.
2. Скоблина В.И. Влияние разных предшественников и органических удобрений на засоренность посевов озимой пшеницы // Экол. безопасность в АПК. Реферат. журн. 2002. № 1. С. 120–121.
3. Шпанев А.М. Вредоносность сорных растений в посевах пшеницы озимой на Северо-Западе России // Вестн. защиты раст. 2018. № 2. С. 42–46.
4. Спиридонов Ю.Я., Никитин Н.В., Протасова Л.Д., Абуликеров В.А., Спиридонова Г.С., Калимуллин А.Т., Спиридонова И.Ю., Босак Г.С. Итоги многолетнего изучения осеннего применения гербицидов в посевах озимой пшеницы в условиях Центрального Нечерноземья РФ // Агрехимия. 2017. № 8. С. 53–67.
5. Фетюхин И.В., Баранов А.А. Интегрированная защита озимой пшеницы от сорняков // Зерн. хоз-во России. 2019. № 1(61). С. 6–9.

6. Туляков Д.Г., Полин В.Д., Смелкова И.А. Регулирование сорного компонента в посевах озимой пшеницы в условиях Московской области // Мелиорация в России: потенциал и стратегия развития. Мат-лы Международ. научн.-практ. интернет-конф., посвящ. 50-летию масштабной программы развития мелиорации земель. Волгоград: ВНИИ орошаемого земледелия, 2016. С. 169–174.
7. Система защиты растений в ресурсосберегающих технологиях (коллективная монография) / Под ред. Немченко В.В. Куртамыш: Куртамышская типография, 2011. 525 с.
8. Полин В.Д., Смелкова И.А. Изменение сорного компонента под действием ресурсосберегающих систем обработки почвы в зернопропашном севообороте и методы борьбы с ним // Земледелие. 2015. № 8. С. 29–32.
9. Стецов Г.Я. Борьбу с сорняками надо начинать с изучения их биологии // Аграрн. сектор. 2018. № 4(38). С. 58–65.
10. Научно обоснованная зональная система земледелия Свердловской области (коллективная монография) / Под ред. Зезина Н.Н. Екатеринбург: УралНИИСХ, 2019. 371 с.
11. Филиппов А.С., Немченко В.В. Технологии применения гербицидов на зерновых культурах в условиях минимализации обработки почвы. Куртамыш: Куртамышская типография, 2016. 100 с.
12. Рекомендации по проведению весенне-полевых работ сельскохозяйственными товаропроизводителями Курганской области в 2018 году. Куртамыш: Куртамышская типография, 2018. 120 с.
13. Экологический мониторинг и методы совершенствования защиты зерновых культур от вредителей, болезней и сорняков: метод. рекоменд. / Под ред. Танского В.И. СПб.: ВИЗР, 2002. 76 с.
14. Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур: общ. часть. Вып. 1. Гос. комиссия по сортоиспытанию с.-х. культур при МСХ СССР. М.: Колос, 1985. 269 с.
15. Методы определения количества и качества клейковины в зерне пшеницы. М.: Изд-во стандартов, 1968. 5 с.
16. Доснехов Б.А. Методика полевого опыта с основами статистической обработки результатов исследований. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.

## **Effectiveness of Chemical method of Controlling Winter Weeds in the Pre-Sowing Period during the Cultivating of the Spring Wheat**

**A. S. Filippov<sup>a,#</sup>, V. V. Nemchenko<sup>a</sup>, A. Yu. Kekalo<sup>a</sup>, and N. Yu. Zargaryan<sup>a</sup>**

<sup>a</sup>*Ural Federal Agrarian Scientific Research Centre, Ural Branch of the RAS  
ul. Belinskogo 112a, Ekaterinburg 620142, Russia*

<sup>#</sup>*E-mail: tolifil@yandex.ru*

It was discussed the problem of harmfulness of winter weeds in spring wheat crops and the reasons of their spread in modern conditions of minimization of soil cultivation. This was the basis for conducting field tests of various selective herbicides (based on sulfonylurea and 2,4-D ester) and one nonselective (which based on glyphosate) against winter weeds in the pre-sowing period of spring wheat cultivation technology. As a result, herbicides with the highest biological effectiveness against winter weeds from the Brassicaceae were determined, which provided the maximum level of the preserved harvest of spring wheat. Based on the results, it is recommended to carry out early pre-sowing treatment with herbicides on steam fields clogged with winter weeds.

*Key words:* selective herbicides, glyphosate, winter weeds, *Capsella bursa-pastoris*, use of herbicides before sowing, biological efficiency, spring wheat, yield.

## РОЛЬ АУКСИНПРОДУЦИРУЮЩИХ БАКТЕРИЙ В ПРЕОДОЛЕНИИ СТРЕССА РАСТЕНИЯМИ ПШЕНИЦЫ В УСЛОВИЯХ ОБРАБОТКИ ГЕРБИЦИДОМ ЧИСТАЛАН<sup>1</sup>

© 2020 г. М. Д. Тимергалин<sup>1</sup>, А. В. Феоктистова<sup>1</sup>, Т. В. Рамеев<sup>1</sup>,  
Г. Р. Кудоярова<sup>1</sup>, С. П. Четвериков<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Уфимский институт биологии – обособленное структурное подразделение  
Уфимского федерального исследовательского центра РАН  
450054 Уфа, просп. Октября, 69, Россия

\*E-mail: chelab007@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.02.2020 г.

После доработки 27.03.2020 г.

Принята к публикации 10.07.2020 г.

Приведены результаты эксперимента по изучению влияния ауксинпродуцирующих штаммов бактерий *Pseudomonas* sp. ДА1.2 и *Pseudomonas koreensis* ИБ-4 на растения пшеницы при обработке гербицидом чисталан. Показано положительное влияние бактериальных обработок на суммарное содержание хлорофилла, относительное содержание воды в листьях и роль бактерий в перераспределении АБК и ИУК в побегах и корнях растений пшеницы в условиях гербицидного стресса.

**Ключевые слова:** *Pseudomonas* sp., PGP-штаммы, пшеница, гербицидный стресс, ауксин, гербицид чисталан.

**DOI:** 10.31857/S0002188120110113

### ВВЕДЕНИЕ

Важным элементом в современных системах интенсивного ведения сельского хозяйства является применение гербицидов для борьбы с сорной растительностью. Однако это одновременно приводит к загрязнению окружающей среды и вызывает стрессовое воздействие, в том числе и на культурные растения [1, 2]. При совокупности негативных факторов гербицидный стресс может существенно снижать урожайность сельскохозяйственных культур [1, 3]. Селективность действия гербицидов, т.е. их способность подавлять рост одних видов растений и не влиять на другие виды, обеспечивает возможность их применения в растениеводстве. Считается, что 2,4-дихлорфеноксисульфатная кислота (2,4-Д), один из наиболее известных гербицидов, который был первым открыт и нашел широкое применение, подавляет рост двудольных сорняков и не влияет на рост однодольных растений. Этот принцип лежит в основе применения 2,4-Д в посевах зерновых культур (прежде всего пшеницы). Тем не менее, обоб-

щение результатов многолетних испытаний гербицида 2,4-Д выявило немалое количество случаев отрицательного влияния данного гербицида на рост пшеницы [4]. Использование гербицидов может быть более эффективным при совместном применении с антистрессовыми регуляторами роста [3, 5]. Поиск эффективных регуляторов роста в качестве антистрессовых агентов является одной из актуальных задач.

Благоприятное воздействие на развитие растений оказывают бактерии, стимулирующие рост растений (Plant Growth Promoting Bacteria – PGPB). Их применение улучшает состояние растений на фоне действия гербицидного стресса [6]. Действие таких бактерий связывают в первую очередь с их способностью синтезировать фитогормоны (ауксины, цитокинины и др.) [7].

Цель работы – оценка влияния перспективно-го PGP-штамма бактерий *Pseudomonas* sp. с выявленной ранее устойчивостью к гербицидам и способностью продуцировать ауксины [8] на рост, гормональный ответ растений яровой пшеницы и возможность его использования в качестве потенциального биологического антистрессового агента при гербицидном стрессе.

<sup>1</sup> Исследование выполнено в рамках ГЗ Минобрнауки России № 075-00326-19-00 по теме № АААА-А19-119021390081-1 с использованием оборудования РЦКП УФИЦ РАН “Агидель”.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования были растения мягкой яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Кинельская Юбилейная. В работе использовали ауксинпродуцирующий штамм бактерий *Pseudomonas* sp. ДА1.2, устойчивый к рабочим концентрациям гербицидов (октапон, флоракс, чисталан и наномет), применяемых для обработки посевов пшеницы [8]. Действие нового штамма сравнивали с *Pseudomonas koreensis* ИБ-4 (основа коммерческого биопрепарата азолен), который является продуцентом ауксинов и цитокининов [9]. Оба штамма хранятся в коллекции микроорганизмов УИБ УФИЦ РАН.

В качестве гербицида использовали комплексный препарат избирательного действия (против двудольных) на основе ауксиноподобных действующих веществ 2,4-Д (2-этилгексилэтиловый эфир) и дикамбы (натриевая соль) – чисталан экстра (производитель ООО “АХК-АГРО”, Уфа).

Семена пшеницы, стерилизованные в течение 20 мин раствором перманганата калия, проращивали в течение 3-х сут. Проростки высаживали в сосуды объемом 0.5 л, заполненные почвой с 10%-ным содержанием песка. Растения выращивали на светоплощадке при плотности потока фотонов ФАР 190 мкмоль/м<sup>2</sup>/с при 14-часовом фотопериоде и температуре 22–26°C. Влажность почвы поддерживали на уровне 60–80% ПВ почвы.

Через 7 сут после посева семян в почву растения обрабатывали распылением 1 мл водного раствора препарата чисталан на сосуд (рабочая концентрация гербицида с учетом норм внесения согласно регламенту применения препарата составила 0.5 мл/л). В баковую смесь гербицида вносили суспензию бактерий, выращенных в жидкой питательной среде Кинг Б, доведенных до титра 10<sup>8</sup> КОЕ/мл.

На 2-е сут после обработки растений определяли уровень содержания абсцизовой кислоты (АБК) и индолилуксусной кислоты (ИУК) с помощью иммуноферментного анализа (ИФА). Для этого побеги и корни гомогенизировали и экстрагировали 80%-ным этиловым спиртом. Полученный экстракт упаривали до водного остатка, после центрифугирования последнего отбирали аликвоты супернатанта для анализа. Очистку и концентрирование АБК и ИУК проводили по модифицированной схеме с уменьшением объема [10]. Твердофазный ИФА проводили согласно методике, представленной в [11].

На 3-и сут после обработки растений определяли содержание хлорофилла в листьях. Для определения содержания хлорофилла в побегах

навески массой 100 мг измельчали и экстрагировали 96%-ным спиртом в течение 24 ч без доступа света. В экстрактах измеряли оптическую плотность при длинах волн 665 и 649 нм. Содержание хлорофиллов *a* и *b* рассчитывали по формулам:

$$C_a = 13.7 \times D_{665} - 5.76 \times D_{649},$$

$$C_b = 25.8 \times D_{649} - 7.6 \times D_{665},$$

где  $C_a$  и  $C_b$  – концентрация хлорофиллов *a* и *b* (мг/л),  $D_{665}$ ,  $D_{649}$  – величины экстинкции при соответствующей длине волны с последующим пересчетом на сырую массу образца. Измерения проводили в 3-х биологических и в 3-х аналитических повторностях.

Относительное содержание воды (**ОСВ**) определяли в дифференцированной части листа побега пшеницы (1-й лист), рассчитывая по формуле:

$$\text{ОСВ} = 100\% \times (\text{сырая масса} - \text{сухая масса}) : (\text{тургорная масса} - \text{сухая масса}).$$

Содержание воды (**СВ**) рассчитывали по формуле:

$$\text{СВ} = 100\% \times (\text{сырая масса} - \text{сухая масса}) : \text{сырая масса}.$$

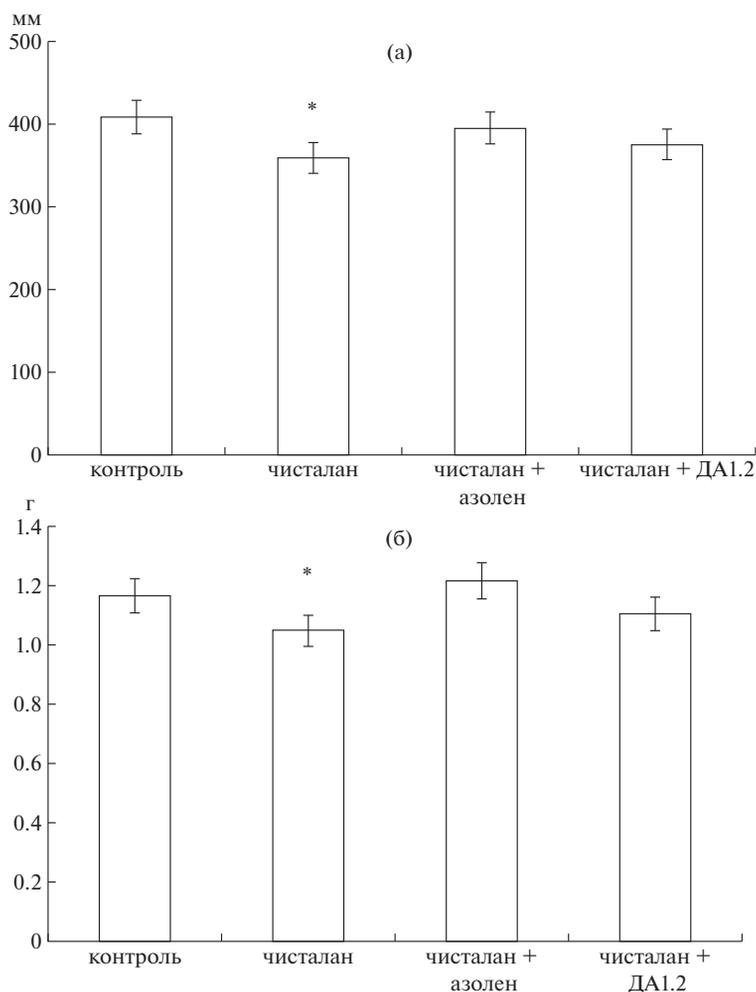
Сырую массу определяли сразу после отделения листа от растения. Дифференцированную часть листа для определения тургорной массы помещали в закрытые стеклянные сосуды с дистиллированной водой при 20°C на 24 ч в условиях тусклого света. Для определения сухой массы образцы из растущей зоны и дифференцированную часть листа высушивали при 85°C в течение 24 ч.

Массу и длину растений определяли через 14 сут после обработки.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Хотя считается, что однодольные растения нечувствительны к действию гербицидов, созданных на основе синтетического ауксина 2,4-Д, в случае их применения до наступления стадии кушения отмечено ингибирование роста растений пшеницы [4].

В наших экспериментах обработка чисталаном на стадии выхода 3-го листа приводила к подавлению роста растений пшеницы: длина побега (рис. 1а) и его масса (рис. 1б) были достоверно меньше, чем у контрольной группы растений, не подвергавшихся действию гербицида. Еще одним проявлением отрицательного действия чи-



**Рис. 1.** Длина (а) и масса побега (б) растений пшеницы сорта Кинельская Юбилейная через 14 сут после обработки гербицидом чисталан, гербицидом чисталан с препаратом азолен и с ауксинпродуцирующим штаммом ДА1.2. \*Статистически отличающиеся величины, *t*-тест,  $p \leq 0.05$ ,  $n = 9$ .

сталана на растения было снижение суммарного содержания хлорофиллов *a* и *b* (табл. 1).

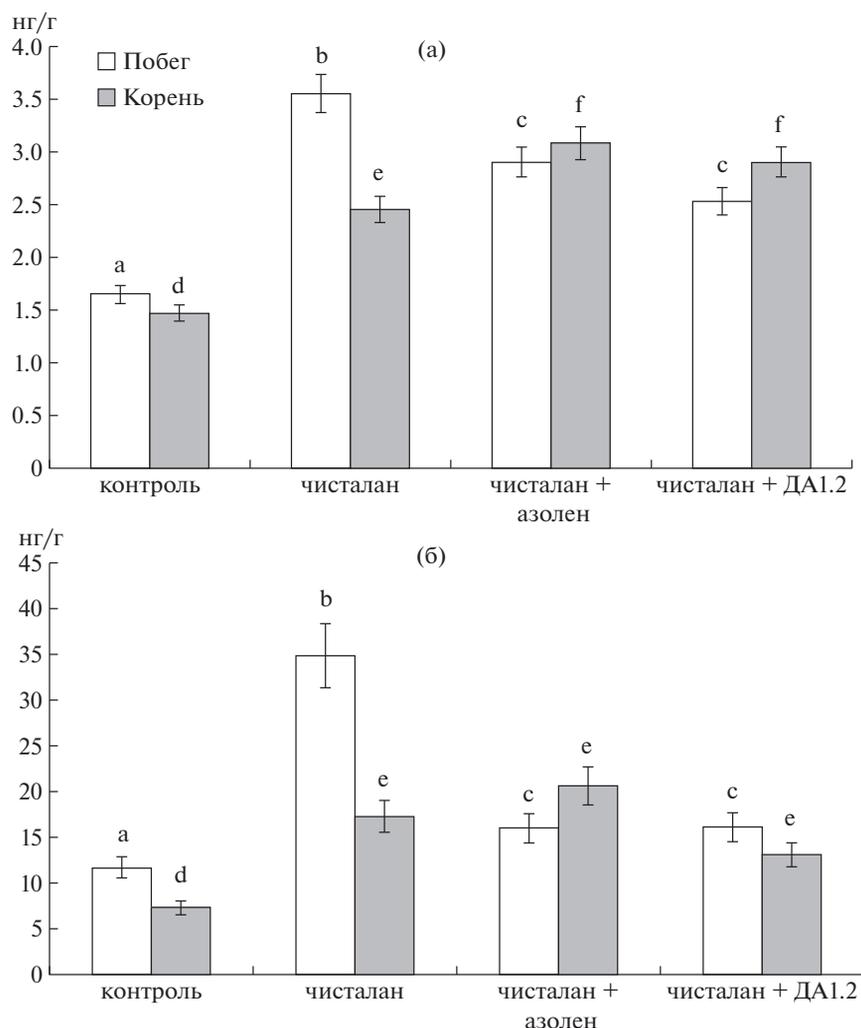
Считается, что действие гербицидов из класса синтетических ауксинов на чувствительные к ним растения обусловлено чрезмерным накоплением ауксинов в растениях и нарушением их распределения между органами, тем самым подавляя рост растения [12]. В наших экспериментах влияние гербицида проявлялось в 3-кратном увеличении содержания ауксинов (рис. 2а). Накопление ауксинов могло быть следствием поглощения растениями экзогенных ауксинов, которые хотя и проявляют слабую иммунореактивность по отношению к антителам ИУК [10], но все же способны реагировать с антителами при высокой концентрации 2,4-Д. Альтернативное объяснение может заключаться в том, что гербицид мог повлиять на концентрацию эндогенных аукси-

нов. Это объяснение соответствует данным литературы о способности 2,4-Д влиять на метаболизм ИУК [13].

**Таблица 1.** Суммарное содержание хлорофиллов *a* и *b*, относительное содержание воды (ОСВ) в листьях растений пшеницы сорта Кинельская Юбилейная после обработки гербицидом чисталан, гербицидом чисталан с препаратом азолен и с ауксинпродуцирующим штаммом ДА1.2

Вариант обработки	Суммарное содержание хлорофиллов <i>a</i> и <i>b</i> , мг/г сырой массы	ОСВ, %
Контроль без обработки	95.6 ± 1.8	84.0 ± 0.2
Чисталан	80.6 ± 2.4	81.8 ± 1.1
Чисталан + азолен	86.8 ± 0.1	91.8 ± 1.6
Чисталан + ДА1.2	87.1 ± 1.2	91.7 ± 2.0

Примечание. Указаны ошибки среднего,  $n = 9$ .



**Рис. 2.** Содержание ИУК (а) и АБК (б) в побегах и корнях (на г сырой массы) растений пшеницы сорта Кинельская Юбилейная на 2-е сут после обработки гербицидом чисталан, гербицидом чисталан с препаратом азолен и с ауксин-продуцирующим штаммом ДА1.2. Статистически отличающиеся величины отмечены разными буквами, ANOVA, LSD-test,  $p \leq 0.05$ ,  $n = 6$ .

Обработка растений чисталаном также сопровождалась повышением концентрации АБК относительно контроля более чем в 1.5 раза в побеге и в 2.0 раза – в корне (рис. 2б). Причиной накопления АБК могло быть повышение уровня содержания ауксинов в растениях, поскольку известно, что ауксины способствуют активации синтеза АБК [14]. Существует мнение, что действие 2,4-Д на растения связано именно с его способностью стимулировать накопление АБК [15]. Поскольку АБК способна ингибировать рост растений [16], повышение ее содержания в растениях, обработанных чисталаном, могло быть причиной ингибирования роста растений пшеницы.

Под влиянием гербицида сырая масса побега относительно контроля снижалась, хотя различия были недостоверными. При этом достоверно

возрастала относительно варианта с одним только гербицидом (без бактерий) масса побега при добавлении азолен (на 15%). Масса корня растений в вариантах с гербицидами была на 20% меньше, чем у контрольных растений, при этом внесение бактерий не приводило к достоверному увеличению массы корня.

Добавление к препарату гербицида бактериального препарата азолен стимулировало рост побега, в результате чего растения в этом варианте не отличались от контроля (рис. 1а). Положительное влияние бактерий выразилось в нивелировании негативного влияния гербицида на фотосинтетический аппарат. Это отражалось на количественном содержании пигментов в растениях (табл. 1). В обоих случаях инокуляция бактериями приводила к повышению суммарного со-

держания хлорофилла на фоне гербицидного стресса.

Трехкратное повышение концентрации ауксинов в побеге при обработке только гербицидом (без инокуляции бактерий) нивелировалось влиянием обоих штаммов бактерий таким образом, что уровень ауксинов в побегах превышал показатели необработанного контроля не более чем в 1.5 раза. Уменьшение накопления ауксинов могло быть следствием деструкции 2,4-Д бактериями. Способность бактерий разрушать пестициды известна из литературы [17]. Тем не менее, это предположение нуждается в проверке, принимая во внимание, что гербицид контактировал с бактериями непродолжительное время. Альтернативное объяснение может заключаться в нормализации метаболизма эндогенных ауксинов под влиянием бактериальных препаратов.

Так или иначе, стабилизация количества ауксинов в варианте с бактериями могла благоприятно сказаться на содержании АБК. Показано (рис. 2б), что совместная обработка растений гербицидами и бактериями приводила к уменьшению накопления АБК в побегах по сравнению с растениями, обработанными только гербицидом. Как снижение накопления ауксинов, так и АБК под влиянием бактериальных препаратов могло способствовать уменьшению отрицательного влияния гербицида на рост и содержание хлорофилла.

Важной особенностью действия бактерий оказалась их способность поддерживать высокое относительное содержание воды в растениях (табл. 1). В вариантах с бактериальными обработками обоими штаммами *ОСВ* составило 92%, что значительно превышало величину этого показателя у растений на фоне применения чисталана (82%) и в контроле (84%). Повышение содержания воды в побеге могло быть следствием усиления ее притока из корней. Известно, что гормон АБК увеличивает водный потенциал растений не только за счет изменения устьичной [18], но и гидравлической проводимости [19]. Регуляция гидравлической проводимости под влиянием АБК наиболее ярко проявляется в корнях растений, что соответствует полученным нами данным, свидетельствующим о том, что инокуляция бактерий на фоне применения гербицида способствовала перераспределению АБК в пользу корня.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, полученные данные свидетельствовали о том, что ауксинпродуцирующий штамм бактерий *Pseudomonas* sp. ДА1.2 наряду с *Pseudomonas koreensis* ИБ-4 оказывал положитель-

ное влияние на содержание хлорофилла и способствовал поддержанию оводненности тканей листа в условиях гербицидного стресса. При этом, несмотря на то что *Pseudomonas koreensis* ИБ-4 был более эффективен в плане влияния на показатели роста растений пшеницы, оба штамма при внесении в баковую смесь гербицида чисталан снижали его негативное действие, выраженное в нарушении перераспределения ауксинов и АБК. Таким образом, рассмотренные штаммы бактерий проявляли свойства антистрессантов и могут быть рекомендованы для оптимизации технологии применения гербицидов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Злотников А.К., Злотников К.М. Борьба с пестицидным стрессом – важный резерв повышения продуктивности пшеницы // Земледелие. 2009. № 4. С. 30–31.
2. Кутузова Р.С., Воробьев Н.И., Круглов Ю.В. Структура микробного комплекса ризосферы пшеницы в условиях гербицидного стресса // Почвоведение. 2006. № 2. С. 220–227.
3. 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.
4. Kumar S., Singh A.K. A review on herbicide 2,4-D damage reports in wheat (*Triticum aestivum* L.) // J. Chem. Pharm. Res. 2010. V. 2. № 6. P. 118–124.
5. Эффективность гербицидов и фунгицидов при совместном применении с антистрессовыми регуляторами роста на зерновых культурах (опыт и рекомендации) / Под ред. Усманова У.Г. Уфа: Гилем, 2003. 80 с.
6. Ahemad M., Khan M.S. Ameliorative effects of *Mesorhizobium* sp. MRC4 on chickpea yield and yield components under different doses of herbicide stress // Pest. Biochem. Physiol. 2010. V. 98. P. 183–190.
7. Кудоярова Г.Р., Курдин И.К., Мелентьев А.И. Образование фитогормонов почвенными и ризосферными бактериями как фактор стимуляции роста растений // Изв. Уфимского НЦ РАН. 2011. № 3–4. С. 5–16.
8. Четвериков С.П. Отбор антистрессовых бактериальных агентов для защиты сельскохозяйственных растений // Естеств. и техн. науки. 2019. Т. 137. № 11. С. 81–84.
9. Рафикова Г.Ф., Коршунова Т.Ю., Миннебаев Л.Ф., Четвериков С.П., Логинов О.Н. Новый штамм бактерий *Pseudomonas koreensis* ИБ-4 как перспективный агент биологического контроля фитопатогенов // Микробиология. 2016. Т. 85. № 3. С. 317–326.
10. Veselov S.U., Kudoyarova G.R., Egutkin N.L., Guili-Zade V.Z., Mustafina A.R., Kof E.M. Modified solvent partitioning scheme providing increased specificity and rapidity of immunoassay for indole 3-acetic acid // Physiol. Plantarum. 1992. V. 86. P. 93–96.

11. Kudoyarova G.R., Vysotskaya L.B., Arkhipova T.N., Kuzmina L.Yu., Galimsyanova N.F., Sidorova L.V., Gabbasova I.M., Melentiev A.I., Veselov S.Yu. Effect of auxin producing and phosphate solubilizing bacteria on mobility of soil phosphorus, growth rate, and P acquisition by wheat plants // *Acta Physiol. Plantarum*. 2017. V. 39. P. 253.
12. Grossmann K. Auxin herbicide action: lifting the veil step by step // *Plant Signal Behav.* 2007. V. 2. № 5. P. 421–423.
13. Sung Z.R. Relationship of indole-3-acetic acid and tryptophan concentrations in normal and 5-methyltryptophan-resistant cell lines of wild carrots // *Planta*. 1979. V. 145. № 4. P. 339–345.
14. Shuai H., Meng Y., Luo X. Exogenous auxin represses soybean seed germination through decreasing the gibberellin/abscisic acid (GA/ABA) ratio // *Sci. Rep.* 2017. V. 7. P. 12620.
15. Christoffoleti P.J., Figueiredo M.R.A., Peres L.E.P., Nissen S., Gaines T. Auxinic herbicides, mechanisms of action, and weed resistance: A look into recent plant science advances // *Sci. Agricola*. 2015. V. 72. № 4. P. 356–362.
16. Lorrai R., Boccaccini A., Ruta V., Possenti M., Costantino P., Vittorioso P. Abscisic acid inhibits hypocotyl elongation acting on gibberellins, DELLA proteins and auxin // *АОВ PLANTS*. 2018. <https://doi.org/10.1093/aobpla/ply061>
17. Han L., Zhao D., Li C. Isolation and 2,4-D-degrading characteristics of *Cupriavidus campinensis* BJ71 // *Brazil. J. Microbiol.* 2015. V. 46. № 2. P. 433–441.
18. Шарипова Г.В., Веселов Д.С., Кудоярова Г.Р., Тимергалин М.Д., Wilkinson S. Влияние ингибитора рецепции этилена на рост, водный обмен и содержание абсцизовой кислоты у растений пшеницы при дефиците воды // *Физиология растений*. 2012. Т. 59. № 4. С. 619–626.
19. Кудоярова Г.Р., Веселов Д.С., Шарипова Г.В., Ахиярова Г.Р., Dodd I.C., Веселов С.Ю. Водный обмен и рост исходных и дефицитных по АБК мутантных растений ячменя при повышении температуры воздуха // *Физиология растений*. 2014. Т. 61. № 2. С. 207–213.

## Role of Auxin-Producing Bacteria in Overcoming the Stress of Wheat Plants under Treatment with the Herbicide Chistalan

M. D. Timergalin<sup>a, #</sup>, A. V. Feoktistova<sup>a</sup>, T. V. Rameev<sup>a</sup>,  
G. R. Kudoyarova<sup>a</sup>, and S. P. Chetverikov<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Ufa Institute of biology – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of RAS  
prosp. Oktyabrya 69, Ufa 450054, Russia

<sup>#</sup>E-mail: chelab007@yandex.ru

The results of an experiment to study the effect of auxin-producing strains of *Pseudomonas* sp. DA1.2 bacteria and *Pseudomonas koreensis* IB-4 on wheat plants when treated with the herbicide Chistalan, are presented. The positive effect of bacterial treatments on the total chlorophyll content, the relative water content in the leaves, and the role of bacteria in the redistribution of ABA and IAA in the shoots and roots of wheat plants under herbicidal stress are shown.

**Key words:** PGPB, wheat plants, herbicidal stress, auxins, herbicide Chistalan.

УДК 631.461.5:631.41

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ АЗОТФИКСИРУЮЩЕЙ БАКТЕРИИ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ РАСТЕНИЙ В РАЗЛИЧНЫХ ПОЧВЕННЫХ УСЛОВИЯХ<sup>1</sup>

© 2020 г. В. П. Шабаев

Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН  
142290 Пушкино, Московская обл., ул. Институтская, 2, Россия

E-mail: VPSH@rambler.ru

Поступила в редакцию 06.03.2020 г.

После доработки 17.03.2020 г.

Принята к публикации 10.08.2020 г.

Эффективность применения стимулирующих рост растений ризосферных бактерий, в том числе азотфиксирующих, на различных почвах исследована недостаточно. В связи с этим изучено влияние стимулирующей рост столовой свеклы азотфиксирующей бактерии *Pseudomonas putida* 23 на урожай в микрополевых опытах на фоне внесения НРК-удобрений на почвах и искусственных почвенных смесях с различными химическими свойствами и азотфиксирующей активностью. Изучена выживаемость в ризосфере и приживаемость в ризоплане растений бактерии в зависимости от почвенных условий при применении устойчивого к антибиотикам мутантного штамма. Установлены корреляции азотфиксирующей активности и урожая с химическими показателями почв и почвенных смесей.

**Ключевые слова:** *Pseudomonas*, столовая свекла, НРК-удобрения, почвы, почвенные смеси.

**DOI:** 10.31857/S0002188120110083

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время проведены многочисленные исследования по применению стимулирующих рост растений ризосферных бактерий (plant growth-promoting rhizobacteria), в том числе фиксирующих атмосферный азот, с целью повышения урожая сельскохозяйственных культур [1]. Широкому применению и коммерциализации использования препаратов ризобактерий для стимуляции роста растений препятствует непостоянство получаемых результатов в полевых испытаниях [2]. В частности, установлено, что применение в полевых условиях бактериального удобрения азотобактерина, созданного на основе культуры азотфиксирующей бактерии *Azotobacter chroococcum*, не всегда отличалось стабильностью и давало неоднозначные результаты. При использовании этого препарата наряду со значительной стимуляцией роста растений и увеличением продуктивности сельскохозяйственных культур прибавки урожая были невысокими [3] и часто находились в пределах систематической ошибки полевых опытов. Во многом это было обусловлено тем,

что данный бактериальный препарат применяли без учета свойств почв. В этой связи эффективность ризосферных бактерий в различных почвенных условиях изучена недостаточно. Известно, что азотобактер весьма требователен к условиям среды, в том числе плохо переносит отклонения от нейтральной реакции, нуждается в достаточном количестве органического вещества и отличается низкой приживаемостью в ризосфере растений [3].

Рядом исследований установлена высокая эффективность применения стимулирующих рост растений флуоресцирующих бактерий рода *Pseudomonas* [1, 4]. Это обусловлено тем, что данные бактерии обладают высокой конкурентноспособностью с аборигенной почвенной микрофлорой, выживаемостью в ризосфере и приживаемостью в ризоплане [5–7], в том числе в сравнении с другими бактериями, например, *Bacillus subtilis* [6]. Среди представителей бактерий рода *Pseudomonas*, выделенных из ризосферы различных растений, выявлены бактерии, обладающие способностью фиксировать атмосферный азот [4, 8]. Азотфиксирующая активность этих бактерий, как правило, бывает низкой в чистых культурах и значительно повышается в ассоциациях с растениями [4].

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках госзадания “Физико-химические и биогеохимические процессы в антропогенно измененных почвах” АААА-А18-118013190180-9 от 31.01.2018 г.

Установлено, что ростстимулирующая активность и увеличение урожая растений (картофеля) при применении штаммов *P. fluorescens* и *P. putida* не всегда были непостоянными [9]. Также установлена неодинаковая отзывчивость (увеличение массы) сортов растений картофеля при применении ростстимулирующих бактерий *P. fluorescens* и *P. putida* на различных типах почв [10]. Колонизация ризосферы и ризоплана стимулирующими рост растений ризосферными бактериями являлась существенным фактором ростовой отзывчивости растений [9]. Влажность и тип почвы, вид и сорт растений, корневые экссудаты и выживание ростстимулирующих бактерий *P. fluorescens* и *P. putida* являлись определяющими и оказывающими существенное влияние на колонизацию интродуцированными бактериями ризосферы и ризоплана и на отзывчивость растений на бактериризацию [9]. Колонизация корневой системы растений ростстимулирующей бактерией *P. fluorescens* была экстенсивной и зависела от экологических факторов, главным образом, от водного режима почвы [11]. Приживаемость интродуцированных ассоциативных азотфиксирующих бактерий в почве и зоне корней растений определялась влажностью, окультуренностью почвы и корневыми экссудатами растений [12]. Неблагоприятные условия увлажнения и температура почвы могли быть причиной неудачной колонизации ризосферы и ризоплана бактериями и вариabельности увеличения урожая при внесении бактерий [9]. При установлении популяции флуоресцирующих псевдомонад на корнях растений доминирующая роль принадлежала свойствам почв, в сравнении с видом растений, что следует учитывать при изучении взаимодействия бактерий с растениями [13].

Действие стимулирующих рост растений ризосферных бактерий, в том числе флуоресцирующих бактерий рода *Pseudomonas* и фиксирующих атмосферный азот ризосферных бактерий, в зависимости от химических и биологических свойств почв изучено недостаточно. Для успешного применения микроорганизмов-стимуляторов роста растений, сопровождающегося увеличением урожая, необходимо исследовать эффективность их применения на почвах разного уровня плодородия. В настоящее время недостаточно информации о влиянии ростстимулирующих ризосферных бактерий, в том числе обладающих способностью фиксировать атмосферный азот, на урожай при выращивании сельскохозяйственных культур на почвах с различными свойствами.

Цель работы – изучение влияния внесения стимулирующей рост растений столовой свеклы азотфиксирующей ризосферной бактерии *P. putida* 23 на фоне внесения NPK-удобрений на урожай в различных почвенных условиях, отличающихся химическими свойствами и азотфиксирующей активностью.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили при выращивании растений столовой свеклы (*Beta vulgaris* L.) сорта Бордо на различных почвах и искусственно созданных почвенных смесях в микрополевых и вегетационном опытах. В опытах использовали слой 0–20 см агродерново-подзолистой почвы, агросерой почвы и аллювиальной агротемно-гумусовой почвы центральной части поймы р. Оки (юг Московской обл.), смесь агросерой почвы и речного песка, смесь аллювиальной агротемно-гумусовой почвы и перепревшего навоза. Почвы просеивали через сито с диаметром ячеек 2 см. На полиэтиленовой пленке тщательно перемешивали агросерую почву с песком (в соотношении 1 : 1 по объему) и аллювиальную агротемно-гумусовую почву – с навозом. В опытах была использована культура флуоресцирующей бактерии *P. putida* 23, обладающая азотфиксирующей активностью – 8 нМ  $C_2H_4$ /мг белка/мин при определении ацетиленовым методом [14]. Бактерия *P. putida* 23 в чистой и смешанных культурах стимулировала рост и увеличивала массу растений столовой свеклы [15], озимой пшеницы [16, 17], овса и ячменя [18] и сахарной свеклы [19]. Выбор столовой свеклы в качестве тестовой культуры был обусловлен тем, что применение этой бактерии наиболее значительно повышало урожай в отличие от других изученных сельскохозяйственных культур, и тем, что выращивание этой культуры требует постоянного достаточного увлажнения, в том числе необходимого для успешного роста бактерий.

В исходных образцах почв и почвенных смесей в начале опыта до посева семян определяли величину  $pH_{KCl}$ , содержание органического углерода (по Тюрину), валового азота (феноловым методом) после сжигания почвы и смесей в 33%-ной  $H_2SO_4$  с катализатором ( $K_2SO_4$ , Zn, Se,  $CuSO_4 \cdot 4H_2O = 50, 12, 1, 0.1$ ), обменных Ca и Mg (в вытяжке 1 н. KCl), подвижных форм фосфора и калия (в вытяжке 0.2 н. HCl), Fe, Mn, Zn, Cu и Mo (в вытяжке 1 н. HCl). Содержание зольных элементов (кроме калия) в растворах определяли методом эмиссионно-оптической спектроскопии индуктивно-связанной плазмы на спектрометре ICP OES Optima 5900 DV (Perkin Elmer, США). Калий определяли

методом пламенной фотометрии на пламенном фотометре BWB XP 2011 (BWB, Великобритания), рН суспензий почв и почвенных смесей – в вытяжке 1 н. KCl (1 : 2.5) на рН-метре “рН 211” (HANNA instruments, Германия). Перед посевом семян определяли активность азотфиксации почв и смесей ацетиленовым методом при внесении глюкозы из расчета 2% от массы почвы и ее инкубации при 60% ПВ и 28°C в течение 24 ч [14]. Статистическую обработку полученных данных проводили с использованием пакета MS Excel 2010.

Растения выращивали в опытах, проведенных в сетчатом вегетационном павильоне Института.

*Микрополевые опыты.* В сосудах без дна площадью 0.1 м<sup>2</sup> (0.33 × 0.33 × 0.33 м), изготовленных из винилпласта, вкопанных в верхний слой почвы и наполненных 36 кг почв и почвенных смесей, выращивали по 4 растения. При набивке сосудов почвами и смесями в верхний слой 0–15 см вносили азотное удобрение в виде азотнокислого аммония в дозе 1.2 г N/сосуд (12 г N/м<sup>2</sup>) на фоне внесения фосфорного и калийного удобрений соответственно в виде двухзамещенного фосфорнокислого калия и сернокислого калия в дозах по 1.2 г д.в./сосуд (12 г д.в./м<sup>2</sup>). Кроме того, в аллювиальную агротемно-гумусовую почву вносили перепревший навоз в дозе 200 г/сосуд (2 кг/м<sup>2</sup>). Пророщенные и предварительно стерилизованные 10%-ным раствором гипохлорита натрия семена были помещены на поверхность почвы в сосуде и инокулированы суспензией клеток бактерии в водопроводной воде из расчета 10<sup>8</sup> КОЕ/растение и засыпаны слоем 3 см соответствующих почв и почвенных смесей. Адекватные количества суспензии автоклавированных бактериальных клеток применяли аналогичным образом в варианте без инокуляции. Растения выращивали под открытым небом в условиях естественного увлажнения, поддерживая влажность почвы в сосудах дополнительными поливами на уровне не меньше 60% ПВ. Повторность опытов пятикратная. После уборки растений сырые корнеплоды и надземную массу (ботву) взвешивали, затем высушивали и определяли сухую растительную массу.

*Микрополевой опыт 1.* Для выращивания растений были использованы следующие почвы и почвенные смеси:

1. Агродерново-подзолистая среднесуглинистая почва Чеховского р-на Московской обл., на которой в предыдущий год возделывали зерновые культуры. Участок пашни расположен в 15 км севернее левого берега р. Оки, в 400 м левее автодороги Москва – Симферополь.

2. Агросерая среднесуглинистая почва, которая находилась в состоянии залежи на опытно-полевой станции Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, расположенной на правом берегу р. Оки (юг Московской обл.). Вследствие длительного распахивания, использования почвы и эрозионных процессов сильно изменены морфология и система верхних горизонтов почвенного профиля. В пахотный слой вовлечены гумусовый горизонт (A1), оподзоленный (A1A2) и частично 2-й гумусовый горизонт (Bh).

3. Агросерая среднесуглинистая почва с внесением песка.

4. Аллювиальная агротемно-гумусовая тяжелосуглинистая почва на современных аллювиальных отложениях центральной части поймы правого берега р. Оки (юг Московской обл.), на которой длительное время возделывали овощные культуры, в 2 км левее от автодороги Москва – Симферополь.

5. Аллювиальная агротемно-гумусовая тяжелосуглинистая почва с внесением навоза.

*Микрополевой опыт 2.* Для выращивания растений были использованы следующие почвы и почвенные смеси:

1. Агродерново-подзолистая супесчаная почва, на которой в предыдущий год возделывали зерновые культуры. Участок пашни расположен в Серпуховском р-не Московской обл. в 10 км севернее левого берега р. Оки.

2. Агросерая среднесуглинистая почва, взятая с другого участка опытно-полевой станции Института, в отличие от микрополевого опыта в первый год исследования.

3. Агросерая среднесуглинистая почва с внесением песка.

4. Аллювиальная агротемно-гумусовая тяжелосуглинистая почва, взятая с другого участка поймы р. Оки, в отличие от микрополевого опыта в первый год исследования.

5. Аллювиальная агротемно-гумусовая тяжелосуглинистая почва с внесением навоза.

*Вегетационный опыт.* В сосудах, содержащих 1 кг каждой почвы и почвенной смеси, использованных в микрополевым опыте 2, выращивали в течение 8 нед по 2 растения столовой свеклы также на фоне внесения NPK-удобрений из расчета по 80 мг д.в./сосуд. Кроме того, в агросерую и аллювиальную агротемно-гумусовую почву были внесены соответственно песок и навоз из расчета, как и в микрополевых опытах. Влажность почвы и смесей в сосудах поддерживали поливами на

уровне не меньше 60% ПВ. Для определения колонизации бактерией *P. putida* 23 корней растений (ризоплана), выживания бактерии в почвах и почвенных смесях ризосферы растений был получен спонтанный мутантный штамм, устойчивый к антибиотикам рифампицину и канамицину (минимальные ингибирующие концентрации >200 мкг/мл). Бактерия была мечена транспозоном Tn5, контролирующим в псевдомонадах устойчивость к антибиотикам, с помощью суицидального плазмидного метода [20] с использованием суицидального вектора psup202 (Л.А. Анисимова, ИБФМ РАН). Семена при посеве инокулировали водной суспензией клеток этого мутантного штамма бактерии из расчета  $10^8$  КОЕ/растение. В качестве контроля был вариант с внесением адекватного количества автоклавированных бактерий. Повторность опыта пятнадцатикратная. В процессе роста растений в динамике через 4, 6 и 8 нед, используя 5 повторностей опыта, определяли численность интродуцированной бактерии в ризоплане и ризосфере растений по методу Гузевой–Звягинцева [21] с использованием среды Кинга Б для флуоресцирующих псевдомонад с добавлением рифампицина и канамицина в количествах по 200 мкг/мл среды. Почвы и почвенные смеси ризосферы и очищенные от них корни растирали в ступке со 100 мл стерильной воды, готовили серийные разбавления и проводили посев на агаризованную среду Кинга Б с содержанием антибиотиков. Подсчитывали количество выросших колоний и результаты выражали в КОЕ/г сухих почв, почвенных смесей и корней.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 представлены исходные химические свойства почв и почвенных смесей, использованных в микрополевых и вегетационном опытах. Большинство почв и смесей микрополевого опыта 1 имели нейтральную реакцию среды, кроме не разбавленной песком агросерой почвы, имевшей слабокислую реакцию ( $pH_{KCl}$  5.6). Среди серии почв и смесей этого опыта агродерново-подзолистая почва и агросерая почва, в том числе с внесением песка, характеризовались низким уровнем плодородия: имели значительно меньшее содержание органического углерода, валового азота и питательных элементов в сравнении с использованными обеими разновидностями аллювиальной агротемно-гумусовой почвы. Агродерново-подзолистая почва и агросерая почва, модифицированная песком, имели самое низкое содержание углерода и азота — почти в 2 раза меньше, чем агросерая почва, и почти в 3 раза меньше, чем ал-

лювиальная агротемно-гумусовая почва без внесения навоза. Однако в агродерново-подзолистой почве микрополевого опыта 1 отмечено максимальное содержание Мо, экстрагируемого 1 н. HCl — 0.6 мг/кг почвы, которое было в 3 раза больше, чем в других почвенных разновидностях обоих опытов. В агродерново-подзолистой почве в сравнении с агросерой почвой без внесения песка содержалось в 2 раза больше обменного Mg и подвижных форм фосфора, калия и Mn при одинаковом содержании остальных питательных элементов, за исключением повышенного содержания подвижного Мо. Разбавление агросерой почвы песком уменьшило в ней содержание углерода и азота почти в 2 раза, обменного Ca — в 2 раза, подвижного фосфора и Fe — в 1.3 раза и, напротив, увеличило  $pH_{KCl}$  до нейтрального, содержание обменного Mg — в 2 раза, подвижного Mn — в 1.3 раза, не влияя на другие показатели. Внесение в аллювиальную агротемно-гумусовую почву навоза увеличило в этой почве содержание органического углерода, валового азота, подвижного фосфора и обменного Mg в 1.2–1.3 раза, подвижного калия — в 1.7 раза и, напротив, уменьшило содержание обменного Ca в 1.2 раза, не оказывая влияния на содержание Fe и всех изученных микроэлементов.

Использованные в микрополевым опыте 2 и вегетационном опыте агродерново-подзолистая почва и агросерая почва, в том числе разбавленная песком, характеризовались самым низким уровнем плодородия. Эти почвенные разновидности имели минимальные содержания органического углерода и валового азота, подвижных форм фосфора и калия, обменных оснований и большинства микроэлементов, а также слабокислую и кислую реакцию среды ( $pH_{KCl}$  — в пределах 4.2–5.1) в сравнении с обеими разновидностями аллювиальной агротемно-гумусовой почвы. Агродерново-подзолистая почва этой серии почвенных разновидностей незначительно отличалась от агросерой почвы по многим химическим показателям, за исключением меньшего почти в 1.5 раза содержания обменного Ca и подвижного калия, и большего — подвижного фосфора, Fe и Mn (в пределах 1.5–2.5 раза). Разбавление агросерой почвы песком уменьшило соответственно в 1.6 и 2.6 раза содержание в ней углерода и азота, до 2-х раз — обменных оснований и подвижного калия и, напротив, увеличило содержание подвижных Zn и Mn соответственно в 1.4 и 2.0 раза, а также изменило реакцию среды в сторону нейтральной, не оказывая влияния на другие показатели. Аллювиальная агротемно-гумусовая почва микрополевого опыта 2 и вегетационного опыта,

Таблица 1. Химические свойства почв и почвенных смесей

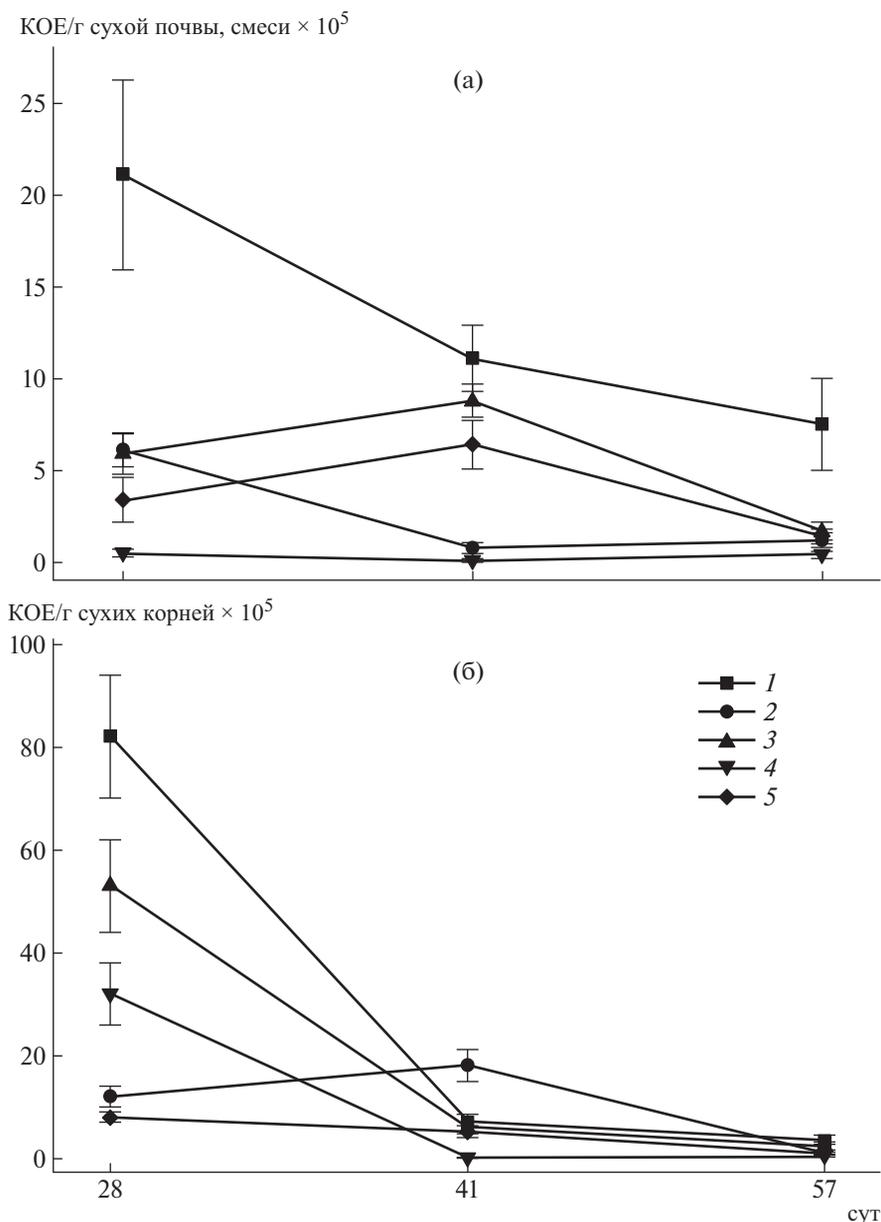
Опыт	Почва, почвенная смесь	pH <sub>KCl</sub>	C <sub>орг</sub>	N <sub>вал</sub>	Ca	Mg	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Fe	Zn	Mn	Cu	Mo
			%		1 н. KCl		0.2 н. HCl		1 н. HCl				
					мг-экв/кг почвы		мг/кг почвы						
Микрополевой 1	Агродерново-подзолистая почва	7.0	0.58	0.068	10	0.8	291	173	36	12	38	7	6
	Агросерая почва + песок	7.0	0.64	0.045	5	0.6	100	101	25	11	21	7	2
	Агросерая почва	5.6	1.09	0.119	10	0.4	131	102	33	11	16	7	2
	Аллювиальная агротемно-гумусовая почва	6.9	1.87	0.204	15	2.6	450	310	63	98	48	9	2
	Аллювиальная агротемно-гумусовая почва + навоз	7.0	2.45	0.236	13	3.4	550	540	63	98	48	9	2
Микрополевой 2, вегетационный	Агродерново-подзолистая почва	4.2	1.36	0.147	4	1.0	115	74	32	12	43	7	2
	Агросерая почва + песок	5.1	0.70	0.054	3	0.5	45	70	24	14	39	8	2
	Агросерая почва	4.5	1.11	0.139	7	1.0	44	118	21	10	20	9	2
	Аллювиальная агротемно-гумусовая почва	7.1	1.95	0.200	15	3.9	350	338	43	26	57	9	3
	Аллювиальная агро-темно-гумусовая почва + навоз	6.9	3.93	0.272	15	3.6	490	699	45	29	60	9	3

так же как и использованная в микрополевом опыте 1, имела максимальное содержание органического углерода, валового азота и всех питательных элементов, а также нейтральную реакцию среды в сравнении с другими почвенными разновидностями этого опыта. Внесение навоза в аллювиальную агротемно-гумусовую почву увеличило в ней содержание углерода, азота, подвижных форм калия и фосфора в пределах 1.4–2.1 раза, при этом концентрации остальных элементов, включая Fe и микроэлементы, а также реакция среды не изменялись.

Содержание микроэлементов Cu и Mo в подвижной форме во всех почвах и почвенных смесях в обоих микрополевых опытах, кроме повышенного (в 3 раза) содержания подвижного Mo в агродерново-подзолистой почве, отличалось не существенно. Во всех опытах в аллювиальной агротемно-гумусовой почве, в том числе удобренной навозом, в сравнении с другими почвенными разновидностями, содержание подвижных форм Fe, Mn и Zn было максимальным.

Применение меченной по устойчивости к антибиотикам рифампицину и канамицину бактерии *P. putida* 23 позволило изучить выживание в ризосфере и приживаемость бактерии в ризоплане растений столовой свеклы в динамике в процессе их роста в вегетационном опыте на почвах и

почвенных смесях, использованных в микрополевом опыте 2 (рис. 1). Эти показатели зависели от почвенных условий и продолжительности выращивания растений в течение опыта. В среднем за вегетационный период численность бактерии в ризосфере растений, выращиваемых на агродерново-подзолистой почве, была на самом высоком уровне, на минимальном – у выращиваемых на аллювиальной агротемно-гумусовой почве. Максимальное количество бактериальных клеток в ризосфере для большинства почвенных разновидностей было обнаружено в первый срок определения, после 28 сут роста растений. Численность бактерии в ризосфере растений в этот срок была максимальной на агродерново-подзолистой почве и составляла  $21.1 \times 10^5$  КОЕ, на агросерой почве без внесения и с внесением песка варьировала в пределах  $5.9–6.1 \times 10^5$  КОЕ, на аллювиальной агротемно-гумусовой почве с внесением навоза составляла  $3.4 \times 10^5$  КОЕ/г почвы. Этот показатель был минимальным для растений на аллювиальной агротемно-гумусовой почве без внесения навоза –  $0.5 \times 10^5$  КОЕ/г почвы. После 41 сут опыта, во второй срок определения установлено значительное снижение числа бактериальных клеток в ризосфере растений, произраставших на всех почвенных разновидностях, кро-



**Рис. 1.** Численность бактерии *P. putida* 23 в ризосфере (а) и ризоплане (б) столовой свеклы в вегетационном опыте. Почвы и почвенные смеси: 1 – агродерново-подзолистая почва, 2 – агросерая почва + песок, 3 – агросерая почва, 4 – аллювиальная агротемно-гумусовая почва, 5 – аллювиальная агротемно-гумусовая почва + навоз.

ме агросерой почвы и аллювиальной агротемно-гумусовой почвы, удобренной навозом. К концу опыта, после 57 сут выращивания растений по сравнению с предыдущим сроком определений численность бактерии в ризосфере растений на большинстве почвенных разновидностей продолжала уменьшаться. Для агросерой почвы, модифицированной песком, и аллювиальной агротемно-гумусовой почвы, которые характеризовались самой низкой выживаемостью бактерии в ризосфере, этот показатель не изменился к концу опыта.

Приживаемость бактерии *P. putida* 23 в ризоплане, так же как и ее выживание в ризосфере, зависели от почвенных условий и продолжительности роста растений. В среднем за вегетационный период бактерия в наибольшей степени колонизировала корневую систему растений на агродерново-подзолистой и агросерой почвах, в наименьшей – на аллювиальной агротемно-гумусовой почве, удобренной навозом. Максимальная численность бактерии в ризоплане, так же как и в ризосфере, отмечена в первый срок определений, через 28 сут роста растений на большинстве почв

и почвенных смесей. Наибольшее количество бактерии на корнях в этот срок было зафиксировано при выращивании растений на агродерново-подзолистой и агросерой почвах —  $82 \times 10^5$  и  $53 \times 10^5$  КОЕ/г сухих корней соответственно. Растения, произраставшие в это время на аллювиальной агротемно-гумусовой почве, характеризовались несколько меньшей приживаемостью бактерии на корнях, которая составляла  $32 \times 10^5$  КОЕ/г корней. В первый срок определения в ризоплане растений на аллювиальной агротемно-гумусовой и агросерой почвах с внесением соответственно навоза и песка этот показатель был минимальным —  $8 \times 10^5$  и  $12 \times 10^5$  КОЕ/г корней. Во 2-й срок определения, после 41 сут выращивания растений только на агросерой почве с внесением песка отмечено увеличение по сравнению с первым сроком численности бактерии в ризоплане, которая достигала  $18 \times 10^5$  КОЕ/г корней. К этому времени количество бактериальных клеток на корнях растений, произраставших в остальных почвенных условиях, заметно снижалось и оставляло  $5-7 \times 10^5$  КОЕ, за исключением аллювиальной агротемно-гумусовой почвы, для которой этот показатель уменьшился до минимума —  $1 \times 10^4$  КОЕ/г корней. К концу опыта, после 57 сут роста растений численность бактерии в ризоплане продолжала уменьшаться, кроме аллювиальной агротемно-гумусовой почвы, и была в пределах  $0,2-3,5 \times 10^5$  КОЕ для всех почвенных разновидностей. Высокая степень колонизации ризоплана и ризосферы, установленная с помощью генетически модифицированного и исходного штаммов бактерии *P. fluorescens*, и уменьшение численности в ризосферной почве и корнях интродуцированной бактерии по мере развития растений выявлена и другими исследователями [22]. При выращивании растений на агродерново-подзолистой и агросерой почвах приживаемость бактерии на корнях в конце опыта была максимальной. Увеличение численности бактерии во 2-й срок определения в ризоплане растений, произраставших на агросерой почве, модифицированной песком, сопровождалось одновременным уменьшением количества клеток в ризосфере. Кроме того, в этот срок определения для растений на агросерой почве и аллювиальной агротемно-гумусовой почве, удобренной навозом, установлено увеличение числа бактериальных клеток в ризосфере при одновременном снижении их приживаемости в ризоплане.

Исходные образцы почв и почвенных смесей резко отличались по активности азотфиксации (ацетиленредукции) (табл. 2). Среди почв и смесей, использованных в обоих микрополевых опы-

тах и в вегетационном опыте, агросерая почва, в том числе разбавленная песком, отличалась минимальной азотфиксирующей активностью, которая варьировала в пределах  $11-35 \text{ мг } \text{C}_2\text{H}_4 \times 10^{-2}/\text{кг}$  почвы/ч. Разбавление этой почвы песком уменьшало данный показатель в виде тенденции. Используемые в микрополевом опыте 1 агродерново-подзолистая почва и аллювиальная агротемно-гумусовая почва с внесением навоза характеризовались максимальными показателями активности азотфиксации, которые составляли соответственно  $292$  и  $374 \text{ мг } \text{C}_2\text{H}_4 \times 10^{-2}/\text{кг}$  почвы/ч и были более чем на порядок больше в сравнении с использованными в этом опыте агросерой почвой, в том числе разбавленной песком. Азотфиксирующая активность аллювиальной агротемно-гумусовой почвы микрополевого опыта 1 без внесения навоза была примерно одного порядка и только в 4–5 раз больше по сравнению с агросерой почвой, в том числе модифицированной песком. Внесение навоза усилило активность азотфиксации аллювиальной агротемно-гумусовой почвы этого опыта до 7 раз, таким образом, доводя этот показатель до уровня агродерново-подзолистой почвы. Активность азотфиксации аллювиальной агротемно-гумусовой почвы без внесения навоза, использованной в микрополевом опыте 2 и вегетационном опыте, отличалась в более, чем в 5 раз большими показателями в сравнении с почвой аналогичного типа микрополевого опыта 1. Внесение навоза в эту почву увеличило этот показатель в виде тенденции в опыте 2. Азотфиксирующая активность аллювиальной агротемно-гумусовой почвы, как без внесения, так и с внесением навоза, среди серии почв и почвенных смесей микрополевого опыта 2 была примерно на порядок больше в сравнении с агродерново-подзолистой почвой и агросерой почвой, в том числе модифицированной песком. При этом данный показатель был практически одинаков для агродерново-подзолистой почвы и агросерой почвы. Разбавление песком агросерой почвы уменьшило активность азотфиксации почти в 2 раза. Азотфиксирующая активность агродерново-подзолистой почвы, использованной в микрополевом опыте 2 и вегетационном опыте, была примерно в 7 раз меньше, чем у того же типа почвы микрополевого опыта 1.

В табл. 3 представлен урожай столовой свеклы после выращивания растений на различных почвах и почвенных смесях на фоне внесения НРК-удобрений в микрополевых опытах в течение 2-х разных вегетационных периодов. В результате проведения микрополевого опыта 1 максимальный урожай, в том числе корнеплодов, без внесе-

**Таблица 2.** Активность азотфиксации почв и почвенных смесей

Опыт	Почва, почвенная смесь	мг C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /кг почвы/ч × 10 <sup>-2*</sup>
Микрополевой 1	Агродерново-подзолистая почва	292 ± 33
	Агросерая почва + песок	11 ± 2
	Агросерая почва	14 ± 3
	Аллювиальная агротемно-гумусовая почва	51 ± 9
	Аллювиальная агротемно-гумусовая почва + навоз	374 ± 53
Микрополевой 2, вегетационный	Агродерново-подзолистая почва	43 ± 8
	Агросерая почва + песок	21 ± 4
	Агросерая почва	35 ± 4
	Аллювиальная агротемно-гумусовая почва	260 ± 52
	Аллювиальная агротемно-гумусовая почва + навоз	338 ± 61

\*Средние из 5-ти определений ± ошибка средней.

ния бактерии *P. putida* 23, был зафиксирован на агродерново-подзолистой почве и аллювиальной агротемно-гумусовой почве, удобренной навозом. При внесении бактерии в этих условиях не обнаружено достоверных прибавок массы растений. Минимальный урожай без бактерий в этом опыте получен на агросерой почве, модифицированной песком. На агросерой и аллювиальной агротемно-гумусовой почве суммарная масса неинкулированных растений, в том числе корнеплодов, были соответственно незначительно и достоверно больше в сравнении с агросерой почвой, разбавленной песком. Внесение бактерии при выращивании растений на агросерой и аллювиальной агротемно-гумусовой почве примерно в равной степени увеличило сухую массу корнеплодов и ботвы соответственно на 28–32 и 40–48%, суммарную биомассу – на 30–36% в сравнении с растениями, выращенными на этих почвах без применения бактерии. Прибавки урожая при инокуляции бактерией на разбавленной песком агросерой почве были меньшими и составили для корнеплодов и ботвы соответственно 18 и 41%, для суммарной биомассы – 26%. Увеличение урожая инокулированных растений при этом в основном были связаны с ботвой. Аналогичные зависимости получены и для сырой массы растений.

Применение бактерии при выращивании растений на аллювиальной агротемно-гумусовой почве без внесения навоза в микрополевым опыте 1 обеспечило получение максимального урожая,

в том числе и корнеплодов, как и на агродерново-подзолистой, и на аллювиальной агротемно-гумусовой почве, удобренной навозом. Напротив, несмотря на увеличение массы растений при применении бактерии на агросерой почве, в том числе модифицированной песком, урожай инокулированных растений, полученный на этих почвенных разновидностях, не достигал максимального уровня, который был зафиксирован на агродерново-подзолистой почве и аллювиальной агротемно-гумусовой почве, удобренной навозом.

В микрополевым опыте 2 без инокуляции бактерией максимальные урожаи столовой свеклы, включая корнеплоды, а также отсутствие прибавок массы растений при инокуляции бактерией *P. putida* 23 обнаружены на аллювиальной агротемно-гумусовой почве, как без внесения, так и с внесением навоза. Минимальные урожаи неинкулированных растений установлены на агродерново-подзолистой почве и агросерой почве, в том числе модифицированной песком. Применение бактерии в наибольшей степени увеличило урожай при выращивании растений на агродерново-подзолистой почве, на которой была получена минимальная масса неинкулированных растений. При внесении бактерии на этой почве, сухая масса корнеплодов возросла на 44, ботвы – на 17, целых растений – на 34%. Применение бактерии на агросерой почве, в том числе модифицированной песком, привело к меньшим прибавкам урожая в сравнении с агродерново-подзолистой почвой. При разбавлении агросерой почвы песком и на аллювиальной агротемно-гумусовой почве увеличение урожая инокулированных растений в основном было связано с надземной частью. Аналогичные зависимости получены и для сырой биомассы растений. Несмотря на максимальные прибавки массы растений от инокуляции бактерией в микрополевым опыте 2 на агродерново-подзолистой почве, а также агросерой почве, в том числе модифицированной песком, урожай, полученный в этих почвенных условиях при применении бактерии, значительно уступал максимальному урожаю на аллювиальной агротемно-гумусовой почве, в том числе удобренной навозом.

Корреляция величин азотфиксирующей активности с химическими показателями почв и почвенных смесей, использованных в микрополевых опытах 1 и 2 и в вегетационном опыте, представлена в табл. 4. Наибольшее положительное влияние на активность азотфиксации оказало содержание органического углерода ( $r = 0.81$ ) и подвижного калия ( $r = 0.76$ ). Активность азотфиксации также тесно коррелировала с содержанием в почвах и смесях валового азота, обменного

Таблица 3. Урожай столовой свеклы (микророльные опыты в различных почвенных условиях)

Опыт	Почва, почвенная смесь	Вариант	Масса растений, г/сосуд					
			сырое вещество			сухое вещество		
			корне- плоды	надземная часть	сумма	корне- плоды	надземная часть	сумма
1	Агродерново- подзолистая	Без инокуляции	1020	720	1740	170	59	229
		<i>P. putida</i> 23	1050	782	1830	162	74	236
	Агросерая + + песок	Без инокуляции	568	438	1010	91	46	137
		<i>P. putida</i> 23	662	576	1240	107	65	172
	Агросерая	Без инокуляции	606	370	976	109	43	152
		<i>P. putida</i> 23	900	754	1650	138	60	198
	Аллювиальная агротемно- гумусовая	Без инокуляции	654	400	1050	114	44	158
		<i>P. putida</i> 23	996	715	1680	150	65	215
	Аллювиальная агротемно-гуму- совая + навоз	Без инокуляции	951	522	1470	153	55	208
		<i>P. putida</i> 23	1010	716	1730	163	65	228
		<i>HCP</i> <sub>05</sub>	90	189	219	15	18	30
2	Агродерново- подзолистая	Без инокуляции	428	202	630	59	35	94
		<i>P. putida</i> 23	508	294	802	85	41	126
	Агросерая + + песок	Без инокуляции	488	178	666	83	29	112
		<i>P. putida</i> 23	650	384	1030	81	45	126
	Агросерая	Без инокуляции	536	228	764	87	37	124
		<i>P. putida</i> 23	646	442	1090	98	47	145
	Аллювиальная агротемно- гумусовая	Без инокуляции	926	332	1260	129	38	167
		<i>P. putida</i> 23	953	514	1470	118	58	176
	Аллювиальная агротемно-гуму- совая + навоз	Без инокуляции	958	346	1300	128	45	173
		<i>P. putida</i> 23	1030	595	1620	127	62	189
		<i>HCP</i> <sub>05</sub>	79	71	98	11	9	13

Mg, подвижных форм Mn и Fe ( $r = 0.60-0.67$ ), подвижного фосфора ( $r = 0.50$ ) и обменного Ca ( $r = 0.55$ ). Между азотфиксирующей активностью и содержанием подвижных Cu, Mo и величиной рН<sub>KCl</sub> почв и смесей обнаружена умеренная корреляция ( $r = 0.32-0.39$ ). Активность азотфиксации не коррелировала с содержанием Zn ( $r = -0.06$ ). Другими исследователями также показано, что азотфиксирующая активность (ацетиленредукция) почв в значительной степени определялась физико-химическими свойствами почв [23] и заметно усиливалась при внесении фосфорных удобрений [24].

Наибольшее положительное влияние на урожай неинокулированных растений оказали рН<sub>KCl</sub> ( $r = 0.77$ ), содержание подвижного фосфора и обменного Ca ( $r = 0.66-0.69$ ) почв и почвенных смесей (табл. 5). Величина урожая без внесения бак-

терии также достаточно тесно коррелировала с содержанием подвижного калия ( $r = 0.54$ ). Масса растений, выращенных без применения бактерии, в меньшей степени была связана с содержанием в почвах и смесях обменного Mg, а также подвижных Fe, Mn, Zn и Mo ( $r = 0.33-0.39$ ). Между урожаем неинокулированных растений и содержанием органического углерода, а также валового азота обнаружена меньшая корреляция ( $r = 0.27-0.28$ ), с содержанием Cu – незначительная отрицательная корреляция ( $r = -0.17$ ). Теснота и характер корреляции урожая, следовательно зависимость этого показателя от химических свойств почв и почвенных смесей, кардинально не изменились при внесении бактерии *P. putida* 23.

Было показано, что определяющим фактором, влияющим на урожай столовой свеклы в условиях внесения NPK-удобрений, являются почвенные

**Таблица 4.** Коэффициенты корреляции между азотфиксирующей активностью и химическими показателями почв и почвенных смесей (микророльные опыты)

pH <sub>KCl</sub>	C <sub>орг</sub>	N <sub>вал</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Ca
0.37	0.81	0.60	0.50	0.76	0.55
Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	Mo
0.67	0.64	0.63	-0.06	0.32	0.41

**Таблица 5.** Коэффициенты корреляции между урожаем столовой свеклы и химическими показателями почв и почвенных смесей (микророльные опыты)

Вариант	pH <sub>KCl</sub>	C <sub>орг</sub>	N <sub>вал</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Ca
Без инокуляции	0.77	0.27	0.28	0.68	0.54	0.66
<i>P. putida</i> 23	0.74	0.22	0.28	0.69	0.50	0.68
	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	Mo
Без инокуляции	0.35	0.33	0.31	0.39	-0.17	0.33
<i>P. putida</i> 23	0.31	0.32	0.39	0.45	-0.15	0.32

условия. Минимальные урожаи (корнеплодов и надземной массы) без применения бактерии *P. putida* 23 в этих условиях в обоих микророльных опытах были установлены при выращивании растений на почвах и искусственно созданных почвенных смесях, имевших минимальные показатели активности азотфиксации и большинства химических свойств плодородия. Максимальные урожаи неинокулированных растений были получены на почвах и почвенных смесях с высокой активностью азотфиксации независимо от уровня химических показателей их плодородия. Это подтверждено получением в микророльном опыте 1 максимальных урожаев неинокулированных растений на удобренной навозом аллювиальной агротемно-гумусовой почве с высокой активностью азотфиксации и высокими показателями практически всех изученных химических характеристик плодородия, а также на агродерново-подзолистой почве с высокой азотфиксирующей активностью, но со значительно меньшими химическими показателями, кроме повышенного содержания подвижного Мо. Максимальные урожаи при этом для неинокулированных растений также были получены при максимальных показателях азотфиксирующей активности и при высоких химических параметрах плодородия – на аллювиальной агротемно-гумусовой почве в микророльном опыте 1 и при внесении навоза в эту почву в обоих микророльных опытах. Вероятно, высокий уровень азотфиксирующей активности агродерново-подзолистой почвы в опыте 1 был обусловлен форми-

рованием эффективного нитрогеназного комплекса в этой почве вследствие в 3 раза большего содержания в ней подвижного Мо. Кроме того, внесение навоза в аллювиальную агротемно-гумусовую почву с относительно низкой активностью азотфиксации в микророльном опыте 1 усилило ее азотфиксирующую активность, увеличило большинство химических показателей и обеспечило получение максимального урожая.

Отзывчивость растений на внесение азотфиксирующей бактерии *P. putida* в 23 условиях внесения NPK-удобрений также зависела от почвенных условий. Применение бактерии повышало урожай при выращивании растений на агросерой почве, в том числе модифицированной песком, в обоих микророльных опытах и на агродерново-подзолистой почве в микророльном опыте 2, имевших низкие азотфиксирующую активность и показатели почвенного плодородия практически по всем изученным химическим свойствам.

Внесение бактерии также повышало урожай в микророльном опыте 1 на аллювиальной агротемно-гумусовой почве, имевшей меньшую активность азотфиксации и меньший уровень химических показателей плодородия по сравнению с этим типом почвы с внесением навоза. Прибавки урожая при применении бактерии в этих условиях были установлены только для растений, при выращивании на указанных выше почвах и почвенных смесях, которые характеризовались максимальной выживаемостью в ризосфере и приживаемостью в ризоплане. Внесение бактерии было неэффективным и не приводило к дальнейшему увеличению урожаев в почвенных условиях при высоком уровне азотфиксации независимо от химических показателей плодородия почв и почвенных смесей. В этих условиях бактерия отличалась низкой колонизацией ризосферы и ризоплана, что вероятно, было связано с ее слабой конкурентоспособностью с аборигенной микрофлорой. Внесение бактерии не приводило к дальнейшему увеличению урожаев в микророльном опыте 1 на агродерново-подзолистой почве, имевшей высокую азотфиксирующую активность и невысокие (минимальные) химические показатели. Аналогичная зависимость в этом опыте установлена и на аллювиальной агротемно-гумусовой почве с внесением навоза с высокой активностью азотфиксации и максимальными показателями практически всех изученных химических свойств почв. При внесении бактерии также не обнаружено увеличение урожая в микророльном опыте 2 на аллювиальной агротемно-гумусовой почве, в том числе с внесением навоза, имевшей высокую азотфиксирующую ак-

тивность и высокие показатели большинства химических свойств. Кроме того, внесение бактерии не обеспечило увеличение урожая до максимального уровня на почвах и почвенных смесях, характеризующихся низкой азотфиксирующей активностью и имевших самые низкие показатели большинства химических свойств, определяющих плодородие (агросерая почва, в том числе разбавленная песком в обоих микрополевых опытах, и агродерново-подзолистая почва микрополевого опыта 2). Таким образом, несмотря на значительное усиление активности азотфиксации при внесении бактерии *P. putida* 23, величины химических показателей плодородия вышеуказанных почв и почвенных смесей являлись лимитирующим фактором в повышении массы растений до максимального уровня. Применение бактерии в микрополевом опыте 1 на аллювиальной агротемно-гумусовой почве увеличило активность азотфиксации и урожай, в том числе корнеплодов, до максимального уровня, так же как и удобрение навозом плодородной по практически всем химическим показателям аллювиальной агротемно-гумусовой почвы с низкой азотфиксирующей активностью. Следовательно, в этом случае внесение бактерии по эффективности было равносильно удобрению этой почвы навозом.

## ВЫВОДЫ

1. Урожай столовой свеклы и эффективность применения стимулирующей рост растений азотфиксирующей бактерии *P. putida* 23 на фоне внесения НРК-удобрений зависели от почвенных условий.

2. Максимальные урожаи удобренных НРК-растений без применения бактерии были получены на почвах и искусственно созданных почвенных смесях с максимальной азотфиксирующей активностью, как при низких, так и высоких показателях химических свойств, определяющих их плодородие.

3. Внесение бактерии увеличило урожай при выращивании растений в этих условиях на почвах и почвенных смесях с минимальной азотфиксирующей активностью и химическими показателями их плодородия при высокой выживаемости в ризосфере и приживаемости бактерии в ризоплане. Внесение бактерии не оказывало влияния на урожай на почвах и почвенных смесях с высокой азотфиксирующей активностью независимо от уровня их плодородия при низкой выживаемости в ризосфере и приживаемости бактерии в ризоплане.

4. Прибавки урожая, полученные при применении бактерии на почвах и почвенных смесях с минимальными азотфиксирующей активностью и показателями практически всех изученных химических свойств, определяющих плодородие, не обеспечивали увеличение урожая до максимального уровня.

5. Азотфиксирующая активность почв и почвенных смесей коррелировала с их химическими свойствами, наиболее значимо – с содержанием органического углерода, валового азота и подвижных форм фосфора, калия, Fe, Mn и обменных Ca и Mg. Реакция среды и содержание подвижных форм микроэлементов Mo и Cu показали умеренное положительное влияние на азотфиксирующую активность, содержание подвижного Zn – отсутствие корреляции.

6. Урожай растений без внесения бактерии в наибольшей степени коррелировал с реакцией почвенной среды, содержанием подвижного фосфора, калия и обменного Ca почв и почвенных смесей при умеренной корреляции с остальными химическими показателями, кроме слабой отрицательной корреляции с содержанием Cu.

7. Внесение бактерии *P. putida* 23 не оказывало кардинального влияния на тесноту и характер корреляции активности азотфиксации, а также урожая с химическими свойствами почв и почвенных смесей.

8. Определение азотфиксирующей активности почв может быть рекомендовано для прогноза эффективности применения испытанной бактерии при выращивании растений на различных почвах.

Автор благодарит ЦКП ИФХиБПП РАН за выполнение химических анализов почв и почвенных смесей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gupta G., Parihar S.S., Ahirwar N.K., Snehi S.K., Singh V. Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): Current and future prospects for development of sustainable agriculture // J. Microb. Biochem. Technol. 2015. V. 7. Iss. 2. P. 1–7. <https://doi.org/10.4172/1948-5948.1000188>
2. Lambert B., Joos H. Fundamental aspects of rhizobacterial plant growth promotion // Trend. Biotechnol. 1989. V. 7. № 8. P. 215–219.
3. Мишустин Е.Н., Шильникова В.К. Биологическая фиксация атмосферного азота. М.: Наука, 1968. С. 249–330.
4. Умаров М.М., Бурлуцкая Г.Р., Давидович О.Г., Матвеева Н.Г. Влияние инокуляции бактериями рода *Pseudomonas* на процессы азотного цикла в ризосфере небобовых растений // Микробиология. 1994. Т. 63. Вып. 2. С. 326–333.

5. *Гарагуля А.Д., Бабич Л.В., Киприанова Е.А., Смирнов В.В.* Способность различных видов бактерий рода *Pseudomonas* к колонизации корней пшеницы // Микробиол. журн. 1988. Т. 50. № 6. С. 77–81.
6. *Dijkstra A.F., Scholten G.H.N., van Veen J.A.* Colonization of wheat seedling (*Triticum aestivum*) roots by *Pseudomonas fluorescens* and *Bacillus subtilis* // Biol. Fertil. Soils. 1987. V. 4. № 1–2. P. 41–46.
7. *Vančura V.* Inoculation of plant with *Pseudomonas putida* // Interrelationships between microorganisms and plants in soil / Eds. Vančura V., Kunc F. Praha: Publishing House of the Czechoslovak Academy of Sciences. 1989. P. 185–190.
8. *Barraquio W.L., Ladha J.K., Watanabe I.* Isolation and identification of N<sub>2</sub>-fixing *Pseudomonas* associated with wetland rice // Canad. J. Microbiol. 1983. V. 29. № 8. P. 863–873.
9. *Klopper J.W., Schroth M.N., Miller T.D.* Effects of rhizosphere colonization by plant growth-promoting rhizobacteria on potato plant development and yield // Phytopathology. 1980. V. 70. P. 1078–1082.
10. *Howie W.J., Echandi E.* Rhizobacteria: influence of cultivar and soil type on plant growth and yield of potato // Soil Biol. Biochem. 1983. V. 15. № 2. P. 127–132.
11. *Davies K.G., Whitbread R.* Factors affecting the colonization of a root system by fluorescent *Pseudomonads*: The effects of water, temperature and soil microflora // Plant and Soil. 1989. V. 116. № 2. P. 247–256.
12. *Тимофеева С.В., Лагутина Т.М., Кожемяков А.П.* Моделирование воздействия агроэкологических факторов на приживаемость интродуцируемых бактерий в почве и зоне корней растений // Докл. РАСХН. 1999. № 6. С. 19–21.
13. *Latour X., Corberand T., Laguerre G., Allard F., Lemanseau P.* The composition of fluorescent pseudomonad populations associated with roots is influenced by plant and soil type // Appl. Environ. Microbiol. 1996. V. 62. № 7. P. 2449–2456.
14. *Умаров М.М.* Ассоциативная азотфиксация. М.: Изд-во МГУ, 1986. 136 с.
15. *Минеев В.Г., Шабаев В.П., Сафрина О.С., Смолин В.Ю.* Влияние бактерий рода *Pseudomonas* на урожай столовой свеклы и вынос азота растениями // Докл. ВАСХНИЛ. 1991. № 9. С. 26–31.
16. *Шабаев В.П., Смолин В.Ю.* Отзывчивость озимой пшеницы на инокуляцию бактериями рода *Pseudomonas* на серой лесной почве // Почвоведение. 2000. № 4. С. 497–504.
17. *Шабаев В.П., Воронина Л.П.* Урожай и качество зерна озимой пшеницы при внесении смешанной культуры бактерий рода *Pseudomonas* на фоне возрастающих доз азотного удобрения // Докл. РАСХН. 2007. № 5. С. 26–27.
18. *Шабаев В.П.* Оптимизация доз минеральных удобрений инокуляцией семян ростстимулирующими ризосферными бактериями при возделывании зерновых культур // Докл. РАСХН. 2004. № 6. С. 24–26.
19. *Шабаев В.П.* Влияние инокуляции сахарной свеклы ростстимулирующими бактериями рода *Pseudomonas* на урожай и качество растений // Агрохимия. 2008. № 4. С. 35–42.
20. *Simon R., Prieffer H., Pühler A.* A broad host range mobilization system for *in vitro* genetic engineering, transposon mutagenesis in gram negative bacteria // Biotechnology. 1983. № 11. Iss. 9. P. 784–791.
21. Методы почвенной микробиологии и биохимии / Под ред. Звягинцева Д.Г. М.: Изд-во МГУ, 1991. 303 с.
22. *Azajo M.A.V., Mendonça-Hagler L.C., Hagler A.N., van Elsas J.D.* Survival of genetically modified *Pseudomonas fluorescens* introduced into subtropical soil microcosms // FEMS Microbiol. Ecol. 1994. V. 13. № 3. P. 205–216.
23. *Tena M., Magallanes M.* Relation entre l'activite fixatrice d'azote non symbiotique et quelques proprietes physicochimiques du sol // Agronomie. 1985. V. 5. № 4. P. 369–373.
24. *Rao V.R., Rao J.L.N., Adhya T.K.* Heterotrophic nitrogen fixation (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> reduction) as influenced by phosphorus application in paddy soils // Plant and Soil. 1986. V. 92. № 1. P. 125–132.

## Efficiency of Using N<sub>2</sub>-Fixing Bacterium under Growing Plants in Various Soil Conditions

V. P. Shabayev

*Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science, RAS  
ul. Institutskaya 2, Moscow region, Pushchino 142290, Russia  
E-mail: VPSH@rambler.ru*

The efficiency of using plant growth-promoting rhizobacteria, including N<sub>2</sub>-fixing bacteria, in various soil conditions has not been sufficiently studied. In this connection, the effect of the red-beet growth-promoting N<sub>2</sub>-fixing bacterium *Pseudomonas putida* 23 on the yield in micro-field experiments on soils and artificial soil mixtures with differing chemical properties and N<sub>2</sub>-fixing activity against the background of NPK-fertilization was studied. In pot experiment, the survival of bacterium in the rhizosphere and its establishment in plant rhizoplane were studied depending on soil conditions under using an antibiotics-resistant mutant strain. The correlations of N<sub>2</sub>-fixing activity and yield with chemical indices of soils and soil mixtures have been established.

*Key words:* *Pseudomonas*, red beet, NPK-fertilizers, soils, soil mixtures.

УДК 631.41:632.122:631.445

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВАРЬИРОВАНИЯ ВЕЛИЧИН ДИФФУЗИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЕРТИКАЛЬНОЙ МИГРАЦИИ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ И ФТОРА В РАЗНЫХ ПОЧВАХ ПРИ ЗАГРЯЗНЕНИИ

© 2020 г. А. С. Фрид<sup>1,\*</sup>, Т. И. Борисочкина<sup>1</sup><sup>1</sup> Почвенный институт им. В.В. Докучаева  
119017 Москва, Пыжевский пер. 7, стр. 2, Россия

\*E-mail: asfrid@mail.ru

Поступила в редакцию 23.03.2020 г.

После доработки 16.04.2020 г.

Принята к публикации 10.08.2020 г.

Предпринята попытка выявить возможные влияющие факторы на величину диффузионных параметров тяжелых металлов (ТМ) и фтора в почве. Для анализа были использованы имеющиеся оценки диффузионных параметров многолетней миграции ТМ и фтора в полевых условиях. В выборку вошли данные 7 регионов мира, 22 почв. Показано, что такие факторы как среднегодовая температура воздуха, наличие карбонатов, качество оросительных вод обеспечивают хорошие регрессионные зависимости для диффузионных параметров. Это имело место как для отдельных загрязняющих элементов, так и для их совокупности. Для всех элементов коэффициенты конвективной диффузии в среднем были меньше коэффициентов диффузии. Проведен анализ гипотетической связи диффузионных параметров с аналитическими данными экстрагирования различных “форм соединений” ТМ и фтора из почв. Приемлемые результаты получены при сопоставлении диффузионных параметров с концентрациями Cd, Zn, Pb в почвенном растворе и с содержанием водорастворимого фтора в почве. Связь диффузионных параметров и отношений трудноизвлекаемых фракций ТМ к легкоизвлекаемым была приемлемой для Cd и Pb. В остальных случаях (включая вытяжки ЭДТА, цитратные, ацетатный буфер) результаты получились либо неприемлемыми, либо неопределенными.

*Ключевые слова:* тяжелые металлы, фтор, диффузионные параметры миграции, многолетние загрязнения почв, факторы миграции, “формы соединений” тяжелых металлов и фтора в почвах, температура, карбонаты, орошение.

DOI: 10.31857/S0002188120110046

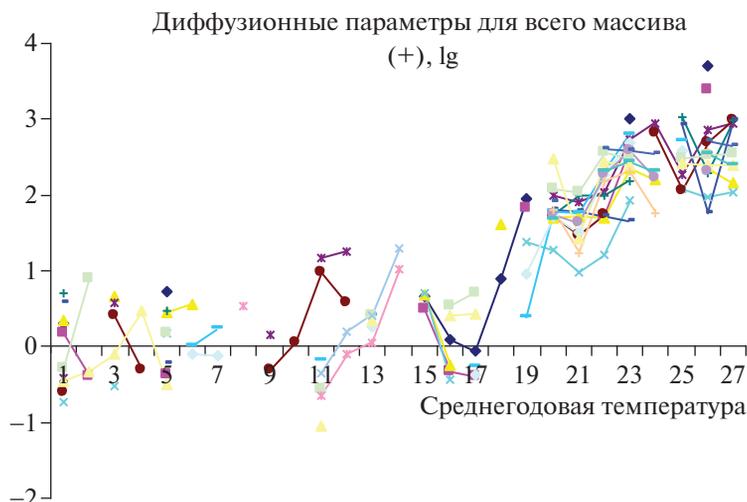
### ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальные исследования (наблюдения) вертикальной миграции ТМ в почвах в полевых условиях при загрязнении немногочисленны. Это объясняется в основном, по нашему мнению, недостаточным интересом к самой проблеме загрязнения глубже поверхностного или пахотного слоя почвы. Считается, видимо, что этот процесс очень медленный и не имеет практического значения. Значительно более важной считают вертикальную миграцию радионуклидов (это – те же тяжелые металлы), т.к. даже небольшое их вертикальное перемещение вглубь почвы значительно уменьшает радиационный фон на поверхности почвы и поступление в растения. Прогнозировать вертикальную миграцию тех и других веществ возможно лишь с помощью миграционных математических моделей. Для радионуклидов такие модели используют довольно широко, особенно

для территорий, затронутых техногенными авариями [1, 2]. Для обычных ТМ таких работ мало, в том числе из-за малого объема экспериментальных данных.

Авторы данной работы в последние годы занимаются анализом встречающихся в литературе экспериментальных данных, которые пригодны для описания (аппроксимации) миграционными моделями [3–11]. В результате накопился некоторый массив (около сотни данных) оценок параметров моделей миграции (диффузионной и конвективно-диффузионной), который мы попытаемся обобщить в данной работе.

Ранее наше обобщение состояло в группировке величин параметров в зависимости от региона, почвы, видов орошения и загрязняющих элементов [12]. Оценены были величины медиан и квартилей диффузионных параметров моделей миграции в этих группах. Проведен также дисперсионный ана-



**Рис. 1.** Зависимость диффузионных параметров миграции в почвах для всей совокупности загрязняющих элементов от среднегодовой температуры в регионе.

лиз зависимости диффузионных параметров от совокупности указанных факторов. Он показал, что влияние факторов убывает в ряду: регионы (почвы) > качество вод орошения (загрязненные или незагрязненные воды) > загрязняющий элемент. Влияния регионов и почв на диффузионные параметры в данной выборке тесно коррелировали между собой.

В настоящее время практически не изучено, какие факторы реально влияют на параметры моделей многолетней миграции ТМ в почвах при типичных видах их загрязнения (аэрогенные выпадения из различных источников, орошение сточными водами, внесение в почву или на почву осадков сточных вод или других отходов). О существующих по этому вопросу подходах будет сказано ниже.

Цель работы — анализ и выявление возможных факторов, влияющих на величину диффузионных параметров, а также обобщение (с использованием различных подходов) полученных авторами оценок диффузионных параметров моделей миграции ТМ и фтора в полевых условиях.

### ГЛОБАЛЬНОЕ ОБОБЩЕНИЕ

Накопленный нами массив оценок диффузионных параметров моделей многолетней вертикальной миграции ТМ и фтора в почвах охватывает следующие регионы: Мурманская обл. РФ, Ленинградская обл. РФ, Вологодская обл. РФ, Оренбургская обл. РФ, север Франции, южный Китай (КНР), север Египта (район Александрии). Краткие названия почв и оценки диффузионных параметров представлены в табл. 1. Поскольку

разброс величин диффузионных параметров составлял несколько порядков, в табл. 1 представлены их десятичные логарифмы, и дальнейшие процедуры в этом разделе проводили с ними.

В табл. 1 регионы расположены по возрастанию среднегодовых температур воздуха в регионах (данные взяты из разных сайтов Интернета); при этом весь охваченный диапазон температур был разбит на интервалы по 3.5°C. Общее представление об изменении диффузионных параметров для совокупности элементов в регионах дает рис. 1, где по оси абсцисс регионы также расположены по возрастанию среднегодовой температуры воздуха. На рис. 1 видна общая закономерность: величины параметров образуют довольно широкую полосу — сначала горизонтальную, а начиная с карбонатных почв южного Китая (КНР), показатели резко возрастают, достигая в карбонатных засоленных, орошаемых городскими сточными водами почвах северного Египта очень высоких величин.

В исследованных нами источниках экспериментальных данных не было каких-то общих для всех почв характеристик. Поэтому для дальнейшего анализа выборки диффузионных параметров были взяты те показатели, которые были известны хотя бы приблизительно: 1) среднегодовая температура воздуха в регионе, 2) наличие или отсутствие в почве карбонатов, 3) наличие или отсутствие орошения (принято 3 градации: нет орошения, орошение природными водами, орошение загрязненными сточными водами), 4) тип миграционной модели (диффузионная или конвективно-диффузионная).

Таблица 1. Оценки диффузионных параметров моделей многолетней миграции элементов в почвах (логарифмы значений ( $\text{см}^2/\text{с}$ ), умноженных на  $10^8$ )

Регион	Почва, орошение	T, °C	Кадмий		Цинк		Никель		Кобальт		Свинец		Медь		
			lg D	lg D <sub>k</sub>	lg D	lg D <sub>k</sub>	lg D	lg D <sub>k</sub>	lg D	lg D <sub>k</sub>	lg D	lg D <sub>k</sub>	lg D	lg D <sub>k</sub>	
Мурманская	торфяная	-1-2.5	0.301	0.176	0.342	-0.73	-0.42	-0.6	0.698	0.585	-	-	-0.292	-0.462	
	торфяная		-	-	0.653	-0.52	0.58	0.415	-	-	-	-	-	-0.097	
	подзол эродированный		-	-0.4	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00436	-0.338	
	подзол иллювиально-железистый		-	-	-	-	-	-0.3	-	-	-	-	-	-	0.477
	минерально-перегнойно-торфяная		0.72	-0.38	0.442	0.176	-	-	-	0.462	-0.22	-	-	-	-0.495
	торфяная		-	-	-	-	0.161	-0.3	-	-	-	-	-	-	-
Оренбургская	черноземно-луговая	2.5-6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	черноземно-луговая		-	-	-	-	-	0.041	-	-	-	-	-	-	
	чернозем		-	-	-	-	1.175	0.978	-	-	-0.19	-0.585	-0.553	-1.046	
	чернозем		-	-	-	-	1.243	0.574	-	-	-	-	-	-	
	чернозем щебнистый		-	-	-	-	-	-	-	-	0.407	0.255	0.415	0.337	
чернозем щебнистый	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Вологодская	дерново-карбонатная	2.5-6	-	-	0.55	-	-	-	-	-	-	0	-0.097	-	
	дерново-карбонатная		-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.243	-0.124	-	
	дерново-подзолистая		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Север Франции	легкая	0.653	0.491	0.677	0.714	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Юг Китая (КНР)	суглинистая под лесом	16.5-20	0.097	-0.34	-0.25	-0.44	-	-	-	-	-	-	-	0.544	0.4065
	легкая		-0.06	-0.4	-	-	-	-	-	-	-	-0.26	-0.367	0.712	0.439
	дерново-карбонатная		0.903	-	1.62	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	дерново-карбонатная, сточные воды		1.95	1.83	-	1.37	-	-	-	-	-	0.389	0.959	-	-
	аллювиальная, речные воды		-	-	1.7	1.28	2	1.72	1.813	1.74	1.775	1.724	2.079	2.48	
Север Египта	аллювиальная, речные воды	20-23.5	-	-	1.716	0.978	1.914	1.455	1.99	1.778	1.519	2.033	1.415		
	аллювиальная, речные воды		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
	пустынная, грунтовые воды		-	1.72	1.71	1.204	2.027	1.74	2	2	2.301	2.279	2.562	2.439	
	аллювиальная, сточные воды		3	2.628	2.36	1.93	2.74	-	2.176	2.803	2.698	2.47	2.394		
	аллювиальная, сточные воды		-	-	2.22	-	2.954	2.813	-	-	-	-	-	-	
	аллювиальная, сточные воды		-	-	-	2.08	2.267	2.06	3.02	3.02	2.708	2.591	2.47	2.415	
	пустынная, сточные воды		3.708	3.38	2.342	1.98	2.863	2.695	2.28	2.519	2.398	2.519	2.398		
пустынная, сточные воды	-	-	2.16	2.04	2.954	2.98	2.98	2.98	2.98	2.551	2.397				

Таблица 1. Окончание

Регион	Почва, орошение	$T, ^\circ\text{C}$	Железо		Марганец		Фтор	
			$\lg D$	$\lg D_k$	$\lg D$	$\lg D_k$	$\lg D$	$\lg D_k$
Оренбургская	черноземно-луговая	2.5–6.0	–	–	–	–	–	–
	черноземно-луговая		–	–	–	–	–	–
	чернозем		–	–	–	–	–0.347	–0.658
	чернозем		–	–	–	–	0.19	–0.108
	чернозем щебнистый		–	–	–	–	0.415	0.0414
чернозем щебнистый	–	–	–	–	–	1.301	1.021	
Вологодская	дерново-карбонатная	2.5–6.0	–	–	–	–	–	–
Ленинградская	дерново-подзолистая		–	–	–	–	–	0.544
Север Египта	аллювиальная, речные воды	20–23.5	1.732	1.613	1.914	1.712	–	–
	аллювиальная, речные воды		1.643	1.23	1.889	1.653	–	–
	пустынная, грунтовые воды		2.267	2.19	2.597	2.301	–	–
	аллювиальная, сточные воды		2.577	2.31	2.585	2.447	–	–
	аллювиальная, сточные воды		2.217	1.76	2.544	2.312	–	–
	пустынная, сточные воды		2.785	2.602	2.703	2.538	–	–
пустынная, сточные воды	2.544	2.512	2.643	2.398	–	–		

 $T, ^\circ\text{C}$  – среднегодовая температура воздуха.

Далее использовали подход, рассматривающий ситуацию как “черный ящик” с предполагаемыми вышеуказанными входными факторами и наблюдаемыми результатами.

Все указанные выше 4 показателя – факторы миграции – относятся к шкале рангов; тем не менее, их использовали для построения уравнений регрессии для получения полуколичественных зависимостей. Необходимо отметить также, что в данной выборке среднегодовые температуры, вид орошения и наличие карбонатов тесно коррелировали между собой, что сказалось на составе аргументов в регрессионных моделях.

Общая закономерность для всей выборки, соответствующая рис. 1, описывается уравнением

$$\lg(DP \times 10^8) = 0.49 - 0.264 \cdot \text{мод} + 0.0571 \cdot T^0 \cdot \text{карб} + 0.605 \cdot \text{карб} \cdot \text{орош},$$

где  $DP$  – величина диффузионного параметра (коэффициент диффузии  $D$  или конвективной диффузии  $Dk$ ),  $\text{см}^2/\text{с}$ , мод – тип миграционной модели (1 – диффузионная, 2 – конвективно-диффузионная),  $T^0$  – нижняя граница интервала среднегодовых температур воздуха, к которому относится регион, карб = 0 (если нет карбонатов) или 1 (если карбонаты в верхнем слое почвы присутствуют), орош = 0 (если нет орошения) или 1 (если воды орошения природные незагрязненные), или 2 (если воды орошения сточные загрязненные). Статистические характеристики уравнения: коэффициент детерминации  $R^2 = 0.84$ , уровень значимости уравнения и коэффициентов регрессии = 0.001, средняя ошибка уравнения = 0.46.

Уравнение подтверждает закономерности, видимые на рис. 1: рост температуры региона, наличие карбонатов, усиление оросительной нагрузки увеличивают диффузионные параметры, а переход от диффузионной к конвективно-диффузионной модели в среднем уменьшает диффузионный параметр (это соответствует теоретическим ожиданиям). Рассчитанные по этому уравнению диффузионные параметры хорошо укладываются в видимую на рис. 1 полосу величин.

Теперь обратимся к отдельным элементам, используя для анализа те же факторы миграции. Попытки использования в этих случаях других факторов в рамках отдельных (локальных) экспериментальных исследований приведены в работах [5–7, 9, 13–15]. Здесь же, при глобальном обобщении, имеет смысл анализировать параметры тех элементов, для которых имеется информация для 3-х и более регионов. Это – Cd (4 региона), Zn (5 регионов), Ni (3 региона),

Pb (4 региона), Cu (4 региона). В случае двух регионов (Co, F) адекватность получаемых зависимостей значительно снижается, а в случае одного региона (Fe, Mn) зависимости становятся локальными.

**Кадмий.** В выборке 19 оцененных диффузионных параметров ( $D$  и  $Dk$ ). Регрессионное уравнение с лучшими характеристиками имеет вид

$$\lg(DP \times 10^8) = 0.78 + 1.29 \cdot \text{орош} - 0.38 \cdot \text{мод},$$

где  $R^2 = 0.86$ , уровень значимости уравнения – 0.0005, коэффициентов регрессии – от 0.20 до 0.001, средняя ошибка уравнения = 0.54. На рис. 2, 3 показаны оцененные величины диффузионных параметров и величины, рассчитанные по регрессионным моделям для Cd и других элементов. Из уравнения для Cd видно, что основным фактором увеличения параметров оказался вид орошения.

**Цинк.** В выборке 25 параметров  $D$  и  $Dk$ . Регрессионное уравнение имеет вид

$$\lg(DP \times 10^8) = 0.89 + 1.13 \cdot \text{карб} + 0.207 \cdot (\text{орош})^2 - 0.51 \cdot \text{мод},$$

где  $R^2 = 0.89$ , уровень значимости уравнения – 0.0005, коэффициентов регрессии – 0.001, средняя ошибка уравнения = 0.33. Главные факторы увеличения параметров – карбонаты и орошение.

**Никель.** В выборке 27 параметров  $D$  и  $Dk$ . Регрессионное уравнение имеет вид

$$\lg(DP \cdot 10^8) = 0.36 + 1 \cdot \text{карб} + 0.852 \cdot \text{орош} - 0.26 \cdot \text{мод},$$

где  $R^2 = 0.94$ , уровень значимости уравнения – 0.0005, коэффициентов регрессии – 0.05–0.001 (свободного члена – 0.20), средняя ошибка уравнения = 0.31. И в этом случае основные факторы, увеличивающие значения параметров – карбонаты и орошение.

**Свинец.** В выборке 22 величины параметров  $D$  и  $Dk$ . Регрессионное уравнение имеет вид

$$\lg(DP \times 10^8) = -0.10 - 1.37 \cdot \text{карб} - 12.7 \cdot \text{орош} + 4.51 \cdot (\text{орош})^2 + 0.579 \cdot T^0 \cdot \text{карб},$$

где  $R^2 = 0.95$ , уровень значимости уравнения – 0.0005, коэффициентов регрессии – 0.001 (свободный член незначим), средняя ошибка уравнения = 0.30. В этом случае, в отличие от других элементов, роль миграционной модели не проявилась, но проявилось влияние всех других факторов вместе в довольно сложном сочетании.

**Медь.** В выборке 30 величин параметров  $D$  и  $Dk$ . Искомая зависимость примерно равноцен-

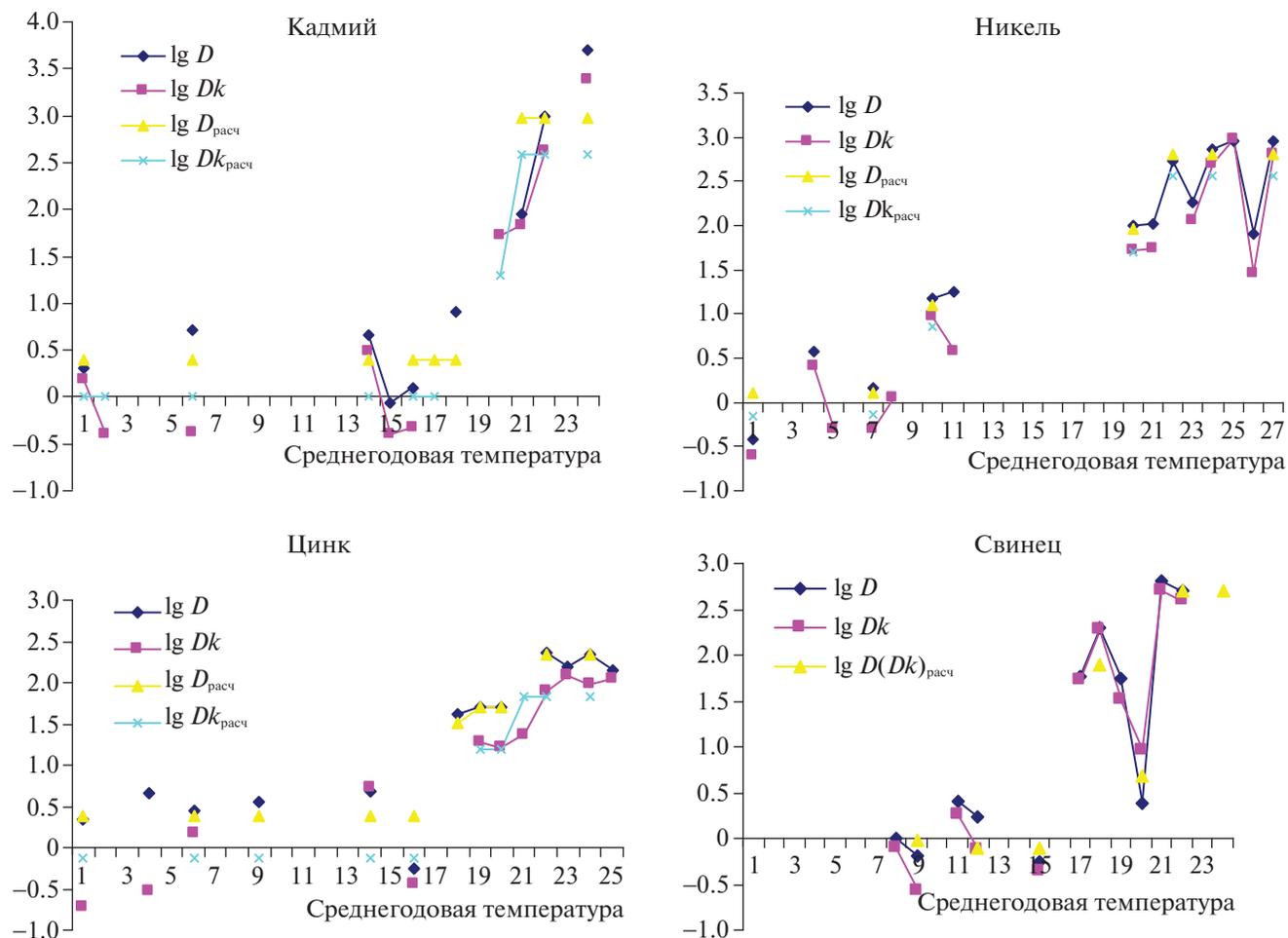


Рис. 2. Зависимость диффузионных параметров миграции в почвах Cd, Zn, Ni, Pb от среднегодовой температуры (°C) в регионе.

но описывается 2-мя регрессионными уравнениями:

$$\lg(DP \times 10^8) = -0.08 - 0.204 \cdot T^0 + 0.0155 \cdot (T^0)^2 + 0.53 \cdot \text{карб} - 0.17 \cdot \text{мод}, \quad (\text{a})$$

где  $R^2 = 0.92$ , уровень значимости уравнения – 0.0005, коэффициентов регрессии – 0.01–0.001 (незначимы свободный член и коэффициент для типа модели), средняя ошибка уравнения = 0.37 (рис. 3а);

$$\lg(DP \times 10^8) = 0.40 + 3.44 \cdot \text{орош} - 1.06 \cdot (\text{орош})^2 - 0.32 \cdot \text{карб} - 0.20 \cdot \text{мод}, \quad (\text{б})$$

где  $R^2 = 0.91$ , уровень значимости уравнения – 0.0005, коэффициентов регрессии – 0.20–0.001 (коэффициент для типа модели незначим), средняя ошибка уравнения = 0.41 (рис. 3б). В обоих уравнениях играют роль карбонаты, но сочетают-

ся они либо со среднегодовой температурой, либо с орошением.

Напомним, что для имеющейся полной выборки показана тесная корреляция влияния на диффузионные параметры всех 3-х показателей-факторов (среднегодовой температуры, карбонатов и орошения). Но для отдельных элементов загрязнения почвы большее влияние могут оказывать лишь некоторые из этих факторов.

В целом для этого обобщения можно отметить следующее: 1 – на рис. 2 и 3 видно, что нет резких различий между расчетными по уравнениям регрессии и оцененными величинами параметров; 2 – все уравнения регрессии высоко значимы, средняя ошибка уравнений (ошибка предсказания) убывает в ряду: Cd (0.54) > все элементы вместе (0.46) > Cu (0.37–0.41) > Zn (0.33) > Ni (0.31) > Pb (0.30); 3 – величины диффузионных параметров для конвективно-диффузионной модели миграции в среднем всегда были меньше, чем для

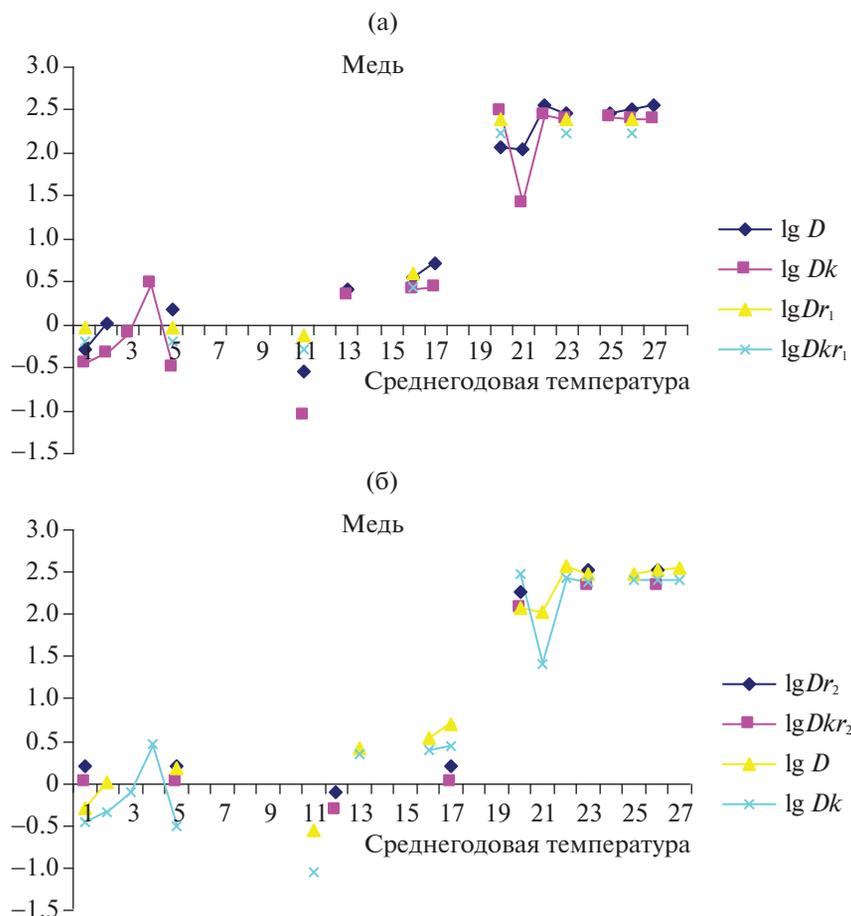


Рис. 3. Зависимость диффузионных параметров миграции в почвах Си от среднегодовой температуры (°C) в регионе: (а) и (б) – варианты регрессионной модели. Индекс – расчетные данные по модели регрессии.

диффузионной модели, что теоретически ожидаемо, т.к. часть миграционного перемещения в конвективно-диффузионной модели учитывается через параметр скорости направленного переноса, а конвективное размытие соединений ТМ в полевых условиях незначительно (в отличие от опытов с промыванием почвенных колонок). Влияние типа миграционной модели на величины параметров убывало в ряду: Zn (коэффициент регрессии 0.51) > Cd (0.38) > Ni (0.26)  $\approx$  все элементы вместе (0.26) > Cu (0.17–0.20) > Pb ( $\approx$ 0). Причины этого эффекта пока не понятны.

#### СВЯЗЬ ВАРЬИРОВАНИЯ ДИФФУЗИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ С ТЕОРЕТИЧЕСКИМИ И ЭМПИРИЧЕСКИМИ ПРЕДСТАВЛЕНИЯМИ

Известны 3 подхода, основанные на лабораторных опытах и не доказанные для полевых условий.

Первый подход связан с теоретическими моделями параметров моделей миграции для пористых сорбирующих сред [16–19]. Например, для условной двухфазной среды (жидкость и твердая сорбирующая фаза) и линейной изотермы сорбции коэффициент диффузии вещества записывают в виде

$$D = \frac{D_1(l_0/l_1)^2\theta_1 + D_2(l_0/l_2)^2\theta_2K}{\theta_1 + \theta_2K}, \quad (1)$$

где  $D$  – (эффективный) коэффициент диффузии для среды в целом,  $D_1$  и  $D_2$  – коэффициенты диффузии вещества в жидкой и твердой (или на поверхности твердой) фазах,  $\theta_1$  и  $\theta_2$  – объемные доли жидкой и твердой фаз в среде,  $(l_0/l_1)^2$  и  $(l_0/l_2)^2$  – коэффициенты извилистости в тех же фазах,  $K$  – коэффициент распределения вещества между твердой и жидкой фазами, характеризующий сорбцию. При значительной сорбции ( $K \gg 1$ ) формула (1) преобразуется в

$$D = D_1(l_0/l_1)^2(\theta_1/\theta_2)/K + D_2(l_0/l_2)^2, \quad (1a)$$

из которой следует, что, чем больше сорбция, тем меньше должна быть величина  $D$ .

В лабораторных опытах с радионуклидами (или радиоактивными метками) такую зависимость наблюдали [20–22], для полевых условий ее почти не проверяли.

Второй подход связан с популярным ныне фракционированием “форм соединений” ТМ в почвах на более и менее подвижные фракции [23–25]. Авторы, использующие этот подход, постоянно утверждают, что, чем больше доля легкоизвлекаемых фракций, тем выше миграционная подвижность соответствующего элемента. Доказательства этого утверждения нам не известны даже для лабораторных опытов.

Третий подход-гипотеза предполагает, что ТМ загрязнений перемещаются вглубь почвы в виде частиц малых размеров или закрепленными на почвенных частицах малых размеров.

Учитывая, что мы имеем дело с многолетней миграцией (десятки лет), считаем уместным привести довольно большую цитату из ([26], с. 95): “В большинстве таких экспериментов (речь здесь идет об изучении процессов миграции) условия сложной многофазной и многофакторной почвенной системы не воспроизводились. Поэтому в целом возможность прямой экстраполяции таких упрощенных экспериментов на реальные почвенные системы, особенно с участием в них многообразной биоты, весьма ограничена, или во всяком случае к ней надо подходить с большой осторожностью. Здесь остается неясным следующее: а) реализуются ли отдельные элементарные механизмы, изученные в упрощенных системах, в реальных сложных почвенных системах при одновременном протекании множества других элементарных механизмов; б) каково взаимодействие и взаимовлияние (ускорение, ингибирование и т.д.) разных, в том числе абиотических и биотических элементарных механизмов, в такой реальной системе; в) какова реальная, а не изолированная, кинетика отдельных элементарных механизмов в сочетании с другими, и какова реальная последовательность включения разных элементарных механизмов во времени; г) изменяются ли элементарные механизмы на разных стадиях развития почвы в зависимости от наличия уже накопленных твердофазных педогенных признаков?”

Попробуем оценить вероятность адекватности обозначенных выше 3-х подходов по имеющейся у нас информации. Из проанализированных нами публикаций, где удалось оценить параметры моделей миграции, только в одной для южного

Китая [27] были непосредственно измерены концентрации мигрирующих вглубь почвы ТМ в почвенных растворах разных глубин и рассчитаны из них коэффициенты распределения  $Kd$ , как отношения валовых содержаний в почве к концентрации в почвенных растворах (величины  $Kd$  легко пересчитываются в величину  $K$  из формулы (1) –  $K = Kd \cdot d_0$ , где  $d_0$  – плотность твердой фазы почвы). Величины  $Kd$  авторы [27] представили на рисунке в логарифмическом масштабе.

Сопоставление величин  $Kd$  и диффузионных параметров нами проведено в [10]. Используем здесь эти результаты. Во-первых, надо отметить, что для всех элементов (в том числе, Zn, Cd, Pb) показатели  $Kd$  заметно возрастали от глубины 5 см к глубине 10 см, а глубже возрастание замедлялось. Этот тренд противоречит нашему предположению (при использовании моделей миграции) о постоянстве среднегодовых величин параметров миграции по глубине почвы, однако не отменяет адекватность моделей миграции и их параметров, которые оценивали по другим критериям. Это противоречие может быть объяснено, как низкой точностью расчета  $Kd$ , так и неизвестной предысторией его изменений за 22 года от начала загрязнения.

Во-вторых, сопоставляя ряды изменения  $Kd$  (Pb  $\gg$  Zn  $\gg$  Cd) и диффузионных параметров (Cd  $>$  Zn  $\gg$  Pb), видим, что они обратны друг другу. А это, по крайней мере, качественно, согласуется с формулой (1а).

Для проверки второго похода с использованием фракционирования “форм соединений” ТМ и фтора информации больше. Начнем с данных для орошаемых почв Египта [4, 5, 13–15]. В этом случае для 8 элементов, загрязняющих почву, было проведено фракционирование для слоев почв разной глубины. В качестве экстрагентов последовательно использовали: 1М  $\text{CH}_3\text{COONH}_4$  pH 7.0 (обменная форма); 1М  $\text{CH}_3\text{COONH}_4$  pH 5.0 (сорбированная на карбонатах); 30%  $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{HNO}_3$  pH 2.0–3.0, затем 3.2 М  $\text{CH}_3\text{COONH}_4$  в 20%-ной  $\text{HNO}_3$  (связанные с органическим веществом); 0.04 М  $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$  в 25%-ным  $\text{CH}_3\text{COOH}$  pH 3.0 (связанные с оксидами и гидроксидами Fe и Mn – осадочная фракция); 7 М  $\text{HNO}_3$  (связанные с алюмосиликатами – остаточная фракция). Для сопоставления с диффузионными параметрами рассчитаны содержания фракций, средневзвешенные по мощности слоев. Прямое сопоставление этих величин не показало существенных статистических связей. Поэтому для египетских и других подобных данных мы решили попробовать объединить первый и второй подходы. Для этого

**Таблица 2.** Коэффициенты распределения элементов  $K$  (как результат фракционирования почв) в орошаемых почвах Египта

Почва	Воды орошения	Zn		Cd		Ni		Pb		Co		Cu		Fe		Mn	
		min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
аллювиальная	речные	14	120	1.2	6.9	2.1	14	1.4	6.7	2.3	15	10	46	290	800	2.2	26
	сточные	2.2	49	1.4	7.1	2.1	18	1.5	15	1.7	12	9.1	46	140	355	2.1	25
пустынная	грунтовые	13	59	1.4	8.4	2.6	31	4.7	48	2.7	15	7.5	42	320	710	2.9	28
	сточные	2.9	49	1.3	7.25	2.1	20.5	—	—	2.7	13	6.8	42	290	665	2.7	24
$D_1 \times 10^6, \text{см}^2/\text{с}$		4–20		3–7		6.7		8.2–9.5		7.2		7.5		10–20		7	

рассчитывали коэффициенты распределения как отношения различных трудноизвлекаемых фракций элементов к легкоизвлекаемым, а затем проверяли, имеется ли обратная зависимость диффузионных параметров от  $K$  (формула (1а)). Это возможно при наличии нескольких однотипных почв (для Египта 2 почвы по 2 варианта).

Критерии пригодности такого подхода: 1) оба члена регрессионного уравнения должны быть положительными – это следует из смысла формулы (1а); 2) регрессионное уравнение должно быть значимым. Если эти условия не удовлетворяются или однотипных почв мало, то можно использовать расчет для каждой отдельной почвы и условий миграции при произвольных величинах  $K$ . Для этого формулу (1) перепишем следующим образом

$$D = \frac{D_1(l_0/l_1)^2\theta_1}{\theta_1 + \theta_2 K} + \frac{D_2(l_0/l_2)^2\theta_2 K}{\theta_1 + \theta_2 K} = D(I) + D(II). \quad (16)$$

Зная величины  $D_1$  из справочных данных, приблизительные величины  $\theta_1$  и  $\theta_2$  (мы брали 0.2 и 0.8 соответственно), рассчитывая коэффициент извилистости для жидкой фазы или беря его из эксперимента [28] (у нас получилось 0.45), а величины  $K$  – из результатов фракционирования, можно рассчитать величину первого слагаемого формулы (16) –  $D(I)$ . Критерий пригодности такого подхода –  $D(I) < D$  и  $< Dk$ .

Рассмотрим, что получилось для орошаемых почв Египта. В табл. 2 приведены минимальные и максимальные величины  $K$ , оцененные как отношения содержания трудноизвлекаемых фракций к легкоизвлекаемым. Для Zn, применяя регрессионный подход, подходящая величина  $K$  соответствовала отношению фракции остатка к сумме первых 3-х фракций (обменная, с карбонатами и с органическим веществом). Вышеизложенный подход с “черным ящиком” также показал влия-

ние карбонатов в ту же сторону (там наличие карбонатов увеличивало диффузионные параметры, здесь увеличение связи Zn с карбонатами уменьшало величину  $K$  и, следовательно, тоже увеличивало диффузионные параметры). По индивидуальному подходу через  $D(I)$  все возможные величины  $K$  удовлетворяют заданному критерию, т.е. более конкретный выбор соотношения фракций невозможен.

Для Cd регрессионный подход не выявил подходящих величин  $K$ , а индивидуальный подход показал пригодность наибольших его показателей (остаток/обменный, (остаток + оксиды)/обменный, (остаток + оксиды)/(обменный + на карбонатах)). Для Ni оба подхода не выявили подходящих величин  $K$ , причем по индивидуальному подходу все показатели  $K$  удовлетворяют заданному критерию. Для Pb только индивидуальный подход показал пригодность величин  $K > 2.0$ , т.е. отношений остатка к обемному и суммы остатка и оксидов к остальным фракциям. Аналогичная ситуация выявлена для Co ( $K > 2.5–3.0$ ) – пригодны практически все варианты, а также все варианты для Cu, Fe, Mn.

Таким образом, для орошаемых почв Египта в большинстве случаев избирательности каких-либо из исследованных фракций ТМ с точки зрения связи с диффузионными параметрами миграции не наблюдали.

При изучении миграции на легкой пахотной почве Франции оценивали кинетику и суммарное извлечение Zn и Cd 0.05 М Na-EDTA и 0.1 М  $\text{NH}_4$ -цитратом [7, 29]. Три кинетических пула (по модели кинетики десорбции) и доля суммарного извлечения элементов (от валового содержания) были использованы нами для оценок  $K$ . По доле суммарного извлечения Zn оценки  $K$  были 0.92 (Na-EDTA) и 1.3 ( $\text{NH}_4$ -цитрат), а по пулам моделей кинетики десорбции – от 0.89 до 1.9; для

**Таблица 3.** Оценки средневзвешенных по глубине величин коэффициента распределения ( $K$ ) в почвах Мурманской области (в скобках – размах варьирования по глубине почвы)

Почва	Cd	Co	Cu	Ni	Zn
Подзол эродированный	3.8 (2.2–5.5)	–	1.7 (0.58–2.7)	–	–
Минерально-перегнойно-торфяная	2.4 (1.2–3.5)	3.8 (0.76–22)	5.9 (3.9–7.9)	–	6.0 (3.3–23)
Торфяная эвтрофная	4.7 (2.1–4.7)	–	16 (7.1–32)	4.5 (3.2–18)	10 (6.2–14)
Торфяная эвтрофная	–	1.0 (0.55–1.8)	6.1 (3.8–28)	1.7 (1.4–4.9)	7.1 (4.2–20)
Подзол иллювиально-железистый	–	–	2.1 (1.0–6.2)	76 (39–120)	–

Cd – 0.27 и 0.47, и от 0.2 до 1.5 соответственно. Так как в данном случае имеем только одну почву, то используем индивидуальный подход, который показал, что все оценки величины  $K$  не удовлетворяют заданному критерию.

При изучении миграции техногенного фтора в Оренбургской обл., кроме определения содержания валового фтора по глубине почв, в одной из серий исследования определяли также содержание водорастворимого фтора [9, 30], что дало нам возможность оценить величину  $K$  для чернозема (0.5 км от завода) и чернозема щебнистого (1.5 км от завода). Средневзвешенная по профилю почвы величина  $K$  для чернозема была равна 200 (диапазон 17–490), для чернозема щебнистого – 41 (35–47),  $D_1$  –  $14.5 \times 10^{-6}$  см<sup>2</sup>/с. Оказалось, что для средневзвешенных величин  $K$  и больших величин в диапазонах варьирования условия заданного критерия для индивидуального подхода удовлетворяются.

При исследовании вертикальной миграции ТМ в почвах Мурманской обл. [31, 32], наряду с валовым содержанием, определяли подвижную форму извлечением 1 М буферным раствором  $\text{CH}_3\text{COONH}_4$  рН 4.8, что также дало нам возможность оценить величины  $K$  как по слоям почвы, так и средневзвешенные показатели.

Так как в выборку входили очень разные почвы (минеральные и органогенные), то регрессионный подход не использовали. Средневзвешенные величины  $K$  во многих случаях ненамного превышали единицу (табл. 3), что также ограничивало возможность применения формулы (1а). В табл. 3 приведены только те случаи, для которых удалось оценить диффузионные параметры

[32]. В целом не было видно общей закономерности в зависимости величин  $K$  от почв или элементов.

Расчеты при использовании индивидуального подхода показали, что во всех случаях рассчитанные величины  $D(I)$  больше величин  $D$  и  $Dk$ , т.е. содержание подвижной формы ТМ (ацетатный буфер) не соответствует миграционной подвижности; конкретнее, эта вытяжка зависила содержание миграционно-подвижных форм в данных почвах. Ранее для этих данных при статистическом анализе прямых связей параметров миграции с содержанием данной подвижной формы были получены корреляции положительные, но незначимые [32].

Гипотетический механизм миграции ТМ вглубь почвы в виде (или вместе) механических частиц проверить на данной выборке публикаций исходных полевых исследований не удалось, т.к. почти во всех этих работах отсутствуют данные гранулометрического состава почв на всю глубину загрязнения. В некоторых работах встречается эта информация только для верхнего слоя почвы. Единственная подходящая работа относится к орошаемым почвам Египта [33], где гранулометрический состав представлен в виде 3-х фракций (песок, ил, глина). Мы проанализировали эти данные с точки зрения сходства горизонтов внутри этих почв. Получилось, во-первых, что аллювиальные и пустынные почвы четко разделялись между собой, а варианты орошения (природные или сточные воды) влияли слабо. Для дальнейшего анализа использовали подходы, предложенные в [34, 35]: оценивали, как изменялось сходство горизонтов в профилях почв после исключения той или иной фракции.

Кратко результаты выглядят следующим образом. Исключение самой тонкой фракции “глина” уменьшало сходство горизонтов по профилю и сближало горизонты разных почв между собой. Исключение средней фракции “ил” повышало сходство внутри каждого профиля, что говорило в пользу возможного перемещения этой фракции. Однако это затрагивало в основном пахотные горизонты, а потому сделан предварительный вывод о попадании частиц этой фракции извне – либо с атмосферной пылью, либо с оросительными водами. К миграции ТМ это, по-видимому, не имеет отношения.

### ВЫВОДЫ

1. Рассмотрены разные подходы к изучению закономерностей варьирования диффузионных параметров моделей многолетней миграции ТМ и фтора на примере выборки для 7-ми регионов мира и 22-х почв.

2. При подходе к этой информации как к черному ящику для всех загрязняющих элементов вместе получены хорошие регрессионные зависимости диффузионных параметров от совокупности факторов – среднегодовой температуры воздуха в регионе, наличия карбонатов в верхнем загрязненном слое почвы, оросительной нагрузки (от отсутствия орошения до орошения загрязненными водами), типа модели миграции (диффузионной или конвективно-диффузионной).

Этот подход был эффективен и для отдельных элементов (Cd, Zn, Ni, Pb, Cu), представленных не менее, чем в 3-х регионах. Для Cd ведущим фактором было орошение, для Zn и Ni – карбонаты и орошение, для Pb – карбонаты, орошение и температура, для Cu равноценны пары факторов – карбонаты и орошение или карбонаты и температура.

Для всех полученных регрессий коэффициенты конвективной диффузии в среднем были меньше коэффициентов диффузии (для Cu и Pb разница была незначима).

3. Эти же данные проанализированы на базе теоретической модели для диффузионных параметров, включающей коэффициент распределения элемента ( $K$ ) между твердой и жидкой фазами почвы. Величину  $K$  в этих случаях оценивали либо через концентрацию почвенного раствора в профиле почвы, либо по результатам лабораторных исследований различных вытяжек из почвенных образцов.

Приемлемые качественные и полуколичественные результаты с точки зрения теоретиче-

ской модели получены для Cd, Zn, Pb в случае измерения концентраций элементов в почвенном растворе (южный Китай), для F – при использовании водорастворимой формы (Оренбург), для Cd и Pb – отношений трудноизвлекаемых фракций к легкоизвлекаемым (Египет). В остальных случаях (включая вытяжки ЭДТА и цитратные (Франция), ацетатный буфер (Мурманск)) результаты получились либо неприемлемыми, либо неопределенными.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фрид А.С. Механизмы и модели миграции  $^{137}\text{Cs}$  в почвах // Радиационная биология. Радиоэкология. 1999. Т. 39. № 6. С. 667–674.
2. Радиоэкологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС: биологические эффекты, миграция, реабилитация загрязненных территорий / Под ред. Санжаровой Н.И., Фесенко С.В. М.: РАН, 2018. 278 с.
3. Фрид А.С., Борисочкина Т.И. Использование миграционных моделей при исследовании передвижения ТМ в загрязненных почвах // Проблемы техногенного воздействия на сферу агропромышленного производства: теория и практика. Сб. тр. совещ. 8 июня 2010 г. / Под ред. Алексахина Р.М. Обнинск, 2011. С. 100–105.
4. Frid A.S. Migration models of Cu, Zn, and Cd in soils under irrigation with urban wastewater // Biogenic-abiogenic interactions in natural and anthropogenic systems / Eds. Frank-Kamenetskaya O.V., Panova E.G., Vlasov D.Yu. Springer Inter. Publ. AG Switzerland, 2016. P. 157–163. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-24987-2\(-13\)](https://doi.org/10.1007/978-3-319-24987-2(-13))
5. Фрид А.С., Гома Ботхина Саад М.А., Борисочкина Т.И. Миграция ТМ в аридных почвах Египта, орошаемых природными и городскими сточными водами (подведение итогов) // Агрохимия. 2016. № 11. С. 46–57.
6. Фрид А.С., Борисочкина Т.И. Параметры моделей миграции ТМ в нарушенных лесных почвах в зоне воздействия сталелитейного завода // Агрохимия. 2018. № 3. С. 72–76. <https://doi.org/10.7868/S0002188118030092>
7. Фрид А.С., Борисочкина Т.И. Параметры моделей миграции Zn и Cd в пахотных почвах в зоне воздействия металлургического комплекса // Агрохимия. 2018. № 6. С. 63–67. <https://doi.org/10.7868/S0002188118060078>
8. Фрид А.С., Борисочкина Т.И. Фтор: миграционная подвижность в почвах при техногенных загрязнениях // Агрохимия. 2019. № 3. С. 65–71. <https://doi.org/10.1134/S0002188119030062>
9. Фрид А.С., Борисочкина Т.И. Миграционное поведение ТМ и фтора в почвах Оренбургской техногенной биогеохимической провинции и его прогноз на 2020 год // Агрохимия. 2019. № 4. С. 79–90. <https://doi.org/10.1134/S0002188119040057>
10. Фрид А.С., Борисочкина Т.И. Параметры моделей вертикальной миграции в почвах ТМ в окрестно-

- сти завода по производству свинца и сурьмы // Бюл. Почвенного ин-та им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97. С. 150–164.  
<https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-97-150-164>
11. *Frid Aleksandr S., Borisochkina Tatiana I.* Vertical migration of pollutants in the soils of the Orenburg technogenic biogeochemical province // *Scirea J. Environ.* 2019. V. 3. Iss. 2. P. 46–69.
  12. *Фрид А.С., Борисочкина Т.И.* Диффузионные параметры вертикальной миграции ТМ в почвах зон техногенного и агрогенного загрязнения // Матлы 6-й конф. с международ. участием “Математическое моделирование в экологии” ЭкоМатМод-2019. Пушино, Россия, 26–29 сент. 2019. С. 220–221.
  13. *Фрид А.С., Шуравилин А.В., Гома Ботхина Саад М.А., Борисочкина Т.И.* Миграция меди в аридных почвах Египта, орошаемых природными и городскими сточными водами // *Агрохимия.* 2014. № 3. С. 60–68.
  14. *Фрид А.С., Шуравилин А.В., Гома Ботхина Саад М.А., Борисочкина Т.И.* Миграция меди, цинка и кадмия в аридных почвах Египта, орошаемых природными и городскими сточными водами // *Агрохимия.* 2014. № 11. С. 62–73.
  15. *Фрид А.С., Гома Ботхина Саад М.А., Борисочкина Т.И.* Миграция железа, кобальта и никеля в аридных почвах Египта, орошаемых природными и городскими сточными водами // *Агрохимия.* 2016. № 8. С. 68–81.
  16. *Прохоров В.М., Фрид А.С.* Количественные закономерности диффузии ионов в почве как пористой адсорбирующей среде // *Вопросы энерго- и массообмена в системе почва–растение–атмосфера.* Тр. по агроном. физике. Л., 1971. Вып. 32. С. 80–89.
  17. *Фрид А.С.* Диффузия в каналах переменного сечения. Депонент ВИНТИ № 3365-79, Минск, 1979. 12 с. “Миграция в почве и ее моделирование”. Научн. тр. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2006. С. 185–192.
  18. *Рыжинский М.В., Фрид А.С.* Обобщение уравнения конвективной диффузии на многофазную среду // *Бюл. научн.-тех. информ. по агроном. физике.* Л., 1973. № 17–18. С. 17–21.
  19. *Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments.* Vienna: Inter. Atomic Energy Agency, 2010. Techn. rep. Ser. № 472.
  20. *Прохоров В.М., Фрид А.С.* Связь между адсорбцией и скоростью диффузии микроколичеств стронция в почве // *Радиохимия.* 1966. Т. 8. № 6. С. 695–696.
  21. *Прохоров В.М., Фрид А.С., Рыжинский М.В.* Влияние известкования почвы на скорость диффузии в ней стронция-90 // *Агрохимия.* 1970. № 2. С. 40–48.
  22. *Прохоров В.М., Фрид А.С.* Вклад адсорбированных ионов в диффузию  $^{90}\text{Sr}$  в почвах // *Радиохимия.* 1972. Т. 14. № 4. С. 519–526.
  23. *Минкина Т.М., Вардуни Т.В., Манджиева С.С., Сушкова С.Н.* Индикация химического загрязнения почв и растений. Ростовн/Д.: Изд-во “Печатная лавка”, 2015. 192 с.
  24. *Плеханова И.О.* Трансформация соединений ТМ в почвах при увлажнении: Дис. ... д-ра биол. наук. М., 2008. 295 с.
  25. *Манджиева С.С., Минкина Т.М., Мотузова Г.В., Головатый С.Е., Мирошниченко Н.Н., Лукашенко Н.К., Фатеев А.И.* Фракционно-групповой состав соединений цинка и свинца как показатель экологического состояния почв // *Почвоведение.* 2014. № 5. С. 632–640.
  26. *Таргульян В.О.* Теория педогенеза и эволюции почв. М.: Изд-во ГЕОС, 2019. 296 с.
  27. *Yuan Y., Xiang M., Liu C., Theng B.K.G.* Geochemical characteristics of heavy metal contamination induced by a sudden wastewater discharge from a smelter // *J. Geochem. Explor.* 2017. V. 176. P. 33–41.
  28. *Розен Г.А.* Использование радиоактивного хлора при определении геометрических характеристик диффузии ионов в почвах // *Физико-химические аспекты плодородия почв Нечерноземной зоны.* Бюл. Почвенного ин-та им. В.В. Докучаева. М., 1984. Вып. 31. С. 36–40. (“Миграция в почве и ее моделирование”. Научн. тр. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2006. С. 193–196.)
  29. *Labanowski J., Monna F., Bermond A., Cambier Ph., Fernandez Ch., Lamy I., van Oort F.* Kinetic extractions to assess mobilization of Zn, Pb, Cu, and Cd in a metal-contaminated soil: EDTA vs. citrate // *Environ. Pollut.* 2008. V. 152. P. 693–701.
  30. *Головкова Т.В., Сиволобова Т.С.* Фтор в почве окрестностей криолитового завода // *Система методов изучения почвенного покрова, деградированного под влиянием химического загрязнения.* Научн. тр. Почвенного ин-та им. В.В. Докучаева. М., 1992. С. 86–89.
  31. *Кашулина Г.М.* Экстремальное загрязнение почв выбросами медно-никелевого предприятия на Кольском полуострове // *Почвоведение.* 2017. № 7. С. 860–873.
  32. *Фрид А.С., Борисочкина Т.И.* Миграционная подвижность тяжелых металлов в сильнозагрязненных почвах в окрестностях комбината “Североникель” (Мурманская область) // *Почвоведение.* 2020. № 9. С. 1144–1154.
  33. *Гома Ботхина Саад М.А.* Влияние многолетнего внесения сточных вод г. Александрия (Египет) на загрязнение почв тяжелыми металлами, питательный режим, урожайность и качество кукурузы, возделываемой на зеленую массу: Дис. ... канд. с.-х. наук. М., 2010. 207 с.
  34. *Градусов Б.П., Фрид А.С., Градусова О.Б.* Способ определения границ горизонтов почвенных профилей по аналитическим показателям на основе методов кластерного анализа // *Бюл. Почвенного ин-та им. В.В. Докучаева.* 2002. Вып. 55. С. 3–14.
  35. *Градусов Б.П., Фрид А.С., Градусова О.Б.* Методология изучения дифференциации твердой фазы почв // *Проблемы почвоведения.* Научн. тр. Почвенного ин-та им. В.В. Докучаева РАСХН. М., 2006. С. 346–367.

## Factors Influencing the Diffusion Parameters of the Vertical Migration of Heavy Metals and Fluorine in Different Soils during Pollution

A. S. Frid<sup>a,#</sup> and T. I. Borisochkina<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *V.V. Dokuchaev Soil Institute, per. Pyzhevskii 7, bld. 2, Moscow 119017, Russia*

<sup>#</sup> *E-mail: asfrid@mail.ru*

An attempt was undertaken to identify possible factors influencing on the diffusion parameters of heavy metals (HM) and fluorine in the soil. Available estimates of the diffusion parameters of the long-term migration of heavy metals and fluorine under field conditions were used for this analysis. The sample includes data for 7 regions of the world, 22 soils. It was shown that factors such as the average annual air temperature, the presence of carbonates, and the quality of irrigation waters provide good regression dependences for diffusion parameters. This took place both for individual polluting elements, and for their combination. For all elements, convective diffusion coefficients were on average less than diffusion coefficients. An analysis of the hypothetical relationship of diffusion parameters with analytical data on the extraction of various “forms of compounds” of HM and fluorine from soils is carried out. Acceptable results were obtained by comparing the diffusion parameters with the concentrations of Cd, Zn, Pb in the soil solution and with the content of water-soluble fluorine in the soil. The relationship between the diffusion parameters and the ratios of hard-to-extract HM fractions to easily-extracted was acceptable for Cd and Pb. In other cases (including EDTA extracts, citrate, acetate buffer), the results were either unacceptable or uncertain.

*Key words:* heavy metals, fluorine, diffusion migration parameters, long-term soil pollution, migration factors, “forms of compounds” of heavy metals and fluorine in soils, temperature, carbonates, irrigation.

УДК 631.879.2:633.16

## ВЛИЯНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ВОД ПОЛИГОНА ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ НА БИОМАССУ И ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ РАСТЕНИЙ ЯЧМЕНЯ

© 2020 г. С. Е. Витковская<sup>1,2,\*</sup>, Ю. О. Шилова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Российский государственный гидрометеорологический университет  
192007 Санкт-Петербург, ул. Воронежская, 79, Россия

<sup>2</sup> Агрофизический научно-исследовательский институт  
195220 Санкт-Петербурге, Гражданский просп., 14, Россия

\*E-mail: s.vitkovskaya@mail.ru

Поступила в редакцию 18.03.2020 г.

После доработки 01.05.2020 г.

Принята к публикации 10.08.2020 г.

В модельном эксперименте изучено влияние возрастающих доз фильтрационных вод (ФВ) полигона твердых коммунальных отходов на биомассу растений ячменя и распределение азота и тяжелых металлов (ТМ) (Cr, Cd, Li, Pb, Zn) в системе почва–растение. Зависимость биомассы растений в интервале доз ФВ 0–260 мл/кг почвы представлена кривыми с максимумом. Содержание N в надземной части растений линейно возрастало в интервале тестируемых доз ФВ. Наблюдали тенденцию увеличения содержания ТМ в почве. Переход ТМ из почвы в растения зависел от дозы ФВ, степени окультуренности почвы и свойств химических элементов. Содержание всех тестируемых ТМ в корнях существенно превысило содержание в надземной части растений.

*Ключевые слова:* фильтрационные воды, полигон твердых коммунальных отходов, биомасса растений, элементный состав растений, ячмень.

DOI: 10.31857/S0002188120110125

### ВВЕДЕНИЕ

Основным фактором негативного воздействия объектов размещения твердых коммунальных отходов (ТКО) на окружающую среду является инфильтрация из тела полигона фильтрационных вод (ФВ), образование которых является следствием взаимодействия влаги атмосферных осадков и реакционно-способных (потенциально разлагаемых) компонентов отходов [1, 2]. Тело полигона генерирует ФВ на всех этапах жизненного цикла. Объемы и состав ФВ динамичны во времени, зависят от условий атмосферного увлажнения и стадии трансформации отходов.

Фильтрат представляет собой темноокрашенный раствор, характеризующийся высоким содержанием органического вещества, макро- и микроэлементов. По некоторым оценкам, уровни загрязнений ФВ тяжелыми металлами (ТМ) в 5–20 раз превышают показатели, характерные для бытовых сточных вод. Фильтрат остается токсичным даже после 4-кратного (по некоторым данным – и 100-кратного) разбавления [1–4].

Полиэлементный состав ФВ полигонов ТКО позволяет рассматривать их как источник питания для почвенной микрофлоры и растений на откосах фильтрационных канав, прудов-отстойников и в случае поступления на прилегающие к ним территории. Влияние ФВ на рост и развитие растений зависит от генетически обусловленных особенностей растений, условий их контакта с ФВ, соотношения ФВ : почва, содержания фитотоксичных при определенных уровнях концентраций компонентов. Информации о влиянии ФВ на биомассу и элементный состав растений крайне мало. В то же время, состояние растительного покрова на территории полигона в период эксплуатации является показателем его экологического состояния, а при проведении рекультивации по сельскохозяйственному или санитарно-гигиеническому направлениям характеризует эффективность биологического этапа рекультивации.

Исследование видового состава растений на полигоне ТБО в Пермском крае показало, что в прибрежной зоне и на террасах прудов-отстойников, а также в толще фильтрата наблюдается мас-

**Таблица 1.** Химический состав фильтрационных вод [2]

Показатель	Содержание, мг/дм <sup>3</sup>	ПДК*
Аммоний-ион	>300 (930)	1.5 (по азоту)
Азот аммонийный	720	2.0
Нитрат-ион	21	45
Нитрит-ион	0.075	3.3
Фосфор общий	4.2	0.2
Магний	1100	50
Сурьма	<0.005	0.05
Ртуть	0.0006	0.0005
Мышьяк	0.0071	0.05
Медь	0.052	1
Хром	0.2	0.3
Железо	11	0.3
Кадмий	0.015	0.001
Свинец	0.016	0.03
Литий	0.02	0.03
Барий	0.004	0.1
Сухой остаток	10000	1000 (1500)
Прокаленный остаток	7 500	—
Органическое вещество	2500	—
pH	8.3	8.5

\*Для водоемов хозяйственно-питьевого назначения.

совое развитие растительных сообществ (осот желтый, осот розовый, ежа сборная, клевер красный, мятлик луговой, пустырник пятилопастный, ива козья, ива прутовидная, лопух паутинистый, крапива двудомная, ромашка непахучая, пырей бескорневишный, пырей ползучий, сурепка обыкновенная, одуванчик лекарственный, частуха подорожниковая, борщевик Сосновского, кипрей узколистный и др.). Отклонения в развитии отдельных тканей или органов растений, а также карликовость, гигантизм, общее угнетение и иные аномалии по фенотипу не выявлены [5]. Исследования, проведенные нами на территории полигона ТБО в Ленинградской обл., подтвердили, что растительный покров вблизи фильтрационных канав характеризуется значительным видовым разнообразием, а непосредственно в канавах произрастает рогоз узколистный (*Typha angustifolia* L.). Экспериментально установлено [5], что наибольшая степень резистентности в условиях воздействия фильтрационных вод полигона ТБО наблюдается у растений, относящихся к группе гидрофитов: частухи подорожничко-

вой, рогоза узколистного, камыша озерного, элодеи канадской.

Цель работы – в условиях модельного эксперимента изучить влияние возрастающих доз фильтрационных вод на биомассу растений ячменя и распределение ТМ (Cr, Cd, Li, Zn) и азота в системе почва–растение в зависимости от уровня окультуренности дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы.

#### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Фильтрат для закладки модельного эксперимента был отобран в июле 2017 г. из обводной замкнутой траншеи для сбора ФВ на полигоне “Профспецтранс”, расположенного в Волосовском р-не Ленинградской обл. [2]. Химический состав фильтрата представлен в табл. 1.

Эксперимент был заложен в день отбора ФВ в полиэтиленовых сосудах объемом 900 мл на средне-, хорошо- и высокоокультуренной дерново-подзолистых легкосуглинистых почвах, отобранных в Меньковском филиале Агрофизического института (табл. 2). Масса почвы в сосуде – 0.96 кг, повторность трехкратная. Схема опыта включала 18 вариантов (по 6 вариантов для каждой разновидности почвы): 1 – контроль (без фильтрата), 2 – 52 мл ФВ/кг почвы, 3 – 104 мл ФВ/кг почвы, 4 – 156 мл ФВ/кг почвы, 5 – 208 мл ФВ/кг почвы, 6 – 260 мл ФВ/кг почвы. Фильтрат вносили в почву до набивки сосудов, методом полива. В пересчете на 1 га почвы доза внесения ФВ в вариантах 2–6 составляла 156, 312, 468, 624 и 780 тыс. л соответственно.

Растения ячменя сорта Ленинградский (16 шт./сосуд) выращивали в течение 25 сут. Полив проводили дистиллированной водой. Почвенные пробы отбирали из каждого сосуда в день уборки опыта. Определяли сырую биомассу растений. Корневую систему промывали проточной и дистиллированной водой.

В объединенных по повторностям почвенных пробах определяли валовое содержание Cr, Li, Zn, Cd [6], содержание N-NO<sub>3</sub> [7] и N-NH<sub>4</sub> [8], pH – ионоселективным методом. Биомассу растений для анализа также объединяли по всем повторностям. Валовое содержание ТМ в растительных пробах определяли согласно [9]: методика автоклавной пробоподготовки с последующим определением методами атомно-абсорбционной спектrophотометрии (Cd, Pb, Zn, Cr), атомно-эмиссионной спектrophотометрии (Li). Содержание азота в наземной части растений устанавливали согласно [10]. Повторность измерений трехкрат-

Таблица 2. Агрохимическая характеристика почв опыта [15]

Вариант	рН <sub>KCl</sub>	N, %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Органическое вещество, %
			мг/кг		1/2 ммоль/100 г		
Среднеокультуренная почва							
3	5.1	0.11	134	75	4.2	2.3	3.1
Хорошоокультуренная почва							
3	5.8	0.16	215	132	5.2	3.4	3.8
Высокоокультуренная почва							
3	6.1	0.26	242	155	7.4	3.4	5.4

ная. Математическую обработку данных проводили в программе ORIGIN 7,5.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние возрастающих доз ФВ на величину рН, содержание N-NO<sub>3</sub>, N-NH<sub>4</sub> и ТМ в почве наблюдали через 28 сут после внесения ФВ в почву (табл. 3). Установлено, что внесение раствора ФВ с величиной рН 8.3 не привело к существенному изменению реакции почвы и превышению ПДК содержания нитратов (130 мг/кг почвы). В средне- и хорошоокультуренной почвах при внесении ФВ в дозе 52 мл/кг содержание N-NO<sub>3</sub> возросло по отношению к контролю в 2.9 и 3.1 раза соответственно, дальнейшее увеличение дозы ФВ не оказало существенного влияния на данный показатель. Линейную зависимость N-NO<sub>3</sub> = f (доза ФВ) наблюдали только в хорошоокультуренной почве ( $r = 0.852$ ). В интервале доз ФВ 50–250 мл/кг коэффициенты вариации ( $v$ , %), характеризующие неоднородность содержания N-NO<sub>3</sub> в средне-, хорошо- и высокоокультуренной почвах, составили 2, 14 и 7% соответственно. Согласно общепринятому положению [11], участок считается однородным по агрохимическому показателю, если величина коэффициента вариации не превышает 25%.

Содержание N-NH<sub>4</sub> в средне-, хорошо- и высокоокультуренной почвах через 28 сут взаимодействия ФВ с почвой варьировалось в пределах  $74 \pm 20$ ,  $84 \pm 12$  и  $84 \pm 10$  мг/кг соответственно и не зависело от содержания N-NO<sub>3</sub>. Коэффициент вариации не превысил 12–27%.

Внесение ФВ привело к некоторому увеличению содержания ТМ в почве, но даже максимальная доза (780 тыс. л/га) не создала предпосылок для достижения и/или превышения гигиенических нормативов для почв по тестируемым показателям. Ранее расчетным методом было установ-

лено [2], что загрязнение почвенного покрова ТМ (превышение ПДК) возможно только при длительном контакте фильтрационных вод с почвой, например, в пределах фильтрационной канавы, а также в отсутствии сооружений для сбора и отведения ФВ (несанкционированные свалки).

Наблюдали тенденцию к увеличению содержания Li в почве опыта: при внесении ФВ в дозе 52 мл/кг почвы содержание элемента возросло на 17, 8 и 8% в средне-, хорошо- и высокоокультуренной почвах соответственно. В хорошо- и высокоокультуренной почве зависимость Li (почва) = f (доза ФВ) характеризовалась коэффициентами корреляции  $r = 0.680$  и  $0.732$  соответственно, при критической величине  $r = 0.811$  на 5%-ном уровне значимости. Максимальное увеличение содержания Li в почве по отношению к контролю составило 37% (вариант 4, среднеокультуренная почва). Содержание Li в почве не нормируется. Согласно [12], среднее содержание Li меняется от 1.2 мг/кг в легких органических почвах до 98 мг/кг – в аллювиальных.

В тестируемом интервале доз ФВ (0–260 мл/кг) содержание Cd в почве варьировалось в пределах  $0.023 \pm 0.004$ ,  $0.02 \pm 0.005$  и  $0.029 \pm 0.012$  в средне-, хорошо- и высокоокультуренной почвах соответственно, что существенно меньше ОДК. Неоднородность содержания Cd в почве в вариантах 1–6 можно оценить по коэффициентам вариации, величины которых составили 17, 25 и 41% соответственно в средне-, хорошо- и высокоокультуренной почвах. Исходя из этого критерия, можно предположить, что при контакте ФВ с почвой происходило увеличение содержания Cd.

Наблюдали тенденцию к увеличению содержания Cr в почве: в интервале доз 0–260 мл ФВ/кг зависимость Cr (почва) = f (доза ФВ) по линейной модели характеризовалась коэффициентами корреляции 0.493, 0.860 и 0.686 в средне-, хорошо- и высокоокультуренной почвах соответственно. Коэффициенты вариации, характеризующие не-

**Таблица 3.** Влияние возрастающих доз фильтрационных вод на величину рН<sub>KCl</sub>, содержание азота и тяжелых металлов в почве, мг/кг

Вариант	рН <sub>KCl</sub>	рН <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	N-NH <sub>4</sub>	N-NO <sub>3</sub>	Cr	Cd	Li	Zn
Среднеокультуренная почва								
1. Контроль	5.7	6.8	100	18	4.0	0.02	1.8	13.6
2. 52 мл ФВ/кг	5.5	6.6	60	52	4.3	0.02	2.1	15.5
3. 104 мл ФВ/кг	5.5	6.5	54	51	5.0	0.03	2.1	15.3
4. 156 мл ФВ/кг	5.5	6.5	100	53	6.2	0.025	2.4	18.3
5. 208 мл ФВ/кг	5.6	6.7	67	53	4.9	0.025	2.1	15.3
6. 260 мл ФВ/кг	5.4	6.6	64	53	4.8	0.02	1.9	15.2
Хорошоокультуренная почва								
1. Контроль	5.3	6.6	94	11	4.0	0.02	1.2	18.6
2. 52 мл ФВ/кг	5.7	6.6	100	34	3.9	0.025	1.3	19.8
3. 104 мл ФВ/кг	5.8	6.6	67	45	4.1	0.025	1.4	20.7
4. 156 мл ФВ/кг	5.5	6.5	80	45	4.8	0.01	1.6	21.5
5. 208 мл ФВ/кг	5.2	6.3	87	46	4.9	0.015	1.5	20.4
6. 260 мл ФВ/кг	5.6	6.7	77	50	4.7	0.015	1.4	20.4
Высокоокультуренная почва								
1. Контроль	5.8	6.9	80	42	4.1	0.03	1.3	18.1
2. 52 мл ФВ/кг	5.1	6.1	94	44	4.8	0.025	1.4	19.7
3. 104 мл ФВ/кг	5.5	6.8	80	41	4.5	0.04	1.5	18.5
4. 156 мл ФВ/кг	5.5	6.8	74	45	5.7	0.045	1.8	21.9
5. 208 мл ФВ/кг	5.6	6.8	74	48	5.1	0.02	1.6	20.0
6. 260 мл ФВ/кг	5.4	6.8	97	46	5.1	0.015	1.6	21.4
ОДК*	—	—	—	—	—	0.5	—	55
Фоновое содержание валовых форм** [16]	—	—	—	—	—	0.05	—	28

\*ОДК для песчаных и супесчаных почв, \*\*для дерново-подзолистых песчаных и супесчаных почв.

однородность содержания Cr в почве в средне-хорошо- и высокоокультуренной почвах составили соответственно 16, 9 и 12%.

Содержание Zn в большей степени зависело от уровня окультуренности почвы, чем от внесения ФВ (табл. 3): в средне-, хорошо- и высокоокультуренной почвах оно варьировалось в пределах  $16 \pm 2$ ,  $18 \pm 4$  и  $20 \pm 2$  мг/кг соответственно; зависимости Zn (почва) = f (доза ФВ) по линейной модели характеризовались коэффициентами корреляции 0.365, 0.505 и 0.733.

Зависимость величины биомассы растений ячменя от дозы ФВ представлена кривыми с максимумом (рис. 1). На среднеокультуренной почве биомасса растений возрастала в интервале доз 0–156 мл ФВ/кг почвы, на хорошо- и высокоокультуренной почвах – в интервале доз 0–104 мл ФВ/кг. Дальнейшее увеличение дозы ФВ повлекло за собой снижение биомассы растений, что, вероятно, было обусловлено проявлением фито-

токсического эффекта. Наибольшая прибавка сырой биомассы растений ячменя составила 34 и 42% соответственно на среднеокультуренной почве в вариантах 3 и 4.

Установлено, что содержание азота в надземной части растений ячменя линейно возрастало в интервале доз 0–260 мл ФВ/кг почвы: на средне-, хорошо- и высокоокультуренной почвах коэффициенты корреляции составили соответственно 0.774, 0.969 и 0.938 (критическая величина  $r = 0.811$  на 5%-ном уровне значимости) (рис. 2). При внесении максимальной дозы ФВ (вариант 6), содержание азота в надземной части растений на средне-, хорошо- и высокоокультуренной почвах возросло по отношению к контролю на 19, 18 и 11% соответственно.

Влияние возрастающих доз ФВ на содержание ТМ в надземной части и корнях растений ячменя представлено в табл. 4, 5. Переход ТМ из почвы в растения зависел от дозы ФВ, степени окульту-

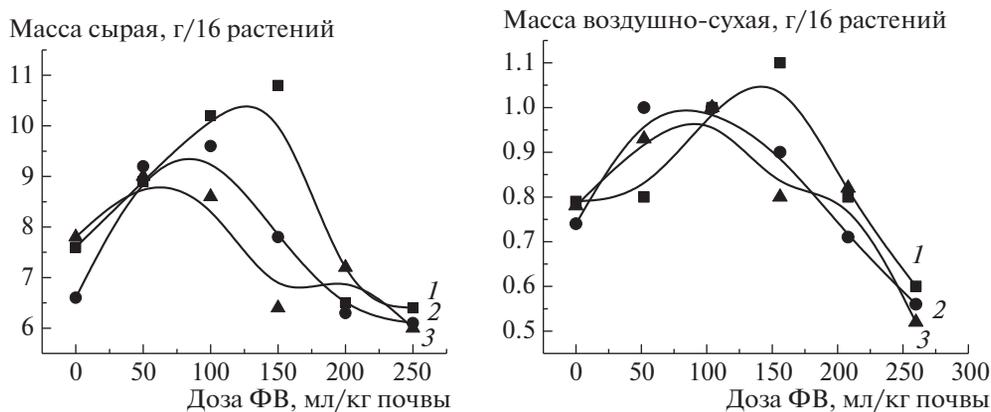


Рис. 1. Зависимость биомассы растений ячменя от дозы ФВ: 1, 2, 3 – средне-, хорошо- и высококультуренная почва.

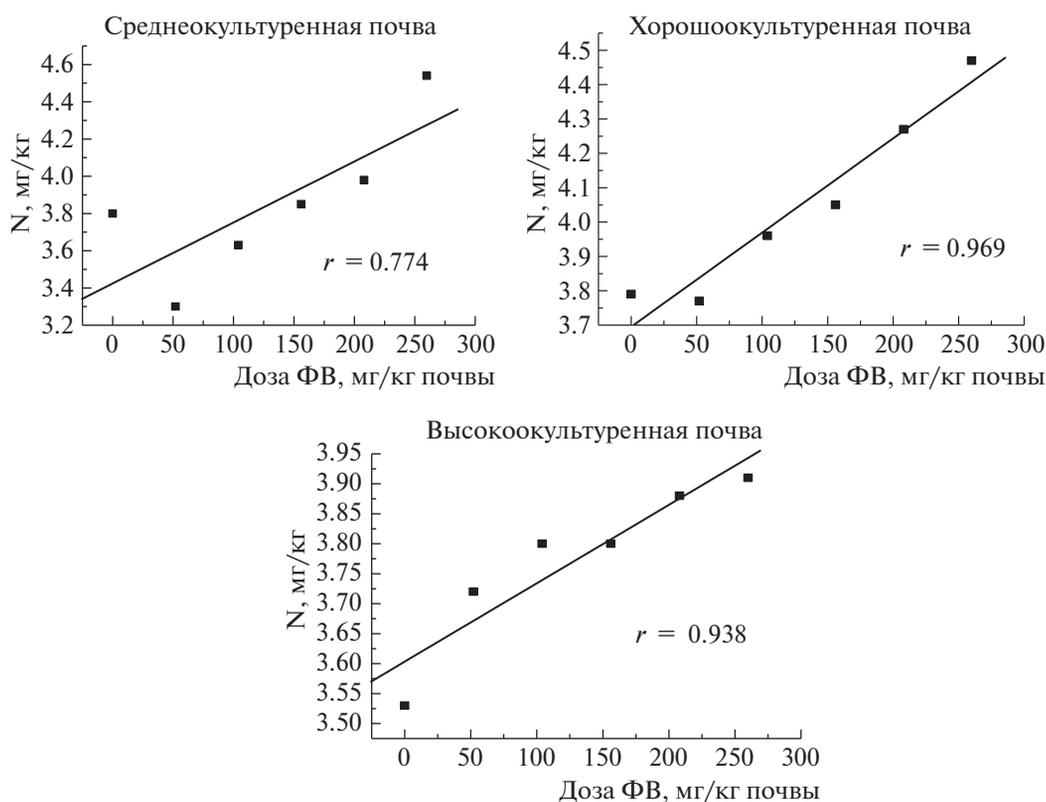


Рис. 2. Зависимость содержания азота в надземной части растений ячменя от дозы ФВ.

ренности почвы и свойств химических элементов. Содержание тестированных ТМ (за исключением Pb) в корнях существенно превысило их содержание в надземной части растений.

В интервале доз 52–260 мл ФВ/кг на средне-, хорошо- и высококультуренной почвах зависимость содержания Li в надземной части растений от дозы характеризовалась коэффициентами корреляции  $r = 0.978$ ,  $0.510$  и  $0.868$  соответственно. По данным [12], распределение Li в системе кор-

ни—надземная часть существенно зависит от видовых особенностей растений. Среднее в вариантах содержание Li в корнях ячменя ( $6 \pm 2$ ) превысило данный показатель для надземной части растений ( $0.4 \pm 0.2$ ) в 15 раз. На высококультуренной почве содержание Li в корнях линейно снижалось ( $r = -0.973$ ) в указанном выше интервале доз. Известно [13, 14], что одним из основных источников Li в ФВ полигонов ТКО являются отработанные литиевые батареи: химические источ-

**Таблица 4.** Влияние возрастающих доз фильтрационных вод на содержание тяжелых металлов в надземной части растений ячменя, мг/кг а.с.в.

Вариант	Cr	Cd	Li	Pb	Zn
Среднеокультуренная почва					
1. Контроль	9.6	0.114	0.55	11.2	43
2. 52 мл ФВ/кг	5.2	0.056	0.28	3.0	28
3. 104 мл ФВ/кг	6.1	0.166	0.29	2.3	29
4. 156 мл ФВ/кг	6.4	0.177	0.34	4.5	27
5. 208 мл ФВ/кг	5.7	0.083	0.41	2.5	27
6. 260 мл ФВ/кг	4.2	0.049	0.45	2.4	27
Хорошоокультуренная почва					
1. Контроль	6.2	0.014	0.35	6.9	28
2. 52 мл ФВ/кг	6.0	0.047	0.31	4.2	31
3. 104 мл ФВ/кг	6.1	0.107	0.32	4.2	33
4. 156 мл ФВ/кг	6.7	0.116	0.36	4.8	32
5. 208 мл ФВ/кг	24.9	0.781	1.35	31.6	49
6. 260 мл ФВ/кг	2.6	0.321	0.51	2.6	36
Высокоокультуренная почва					
1. Контроль	2.3	0.052	0.39	6.8	29
2. 52 мл ФВ/кг	0.7	0.028	0.32	5.0	30
3. 104 мл ФВ/кг	2.7	0.076	0.34	4.8	29
4. 156 мл ФВ/кг	2.0	0.114	0.43	4.6	31
5. 208 мл ФВ/кг	1.4	0.108	0.38	5.5	30
6. 260 мл ФВ/кг	2.7	0.183	0.52	7.6	40
МДУ для грубых и сочных кормов, мг/кг [17]	0.5	0.3	—	5.0	50

ники тока, в которых в качестве анода используется металлический литий — один из самых химически активных элементов.

Влияние возрастающих доз ФВ на содержание Cd в растениях ячменя существенно зависело от уровня окультуренности почвы. Максимальное увеличение содержания Cd в надземной части растений по отношению к контролю на хорошоокультуренной почве составило 56 раз (вариант 5), на высокоокультуренной почве — 3.5 раза. Отношение средних содержаний элемента в вариантах в корнях и надземной части растений варьировалось в пределах 5–10. На среднеокультуренной почве содержание Cd в надземной части и корнях растений не зависело от дозы ФВ (табл. 4). Зависимость  $Cd = f(\text{доза ФВ})$  на средне- и высокоокультуренной почвах характеризовалась для надземной части коэффициентами корреляции  $r = 0.690$  и  $0.911$  соответственно, для корней —  $0.625$  и  $0.923$  соответственно (при критической величине  $r = 0.811$  на 5%-ном уровне значимости).

**Таблица 5.** Влияние возрастающих доз фильтрационных вод на содержание тяжелых металлов в корнях растений ячменя, мг/кг а.с.в.

Вариант	Cr	Cd	Li	Pb	Zn
Среднеокультуренная почва					
1. Контроль	7.3	0.93	6.5	10.5	46.9
2. 52 мл ФВ/кг	9.6	1.29	10.7	10.2	49.3
3. 104 мл ФВ/кг	16.9	1.97	6.2	9.9	37.7
4. 156 мл ФВ/кг	10.9	1.58	5.8	10.8	43.1
5. 208 мл ФВ/кг	12.5	1.24	9.7	7.7	54.5
6. 260 мл ФВ/кг	15.7	1.20	10.7	11.0	50.2
Хорошоокультуренная почва					
1. Контроль	12.3	0.78	7.2	8.0	44.8
2. 52 мл ФВ/кг	8.2	1.05	5.4	1.4	50.8
3. 104 мл ФВ/кг	8.3	1.14	5.1	2.0	51.5
4. 156 мл ФВ/кг	9.6	1.6	3.7	6.9	56.3
5. 208 мл ФВ/кг	16.2	1.24	4.4	5.0	345
6. 260 мл ФВ/кг	18.8	1.2	7.3	12.2	200
Высокоокультуренная почва					
1. Контроль	11.4	0.64	5.7	5.9	46.2
2. 52 мл ФВ/кг	9.6	0.83	6.4	0.87	39.2
3. 104 мл ФВ/кг	8.6	0.99	5.8	0.41	65.9
4. 156 мл ФВ/кг	28.5	0.86	4.6	0.24	45.1
5. 208 мл ФВ/кг	12.2	1.1	4.0	1.8	42.5
6. 260 мл ФВ/кг	10.1	1.22	3.8	9.6	52.3

Содержание Cr в надземной части растений ячменя существенно превысило МДУ для грубых и сочных кормов, снижалось с увеличением уровня окультуренности почвы и не зависело от дозы ФВ (табл. 4). На средне- и хорошоокультуренной почвах в интервале доз 0–260 мл ФВ/кг наблюдали тенденцию к линейному увеличению содержания Cr в корнях растений ( $r = 0.653$  и  $0.699$  соответственно).

По отношению к содержанию Zn в надземной части растений в интервале доз 0–260 мл ФВ/кг почвы наблюдали следующие тенденции: на среднеокультуренной почве содержание элемента снижалось ( $r = -0.716$ ), на хорошо- и высокоокультуренной почвах — возрастало и характеризовалось коэффициентами корреляции  $r = 0.671$  и  $0.720$  соответственно. При внесении 52 мл ФВ/кг в среднеокультуренную почву содержание Zn в надземной части растений ячменя снизилось в 1.5 раза по отношению к контролю (табл. 4). В корнях растений содержание Zn на средне- и высокоокультуренной почвах не зависело от дозы ФВ, на хорошоокультуренной почве зависимость  $C_{Zn(\text{корни})} = f(\text{доза ФВ})$  характеризовалась коэффициентом корреляции  $r = 0.720$  (табл. 5).

В интервале доз 0–260 мл ФВ/кг почвы наблюдали тенденцию к снижению содержания Pb в надземной части растений ячменя на средне- и хорошоокультуренной почвах ( $r = -0.653$  и  $-0.832$  соответственно). Превышение МДУ Pb выявлено в 33% проб. Содержание Pb в корнях растений снижалось с возрастанием уровня окультуренности почвы и не зависело от дозы ФВ (табл. 5).

Следует отметить, что ТМ в ФВ присутствуют в основном в составе органо-минеральных комплексов, неоднородность распределения которых в субстрате определяет неоднородность поступления химических элементов в почву с одинаковым количеством фильтрата, что частично объясняет различия в зависимостях доза–ответ, которые наблюдали для почв разного уровня окультуренности.

### ВЫВОДЫ

1. Полиэлементный состав фильтрационных вод (ФВ) полигонов твердых коммунальных отходов позволил рассматривать их как источник питания для почвенной микрофлоры и растений на откосах фильтрационных канав, прудов-отстойников и в случае поступления на прилегающие к ним территории.

2. Влияние ФВ на рост и развитие растений зависело от генетически обусловленных особенностей растений, условий их контакта с ФВ, соотношения ФВ : почва.

3. Установлено, что внесение ФВ в интервале доз 52–260 мл/кг почвы не привело к существенному изменению реакции дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы и превышению ПДК содержания N-NO<sub>3</sub> (130 мг/кг почвы).

4. Внесение ФВ привело к некоторому увеличению содержания ТМ в почве, но даже их максимальная доза (780 тыс. л/га) не создала предпосылок для достижения и/или превышения гигиенических нормативов для почв по тестируемым показателям. Увеличение содержания ТМ в почве при внесении тестируемых доз ФВ следует рассматривать как тенденцию, поскольку количество химических элементов (мг/кг), поступившее в почву с ФВ было мало по сравнению с их фоновым содержанием в почве.

5. Биомасса растений ячменя на среднеокультуренной почве возрастала в интервале доз 0–156 мл ФВ/кг почвы, на хорошо- и высокоокультуренной почвах – в интервале доз 0–104 мл ФВ/кг. Дальнейшее увеличение доз ФВ повлекло за собой снижение биомассы растений, что, вероятно, было обусловлено проявлением фитотоксического эффекта.

6. Содержание азота в надземной части растений ячменя линейно возрастало в интервале доз 0–260 мл ФВ/кг почвы: на средне-, хорошо- и высокоокультуренной почвах коэффициенты корреляции составили соответственно 0.774, 0.969 и 0.938 (критическая величина  $r = 0.811$  на 5%-ном уровне значимости).

7. Переход ТМ (Cr, Cd, Li, Pb, Zn) из почвы в растения зависел от дозы ФВ, степени окультуренности почвы и свойств химических элементов. Содержание всех тестируемых ТМ в корнях существенно превысило содержание в надземной части растений. Содержание Cr в надземной части растений ячменя существенно превысило МДУ для грубых и сочных кормов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Витковская С.Е.* Твердые бытовые отходы: антропогенное звено биологического круговорота. СПб.: АФИ, 2012. 132 с.
2. *Витковская С.Е., Шилова Ю.О., Малюхин Д.М.* Оценка потенциальной опасности фильтрационных вод полигонов твердых коммунальных отходов Ленинградской области // *Агрофизика*. 2019. № 1. С. 1–7.
3. *Степаненко Е.Е., Поспелова О.А., Зеленская Т.Г.* Исследование химического состава фильтрационных вод полигона твердых бытовых отходов // *Известия*. Самар. НЦ РАН. 2009. Т. 11. № 1 (3). С. 525–527.
4. *Скворцов Л.С., Варшавский В.Я., Камруков А.С., Селиверстов А.Ф.* Очистка фильтрата полигонов твердых бытовых отходов // *Чистый город*. 1998. № 2. С. 2–7.
5. *Комбарова М.М., Грачева Е.В.* Определение резистентности растений к фильтрационным водам полигона твердых бытовых отходов // *Вестн. Перм. нац. исслед. политех. ун-та. Охрана окружающей среды. Транспорт. Безопасность жизнедеятельности*. 2013. № 2. С. 48–60.
6. М-МВИ-80-2008 Методика выполнения измерений массовой доли элементов в пробах почв, грунтов и донных отложений методами атомно-эмиссионной и атомно-абсорбционной спектроскопии. СПб., 2008. 23 с.
7. ПНД Ф 16.1:2.2.2:3.67-10 Количественный химический анализ почв. Методика измерений массовой доли азота нитратов в пробах почв, грунтов, донных отложений, илов, отходов производства и потребления фотометрическим методом с салициловой кислотой. М., 2010. 22 с.
8. ПНД Ф 16.2:2.3:3.30-02 Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений. Содержание азота аммонийного в твердых и жидких отходах производства и потребления, осадках, шламах, активном иле, донных отложениях фотометрическим методом. М., 2002. 17 с.
9. Определение содержания токсичных элементов в пищевых продуктах и продовольственном сырье.

- Методика автоклавной пробоподготовки: Метод. указ-я. МУК 4.1.985-00. М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2000. 19 с.
10. ГОСТ 13496.4-93 Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения содержания азота и сырого протеина. М.: Стандартинформ, 2011. 15 с.
  11. *Витковская С.Е.* Методы оценки неоднородности почвенного покрова при планировании и проведении полевых опытов. СПб.: АФИ, 2011. 52 с.
  12. *Кабата-Пендиас А., Пендиас Х.* Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
  13. *Шилова Ю.О., Витковская С.Е.* Токсичные компоненты твердых бытовых отходов как источник загрязнения почв // Роль молодых ученых в решении актуальных задач АПК: сб. научн. тр. Международ. научн.-практ. конф. молод. ученых. СПб.: СПбГАУ, 2017. С. 88–89.
  14. *Соболев В., Соколов М., Родин М.* Литий-тионил-хлоридные источники питания // Компоненты и технологии. 2010. № 7. С. 124–126.
  15. *Витковская С.Е., Шаврина К.Ф.* Влияние различных доз органических и минеральных удобрений на распределение цинка в системе “дерново-подзолистая почва–растения озимой ржи // Агрофизика. 2017. № 3. С. 4–13.
  16. СП 11-102-97 Инженерно-экологические изыскания для строительства. М., 1997. 42 с.
  17. Временный максимально допустимый уровень (МДУ) содержания некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках. Утв. Гл. управл. ветеринарии Госагропрома СССР 07.08.1987 г. М., 1987.

## **Influence of Filtration Waters of the Solid Municipal Waste Landfill on Biomass and the Elemental Composition of Barley Plants**

**S. E. Vitkovskaya<sup>a,b,#</sup> and Yu. O. Shilova<sup>a</sup>**

<sup>a</sup> *Russian State Hydrometeorological University Voronezhskaya ul., 79, Saint-Petersburg 192007, Russia*

<sup>b</sup> *Agrophysics Research Institute Gragdanskiy prospect, 14, Saint-Petersburg 195220, Russia*

<sup>#</sup> *E-mail: s.vitkovskaya@mail.ru*

Under the conditions of a model experiment, the effect of increasing doses of the solid municipal waste landfill filtrate on the biomass of barley plants and the distribution of nitrogen and heavy metals (HM) (Cr, Cd, Li, Pb, Zn) in the soil-plant system were studied. The dependence of plant biomass in the range of filtrate doses of 0–260 ml/kg of soil is represented by curves with a maximum. The N content in the aerial parts of plants linearly increased in the range of tested doses of the filtrate. A tendency to increase the content of HM in the soil was observed. The transition of HM from soil to plants depended on the dose of the filtrate, the degree of cultivation of the soil, and the properties of chemical elements. The content of all tested HM in the roots significantly exceeded the content in the aerial parts of plants.

*Key words:* filtration waters, solid municipal waste landfill, biomass of plants, elemental composition, barley.

УДК 631.423:631.416.8:546.46

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБМЕННОГО МАГНИЯ В ОДНОМОЛЯРНОЙ КСІ-ВЫТЯЖКЕ ИЗ ПОЧВ МОДИФИЦИРОВАННЫМ СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ С ТИТАНОВЫМ ЖЕЛТЫМ

© 2020 г. Ю. М. Логинов<sup>1,\*</sup>, Е. В. Газов<sup>1</sup><sup>1</sup> Общество с ограниченной ответственностью «КИНЖ-АГРО»  
127550 Москва, ул. Прянишникова, 31а, Россия

\*E-mail: loginov.vniia@mail.ru

Поступила в редакцию 05.04.2020 г.

После доработки 24.04.2020 г.

Принята к публикации 10.08.2020 г.

Предложен модифицированный спектрофотометрический метод определения обменного магния с титановым желтым в 1 М КСІ-вытяжке из почв. Суть модификации заключается в том, что для устранения влияния кальция при определении магния в указанной почвенной вытяжке используют сахарозу, которая в щелочной среде связывает кальций, образуя сахараты кальция. Унифицирована технология массовых анализов определения магния для почв, насыщенных и не насыщенных основаниями. Приведены результаты измерений обменного магния в 1 М КСІ-вытяжке из разных типов почв предлагаемым методом и их сравнение с атомно-абсорбционным методом определения.

*Ключевые слова:* магний, химический анализ, почва, почвенная вытяжка, массовый анализ, спектрофотометрия, атомно-абсорбционная спектрометрия.

DOI: 10.31857/S0002188120110071

### ВВЕДЕНИЕ

Магний является одним из важных элементов для нормального развития растений, он играет ведущую роль в фотосинтезе. Его недостаток в почве снижает урожай и качество продукции растениеводства.

Обеспеченность растений магнием в почве можно определить по количеству магния, вытесняемого из почвенно-поглощающего комплекса (ППК) растворами солей минеральных кислот, например, хлоридом калия. Разработаны градации содержания магния в различных типах почв (табл. 1).

Методы определения подвижного (обменно-го) магния в 1 М КСІ-вытяжке из почв даны в ГОСТ 26487-85 [1]. В нем для определения магния изложены 3 метода анализа магния: атомно-абсорбционный с использованием атомно-абсорбционных спектрофотометров, комплексонометрический с использованием титрования пробы трилоном Б и фотометрический метод с использованием спектрофотометров для фотометрирования растворов, окрашенных титановым желтым.

При использовании атомно-абсорбционных спектрофотометров, работающих на воздушно-ацетиленовом или воздушно-пропановом пламени горелки, для устранения влияния химических элементов, мешающих анализу магния, в анализируемый раствор добавляют избыток стронция, который связывает их в труднорастворимые в пламени соединения. Метод позволяет проводить массовые анализы магния в 1 М КСІ-вытяжке из почв и в настоящее время наиболее широко используется при анализе этого элемента. Недостатком метода является дороговизна оборудования и специальное обустройство лабораторного помещения для работы с взрывоопасными газами.

**Таблица 1.** Градации содержания Mg в различных типах почв, мг Mg/кг воздушно-сухой почвы

Уровень содержания Mg	Типы почв		
	супесчаные	суглинистые	глинистые
Низкий	<25	<35	<70
Средний	25–50	35–70	70–120
Высокий	>50	>70	>120

Комплексонометрическое определение кальция и магния, указанное в вышеприведенном ГОСТ 26487-85, позволяет в одной пробе определять сначала кальций, а затем магний. Анализируемую пробу титруют раствором трилона Б с индикатором хрома кислотного темно-синего при рН 12.5–13.0, затем этот же раствор подкисляют, добавляют хлоридно-аммиачный буферный раствор для получения рН  $\approx$  10 и вновь титруют раствором трилона Б. Метод относительно не дорог, но кропотлив и малопроизводителен для массовых анализов магния. Кроме этого, его нельзя использовать в вытяжках из почв с рН < 4.5.

Фотометрическое определение магния, изложенное в ГОСТ 26487-85, предписывает использование титанового желтого, водорастворимого тиазолового красителя, который образует с гидроокисью магния адсорбционное соединение (лак), окрашенный в красный цвет. Интенсивность окраски, зависящей от концентрации магния в растворе, определяют на спектрофотометре, измеряя оптическую плотность пробы. Для устранения влияния мешающих анализу магния ряда элементов в пробу добавляют триэтаноламин. Для восстановления соединений магния в растворе до гидроокиси добавляют гидроксил-амин гидрохлорид. Влияние кальция маскируют добавлением в градуировочные и анализируемые растворы кальция. Метод относительно не сложен, доступен по цене используемого оборудования (колориметры, спектрофотометры) и наиболее производителен при проведении анализа указанного элемента.

Цель работы – исследование фотометрического метода анализа магния в 1 М КСl-вытяжке из почв с использованием титанового желтого и разработка модификации данного метода с улучшенными параметрами и характеристиками.

### ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ И ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ

Определению магния фотометрическим методом в различных сплавах металлов, породах и рудах посвящено большое количество исследований и публикаций. Среди основных индикаторов, используемых в этих исследованиях, можно назвать хинализарин [2], феназо [3], магнезон ИРЕА [4] и титановый желтый [5, 6]. Каждый из них в зависимости от анализируемого объекта и методики анализа имеет свои достоинства и недостатки.

При использовании фотометрического определения магния в 1 М КСl-вытяжке из почв с титановым желтым необходимо учитывать, что та-

кие элементы, как алюминий, железо, марганец и титан образуют с указанным индикатором окрашенные комплексы, которые могут вносить ошибку при определении количества магния в почве. В большинстве случаев уменьшить их влияние можно добавлением триэтаноламина при относительно невысоких концентрациях указанных элементов в растворе. Кроме указанных элементов, определению магния при использовании предлагаемого метода мешают кадмий, кобальт, медь, мышьяк, никель, олово, ртуть, свинец и цинк. Однако в большинстве случаев количество этих элементов в вытяжке из пахотных горизонтов почв мало, и ошибка измерения концентрации магния в их присутствии входит в общую ошибку измерения.

В публикациях об исследовании влияния кальция на измерение содержания магния указано, что сам кальций не реагирует с титановым желтым и не изменяет его окраски. Однако при концентрации кальция до определенного предела он в присутствии магния усиливает окраску раствора. Этот эффект предлагали устранять добавлением кальция в анализируемый раствор в количестве, при котором возникает максимальная окраска раствора. Однако в случае присутствия в растворе фосфатов они могут реагировать с ионами кальция, образуя фосфорнокислый кальций  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ . Это коллоидное соединение при большом количестве фосфатов выпадет в осадок с помутнением раствора [7]. Указанный прием добавления кальция в анализируемый раствор с магнием дается в ГОСТ 26487-85 [1].

Для стабилизации окрашенного коллоидного раствора магния используют желатин, крахмал, полиакрилаты, гуммиарабик, глицерин и поливиниловый спирт. Последний используют в вышеприведенном ГОСТ 26487-85 и экспериментах, изложенных ниже.

Окрашенное соединение магния с титановым желтым в коллоидном растворе имеет максимум поглощения при 530 нм. Сам щелочной раствор (рН 12.0) титанового желтого имеет максимум поглощения при спектральной длине волны 400 нм. Поливиниловый спирт, добавляемый в анализируемую почвенную вытяжку, имеет максимум поглощения при 490 нм. Исходя из этих величин оптических плотностей, измерение концентрации магния в растворе целесообразней проводить на спектральной длине волны 540 нм. Это уменьшает влияние поливинилового спирта на результаты измерения магния. При использовании других антикоагулянтов необходимо тоже учитывать их спектральные характеристики.

**Таблица 2.** Исходные результаты измерения концентрации магния в градуировочных растворах (оптическая плотность)

Раствор, №	$C_{(1/2Mg^{2+})}$ ммоль/дм <sup>3</sup>	Оптическая плотность, $\lambda$ 540 нм		
		без кальция	с кальцием	разница
1	0.0	0.672	0.522	0.150
2	0.4	0.731	0.574	0.157
3	0.8	0.792	0.649	0.143
4	1.6	0.919	0.774	0.145
5	2.4	1.037	0.896	0.141
6	3.2	1.135	1.024	0.111
7	4.0	1.228	1.151	0.077
8	4.8	1.306	1.279	0.027
9	0.0	0.661	0.523	0.138
10	0.0	0.695	0.500	0.195
11	Дистиллированная вода в начале измерений	0.000	0.000	0.000
12	Дистиллированная вода в конце измерений	0.000	0.000	0.000
13	Среднее нулевых концентраций Mg (растворы № 1, 9, 10)	0.676	0.515	0.161

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В экспериментах, излагаемых в данной публикации, исследовали влияние кальция на определение магния в 1 М КСl-вытяжке из почв с использованием индикатора титанового желтого фирмы “Мерк”.

Для спектрофотометрирования растворов использовали спектрофотометр КФК 3-01 (ЗОМЗ) с проточной гидравлической системой производства ООО “КИНЖ-АГРО”, включающей Z-образную кювету с базой 15 мм и неприжимной перистальтический насос с высокой скоростью вращения ([9], стр. 61–68). Измерения оптической плотности проводили при спектральной длине волны  $\lambda$  540 нм. Исследовали влияние кальция на оптическую плотность при добавлении его в градуировочные растворы для определения магния в почвах с ненасыщенными основаниями.

По ГОСТ 26487-85 в 1 дм<sup>3</sup> окрашивающего реактива содержится 102.2 мг кальция. На объем 2 см<sup>3</sup>, отобранной для анализа пробы, приходится 4.09 мг кальция.

В табл. 2 приведены результаты измерения оптической плотности градуировочных растворов для определения магния в почвах с ненасыщенными основаниями с добавлением и без добавления кальция в окрашивающий раствор. За базовую

величину оптической плотности принимали оптическую плотность дистиллированной воды.

Результаты показали, что добавление кальция в окрашивающий реактив для определения магния приводит к уменьшению оптической плотности раствора. Можно предположить, что в этом случае кальций реагирует с титановым желтым, блокируя реакцию красителя с магнием. Этот эффект отмечен авторами и при анализе магния с добавлением кальция и для других спектральных длин волн.

Результаты измерений оптической плотности растворов градуировочной шкалы магния с учетом нулевой оптической плотности дистиллированной воды и усредненных нулевых концентраций магния представлены в табл. 3. Показано, что несмотря на уменьшение оптической плотности растворов магния при добавлении кальция (табл. 2) оптическая плотность с учетом нулевой концентрации магния больше во всех растворах с добавленным кальцием по сравнению с растворами без кальция.

Не вдаваясь в механизм химической реакции кальция с титановым желтым в щелочной среде, можно сделать следующее заключение. Если анализировать количество обменного магния в почвах, ненасыщенных основаниями, и использовать для этого окрашивающий реактив с добавленным кальцием, то результаты измерения магния в ряде случаев могут оказаться занижен-

**Таблица 3.** Результаты измерения оптической плотности растворов градуировочной шкалы с учетом результатов измерения оптической плотности нулевых концентраций магния в 1 М КСl-вытяжке

№ п/п	Концентрация магния $C_{(1/2Mg^{2+})}$ ммоль/дм <sup>3</sup>	Оптическая плотность растворов, $\lambda$ 540 нм		
		без кальция	с кальцием	разница
1	0.0	0.000	0.000	0.000
2	0.4	0.055	0.059	0.004
3	0.8	0.116	0.134	0.018
4	1.6	0.243	0.259	0.016
5	2.4	0.361	0.381	0.020
6	3.2	0.459	0.509	0.050
7	4.0	0.552	0.636	0.084
8	4.8	0.630	0.764	0.134

**Таблица 4.** Результаты измерения оптической плотности магния в 2-х градуировочных растворах с использованием сахарозы в щелочном реактиве

№ п/п	$C_{(1/2Mg^{2+})}$ ммоль/дм <sup>3</sup>	Оптическая плотность, $\lambda$ 540 нм	
		без сахарозы	с сахарозой
1	0	0.716	0.714
2	4.8	1.483	1.484
3	Дистиллированная вода в начале измерений	0.000	0.000
4		0.000	-0.001
5	Результаты измерения с учетом нулевой пробы	0.767	0.770

ными на 10–20% от его реального содержания в пробе. Это будет проявляться при анализе магния в почвах с небольшим содержанием обменного кальция.

В литературе об анализе содержания магния в породах и рудах [6] упоминается, что кальций при анализе магния можно связывать сахарозой в щелочной среде. Прием связывания сахарозы ионами кальция в известковых растворах с последующим осаждением и отделением кальция в виде карбоната используют при производстве сахара в промышленных масштабах. Исследованию состава и строения сахаратов и реакции их с ионами кальция с использованием методов компьютерной химии посвящена публикация [6]. Авторы указывали, что в растворах с pH > 12.0 может образоваться растворимый прочный сахаратный

комплекс с кальцием с соотношением Са : сахара = 1 : 4. Исходя из этого, авторы данной публикации провели исследование возможности использования сахарозы для устранения влияния кальция при спектрофотометрическом определении магния в 1 М КСl-вытяжке из почв.

Прежде всего было оценено влияние сахарозы на оптическую плотность, добавленную вместе с гидроокисью натрия в пробу почвенной вытяжки после окрашивающего реактива, не содержащего кальция (табл. 4). Результаты эксперимента показали, что сахара не влияла на оптическую плотность при спектрофотометрическом измерении концентрации магния в 1 М растворе КСl.

В табл. 5 приведены результаты измерения магния в образцах подзолистой почвы из коллекции лаборатории С.Г. Самохвалова Центрального института агрохимического обслуживания (ЦИ-НАО), ныне – Всероссийского НИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова. Каждый почвенный образец анализировали в трехкратной повторности в 3-х отобранных пробах. Эксперимент включал следующие варианты: 1 – анализ магния с окрашивающим реактивом без кальция и без сахарозы, 2 – анализ магния с окрашивающим реактивом с сахарозой, но без кальция, 3 – анализ магния с окрашивающим реактивом с кальцием, но без сахарозы. Помимо спектрофотометрических измерений эти же почвенные вытяжки анализировали на атомно-абсорбционном спектрофотометре “Shimadzu” AA-7000 при использовании воздушно-ацетиленового пламени по ГОСТ 26487-85. Для устранения влияния мешающих элементов в почвенные фильтраты добавляли стронций. В 2-х измерениях количества магния атомно-абсорбционным методом, представленных в табл. 5, погрешность определения была довольно высока, но, тем не менее, она приведена в указанной таблице.

Результаты определения магния показали, что в образцах № 2 и № 3 определили меньшие количества магния в почвенной вытяжке при добавлении в окрашивающий реактив кальция по сравнению с результатом в варианте с добавлением в окрашивающий реактив сахарозы. В данном и в последующих экспериментах использовали градуировочные растворы магния, указанные в табл. 2 и 3, как для почв, не насыщенных основаниями, так и для почв, насыщенных основаниями, вне зависимости от уровня насыщенности почвы основаниями. Для почв, насыщенных основаниями, с высоким содержанием обменного магния почвенные вытяжки разводили 1 М КСl в 2 раза или в 10 раз (1 : 1 или 1 : 9 по объему). Полученные результаты с использованием указанной градуи-

**Таблица 5.** Измерение концентрации магния ( $C_{(1/2Mg^{2+})}$  ммоль/дм<sup>3</sup>) с разными добавками в основной окрашивающий реактив с титановым желтым

№ образца	Окрашивающий реактив без кальция и без сахарозы			Окрашивающий реактив с сахарозой без кальция			Окрашивающий реактив с кальцием без сахарозы			Определение магния атомно-абсорбционным методом		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	1.41	0.04	3.1	1.33	0.03	2.0	1.36	0.02	1.7	1.28	$8,7 \times 10^{-4}$	0.07
2	2.68	0.18	6.8	2.58	0.23	9.0	2.31	0.11	4.9	2.84	1.30	45.8
3	4.62	0.20	4.4	4.17	0.01	0.17	3.63	0.07	1.9	4.95	1.40	28.3

Примечания. 1. В графе 1 – среднее, 2 – квадратичное отклонение, 3 – коэффициент вариации ( $\sigma$ , %). То же в табл. 6. 2. Характеристика почвенных образцов: 1 – Республика Беларусь, Гродненская обл., Новогрудский р-н, колхоз Авангард, почва дерново-подзолистый суглинок, pH 4.55; 2 – Республика Беларусь, Витебская обл., дерново-подзолистая легкосуглинистая почва; 3 – Московская обл., хозяйство “Белая дача”, поле 15, открытый грунт, дерново-подзолистая почва.

**Таблица 6.** Измерение концентрации обменного магния ( $C_{(1/2Mg^{2+})}$  ммоль/дм<sup>3</sup>) в разных типах почв по модифицированной методике спектрофотометрическим и атомно-абсорбционным методами

№ образца	Окрашивающий реактив без кальция и без сахарозы			Окрашивающий реактив с сахарозой без кальция			Определение магния атомно-абсорбционным методом		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
4	5.65	1.1	19.4	5.12	$3,2 \times 10^{-3}$	0.06	5.02	$7,2 \times 10^{-3}$	0.14
6	18.7	0.62	3.3	14.4	2.0	13.9	13.9	0.32	23.0
7	30.5	7.22	23.7	27.4	2.24	8.2	22.7	2.01	8.85
8	22.0	1.31	6.0	22.5	–	–	20.1	8.64	43.0
9	13.0	7.33	55.5	11.85	0.27	22.8	10.7	0.027	0.25

Примечание. Характеристика почвенных образцов в табл. 6: 4 – Московская обл., опытное хозяйство ВИУА “Барыбино”, дерново-подзолистая почва; 6 – Нижегородская обл., Вадский р-н, хозяйство “Родина”, поле 1, овес, чернозем средне-суглинистый, подпахотный горизонт; 7 – Челябинская обл., чернозем среднетяжелый выщелоченный тяжелосуглинистый; 8 – Крым, Первомайский р-н, хозяйство “Россия”, чернозем обыкновенный; 9 – Таджикская Республика, Кулябская ЗАЛ, колхоз им. Томина Восейского р-на, серозём обыкновенный староорошаемый, лёгкий суглинок (супесь), почвообразующие породы – алювиально-супесчаные отложения. Отбор проб проводили на опытной делянке в контроле без удобрений.

ровочной шкалы умножали на коэффициенты 2 или 10.

Последовательность подготовки почвенных вытяжек к спектрофотометрическим измерениям при массовых анализах обменного магния с использованием поточно-декадной технологии в предлагаемой методике, была следующей: 2 см<sup>3</sup> целого или разведенного фильтрата переносили из емкостей кассеты КСМ [9, стр. 188] в стеклянные емкости кассеты КТМ [10]. Добавляли 5 см<sup>3</sup> гидроксида натрия с сахарозой, перемешивали, дозировали 40 см<sup>3</sup> окрашивающего реактива и вновь перемешивали. Спектрофотометрирование выполняли через 15 мин после стабилизации окраски раствора.

В табл. 6 приведены результаты определения обменного магния в различных типах почв по

предлагаемой модифицированной методике и сравнение их с результатами, полученными атомно-абсорбционным методом. Результаты эксперимента показали, что добавление сахарозы в реактивы для определения обменного магния спектрофотометрическим методом в 1 М КСl-вытяжке из почв с учетом погрешности измерений достаточно близки к результатам измерений, полученных атомно-абсорбционным методом.

Ниже кратко изложено приготовление реактивов и проведение анализов модифицированным спектрофотометрическим методом с титановым желтым для определения обменного магния в 1 М КСl-вытяжке из почв.

#### 1. Приготовление реактивов.

1.1. Раствор 1 М КСl для получения почвенной вытяжки.

Готовится по ГОСТ 26487-85. Реактив хлористый калий квалификации не ниже ч.д.а. взвешивают  $75 \pm 0.1$  г на объем  $1 \text{ дм}^3$ , растворяют в дистиллированной воде и контролируют рН раствора. Важно, чтобы рН раствора была в пределах 5.6–6.0. В случае необходимости раствор подкисляют разведенной соляной кислотой или подщелачивают разведенным раствором гидроокиси калия.

1.2. Приготовление 2 М раствора гидроокиси натрия с сахарозой.

В объеме  $1 \text{ дм}^3$  последовательно растворяют в дистиллированной воде  $80 \pm 0.1$  г гидроокиси натрия и после охлаждения раствора добавляют  $2.5 \pm 0.01$  г сахарозы. Затем доводят воду до метки и перемешивают.

1.3. Приготовление исходных растворов для рабочего окрашивающего реактива при определении магния.

Раствор № 1. Приготовление раствора титанового желтого.

Реактив надо использовать от надежных производителей и поставщиков. Авторы использовали реактив от фирмы “Merck”. Навеску  $2.5 \pm 0.01$  г титанового желтого растворяли в  $1 \text{ дм}^3$  дистиллированной воды и хранили в стеклянной таре из темного стекла в холодильнике при 4–5°C. Испытали активность указанного реактива и выяснили, что он сохраняет активность в течение 1 мес.

Раствор № 2. Приготовление раствора поливинилового спирта массовой концентрации  $20 \text{ г/дм}^3$ . Навеску поливинилового спирта помещали в термостойкую колбу, добавляли  $1 \text{ дм}^3$  дистиллированной воды, закрывали пробкой с клапаном Бунзена или с любым другим клапаном, обеспечивающим отсутствие контакта наружного воздуха с содержимым колбы. Содержимое осторожно нагревали при постоянном помешивании на закрытой электроплитке или водяной бане до полного растворения содержимого. Хранили в герметично закрытой таре в холодильнике.

Раствор № 3. Приготовление раствора гидроксиламина гидрохлорида. Навеску  $50 \pm 0.1$  г гидроксиламина гидрохлорида растворяли в  $1 \text{ дм}^3$  дистиллированной воды. Реактив ядовит. Все операции проводили в вытяжном шкафу с индивидуальными средствами защиты (резиновые перчатки, респиратор, очки, халат). Хранили в герметично закрытой темной склянке в вытяжном шкафу без попадания солнечного света и близости нагревательных приборов.

Раствор № 4. Приготовление раствора триэталонамина (ТЭА). Триэталонамин представляет вязкую маслянистую жидкость. Его предвари-

тельно разбавляли дистиллированной водой (1 объем ТЭА : 4 объема  $\text{H}_2\text{O}$ ). Цилиндром отмеряли  $200 \text{ см}^3$  разбавленного триэталонамина и переносили в мерную колбу вместимостью  $1 \text{ дм}^3$ , частично заполненную дистиллированной водой. Содержимое предварительно перемешивали, добавляли до метки дистиллированную воду и вновь тщательно перемешивали. Хранили в герметично закрытой склянке при низкой температуре.

1.4. Приготовление рабочего окрашивающего реактива для определения обменного магния в 1М КСl вытяжке и почв. В мерную колбу вместимостью  $1 \text{ дм}^3$  последовательно добавляли с перемешиванием содержимого после каждого добавления:  $\approx 500 \text{ см}^3$  дистиллированной воды,  $12 \text{ см}^3$  раствора гидроксиламина гидрохлорида (раствор № 3),  $25 \text{ см}^3$  триэталонамина (раствор № 4),  $5 \text{ см}^3$  раствора поливинилового спирта (раствор № 2), и  $10 \text{ см}^3$  раствора титанового желтого (раствор № 1). Добавляли дистиллированную воду до метки и тщательно перемешивали. Реактив хранили в темной стеклянной посуде в холодильнике.

1.5. Приготовление исходного раствора магния концентрации  $C_{(1/2\text{Mg}^{2+})} = 0.05 \text{ моль/дм}^3$  для градуировочной шкалы.

Взвешивали  $1.008 \pm 0.001$  г окиси магния, предварительно прокаленной при температуре  $500^\circ\text{C}$  до постоянной массы. Навеску переносили через воронку в мерную колбу вместимостью  $1 \text{ дм}^3$ , смывая остатки дистиллированной водой. Добавляли в колбу  $20 \text{ см}^3$  раствора соляной кислоты с массовой долей 25%. После растворения навески приливали  $\approx 500 \text{ см}^3$  дистиллированной воды и  $75 \pm 0.1$  г хлористого калия, который вносили через воронку, смывая дистиллированной водой. Доводили до метки объем в колбе дистиллированной водой и тщательно перемешивали. Раствор хранили в герметично закрытой склянке 1 год.

1.6. Приготовление растворов градуировочной шкалы для анализа обменного магния в 1 М КСl-вытяжке почв.

В мерные колбы вместимостью  $250 \text{ см}^3$  помещали указанные в табл. 7 объемы раствора, приготовленного по п. 1.5. В колбы доливали до метки раствор хлористого калия концентрации  $1 \text{ моль/дм}^3$  и тщательно перемешивали.

В приведенных результатах анализа магния по предлагаемой методике средний коэффициент вариации результатов измерений для почв, не насыщенных основаниями, не превысил 4% (табл. 5), для почв, насыщенных основаниями, он не превысил 12% (табл. 6).

**Таблица 7.** Концентрации магния в градуировочных растворах

Концентрация магния	Номер градуировочного раствора							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Объем раствора, приготовленного по п. 1.5	0	2	4	8	12	16	20	24
$C_{(1/2Mg^{2+})}$ ммоль/дм <sup>3</sup>	0	0.4	0.8	1.6	2.4	3.2	4.0	4.8
$C_{(Mg^{2+})}$ мг/дм <sup>3</sup>	0	4.9	9.7	19.4	29.2	38.9	48.6	58.3
$C_{(1/2Mg^{2+})}$ ммоль/100 г почвы	0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2
$C_{(Mg^{2+})}$ мг/дм <sup>3</sup> вытяжки	0	4.9	9.7	19.4	29.2	38.9	48.6	58.3
$C_{(Mg^{2+})}$ мг/кг воздушно-сухой почвы	0	12.3	24.3	48.5	73.0	97.3	121.5	145.8

### ТЕХНОЛОГИЯ ПРОВЕДЕНИЯ АНАЛИЗОВ ОБМЕННОГО МАГНИЯ В 1М КСІ ВЫТЯЖКЕ ИЗ ПОЧВ МОДИФИЦИРОВАННЫМ СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ С ТИТАНОВЫМ ЖЕЛТЫМ

Предлагаемый метод определения магния позволяет проводить как единичные анализы с использованием обычной лабораторной посуды, так и массовые анализы с применением поточно-декадной технологии на специализированном оборудовании с производительностью от 200 до 400 и больше анализов в смену [9].

Общая схема анализа обменного магния в почвенной вытяжке включает следующее. Вытяжку из почв, ненасыщенных основаниями, сразу анализируют или разбавляют в 2 раза экстрагентом 1 М КСІ в зависимости от количества обменного магния в пробе. Вытяжку из почв, насыщенных основаниями, предварительно разбавляют в 10 раз экстрагентом 1 М КСІ. Отбирают 2 см<sup>3</sup> вытяжки, переносят в другую емкость, добавляют 5 см<sup>3</sup> щелочи с сахарозой, перемешивают, добавляют 40 см<sup>3</sup> окрашивающего экстрагента, перемешивают, и через 15 мин фотометрируют при спектральной длине волны 540 нм.

Ниже изложен один из вариантов поточно-декадной технологии анализа магния с использованием оборудования, разработанного специалистами ООО «КИНЖ-АГРО» и описанного в предыдущих публикациях [11, 12].

Предлагается следующая последовательность технологических операций при необходимости массовых анализов обменного магния в почвах. Тележки ТТП, загруженные размолотой воздушно-сухой почвой в пластиковых коробках, отобранных на складе, поступают на первую позицию технологического потока. Эта

позиция включает автоматизированный дозатор ДЖ-10М, связанный с весовым комплексом (рис. 1). Дозатор обеспечивает автоматическое добавление объема экстрагента, соответствующего массе навески, помещенной в емкость технологической кассеты КБМ, с отношением почва : экстрагент = 1 : 2.5. Для отбора пробы почвы из коробок при взвешивании используют мерку с регулируемым объемом, обеспечивающим массу пробы ≈ 30 г.

Вместо дозатора ДЖ-10М с весовым комплексом можно использовать весы ВМ 313М-П или аналогичные для взвешивания 30 г пробы почвы и дозатор Клычникова для дозирования 75 см<sup>3</sup> экстрагента с погрешностью дозирования 1%. В комплект дозатора должна входить бутылка Вульфа вместимостью 10 или 20 дм<sup>3</sup>.

Далее содержимое кассет КБМ закрывают крышкой и взбалтывают в течение 1 мин на взбалтывателе ВВ-1 (позиция 2).

Позиция 3 обеспечивает отстаивание содержимого кассет КБМ в тележках ТТП в течение 21 ч при температуре 19 ± 2°С. Допускается вместо отстаивания суспензии содержимое кассет КБМ взбалтывать в течение 1 ч.

После отстаивания почвенной суспензии содержимое кассет КБМ вновь взбалтывают и фильтруют на блоках фильтрования БФМ-2 в технологические кассеты КСМ (позиция 4). Фильтры рекомендуется предварительно промыть раствором 0.1 М НСІ и отмыть дистиллированной водой. Отбор 2 см<sup>3</sup> фильтрата из кассет КСМ и перенос в технологические кассеты КТМ осуществляется с помощью дозатора-отборника ДОАЖ-10 (позиция 5). Далее в кассеты КТМ с содержимым дозируют 5 см<sup>3</sup> гидроокиси натрия с сахарозой с помощью 10-позиционного дозатора ДЖ-10 или однопозиционного поршневого дозатора для дозирования щелочей (по-



**Рис. 1.** Дозатор ДЖ-10М с кассетами КБМ, компьютером с программой управления комплексом и весами. Внизу – емкость для забора экстрагента (раствор 1 М КСl).



**Рис. 2.** Фотометрический комплекс, включающий фотометр КФК 3-1-01 с не прижимным перистальтическим насосом, компьютером с программой для обработки аналитических результатов, печатающим устройством и кассетой КТМ.

зиция б). Добавление в кассеты КТМ окрашивающего реактива в объеме 40 см<sup>3</sup> осуществляется вторым 10-позиционным дозатором ДЖ-10 или вторым однопозиционным поршневым бутылочным дозатором (позиция 7). Перемешивание содержимого кассеты КТМ после добавления красителя осуществляется 10-позиционным барботе-

ром с компрессором производства ООО “КИНЖ-АГРО” (позиция 8). Через 15 мин после окраски почвенной вытяжки осуществляют фотометрирование растворов на фотометре КФК-3-01-ЗОМЗ” с проточной системой и компьютерной обработкой данных по программе, разработанной специалистами ООО “КИНЖ-АГРО” (позиция 9) (рис. 2).

На позиции 10 осуществляется механизированная мойка всех технологических кассет.

### ВЫВОДЫ

1. Предложен модифицированный метод определения обменного магния в 1 М КСl-вытяжке из почв. Показано влияние кальция на оптическую плотность при использовании титанового желтого в анализах магния. Для устранения влияния кальция использована сахароза, которая в щелочной среде реагирует с кальцием, связывая его в виде сахаратов кальция.

2. Предложена единая шкала градуировочных растворов при анализе магния в почвах, насыщенных и ненасыщенных основаниями.

3. Описана поточно-декадная технология для массовых анализов обменного магния в 1 М КСl-вытяжке из почв.

Авторы выражают благодарность сотруднику ООО «КИНЖ-АГРО» С.М. Кривенкову за подготовку рисунков к статье и наладке аналитического оборудования для выполнения экспериментов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Определение обменного кальция и обменного (подвижного) магния методами ЦИНАО. Почвы ГОСТ 26487-85. Переиздание. Сентябрь 1987 г.
2. Сендел Е.Б. Колориметрическое определение следов металлов. Перевод с англ. / Под ред Комаровского А.С. М.—Л.: Гос. научн.-тех. изд-во хим. литры, 1964. 902 с.
3. Сплавы алюминиевые литейные и деформируемые. Методы определения магния. ГОСТ 11739.11-82 (разд. 5).
4. Методы получения химических реактивов и препаратов. Метод. указ. (ИРЕА). Вып. 24. М.: НИИТЭХИМ, 1972. 116 с.
5. Буданова Л.М., Володарская Р.С., Канаев Н.А. Анализ алюминиевых и магниевых сплавов. М.: Металлургия, 1966. 360 с.
6. Фотометрическое определение магния с титановым желтым в породах и рудах. Хим. методы. Инструкция № 145-Х. Всесоюзный научно-исследовательский институт минерального сырья (ВИМС). М., 1980.
7. Большая энциклопедия нефти и газа. Электр. библиотека "Нефть-Газ". Ссылка 41.
8. Бобровник Л.Д., Логвин В.М., Выговский В.Ю. Сахараты кальция: состав и строение // Сахар. 2009. № 10. С. 56–60.
9. Логинов Ю.М., Стрельцов А.Н. Автоматизация аналитических работ и приборное обеспечение мониторинга плодородия почв и качества продукции растениеводства. М.: Агробизнесцентр, 2010. 323 с.
10. Логинов Ю.М. Новые способ и методика прямого определения подвижных форм фосфора и калия в углеаммонийной вытяжке из карбонатных почв // Плодородие. 2012. № 4. С. 45–47.
11. Логинов Ю.М., Кузнецов В.В. Новый метод количественного определения сульфат-ионов в водных средах и водных вытяжках из почв и аналитическое оборудование для его реализации // Агрохимия. 2019. № 10. С. 85–96.
12. Логинов Ю.М. Модернизированный метод определения фосфора и калия в углеаммонийной вытяжке из почв с использованием технологии массовых анализов // Агрохимия. 2020. № 1. С. 81–93.

## Determination of Exchange Magnesium in Unipolar KCl Extract from Soil by Modified Spectrophotometric Method with Titanium Yellow

Yu. M. Loginov<sup>a, #</sup> and E. V. Gazov<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Limited liability company "KINZH-AGRO"  
ul. Pryanishnikova 31a, Moscow 127550, Russia

<sup>#</sup>E-mail: loginov.vniia@mail.ru

A modified spectrophotometric method for determining the exchange of magnesium with titanium yellow in a single molar KCl extract from soils is proposed. The essence of the modification is that to eliminate the influence of calcium when determining magnesium in the specified soil extract, sucrose is used, which binds calcium in an alkaline environment, forming calcium saccharates. Unified technology for mass analysis of magnesium determination for soils with saturated and unsaturated bases. The results of measurements of exchange magnesium in 1 M KCl extract from different types of soils, proposed by the method, and their comparison with the atomic absorption method of determination are presented.

*Key words:* magnesium, chemical analysis, soil, soil extraction, mass analysis, spectrophotometry, atomic absorption spectrometry.

УДК 632.1:551.58

## РЕАКЦИЯ СОРНОГО КОМПОНЕНТА АГРОФИТОЦЕНОЗОВ НА ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА

© 2020 г. Е. И. Кошкин<sup>1,\*</sup>, И. В. Андреева<sup>1</sup>, Г. Г. Гусейнов<sup>2</sup>,  
К. Г. Гусейнов<sup>3</sup>, Ф. С.-У. Джалилов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева  
127550 Москва, Тимирязевская ул., 49, Россия

<sup>2</sup> Группа компаний “НН group”  
AZ1102 Баку, шоссе Хырдалан-Бинагади 34Н, Азербайджанская Республика

<sup>3</sup> Институт защиты растений и технических культур  
AZ1100 Гянджа, ул. Азиза Алиева, 91, Азербайджанская Республика

\*E-mail: ekoshkin@rgau-msha.ru

Поступила в редакцию 22.04.2020 г.

После доработки 18.05.2020 г.

Принята к публикации 10.08.2020 г.

В обзоре рассмотрена реакция разных видов (жизненных форм) сорняков на повышение концентрации CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, доз УФ-В в разном сочетании на фоне возрастающей температуры, варьирующих влагообеспеченности и агрофона. Проанализированы эффекты указанных факторов на конкурентоспособность культурных и сорных растений в агрофитоценозе и возможные изменения использования гербицидов в целях защиты посевов от сорняков.

*Ключевые слова:* сорняки, конкуренция с культурой, защита посевов от сорняков, гербициды, изменения климата.

**DOI:** 10.31857/S000218812011006X

### ВВЕДЕНИЕ

Глобальные изменения климата, основной причиной которых называют повышение концентрации парниковых газов (CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, NO, N<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub> и др.) в атмосфере, оказывают все более заметное воздействие на биосферу, трансформируя экосистемы и меняя привычный уклад жизни людей. По расчетным оценкам, повышение уровня приземной температуры воздуха достигнет величины в 1.5°C по сравнению с доиндустриальным уровнем уже в период между 2030 и 2052 гг. при сохранении текущих темпов роста на 0.2°C за десятилетие [1]. Основным итогом изменений климата и экономической глобализации в мире – повышенная непредсказуемость пространственно-временной взаимосвязи погоды, применяемой агротехники культур и вредных организмов в агрофитоценозе. В свою очередь, это может создать неопределенность в разработке мер и технологий их контроля.

Влияние факторов, ответственных за глобальные климатические изменения, на сельскохозяйственные культуры достаточно хорошо изучено [2]. Установлен широкий диапазон возможной реакции видов культур на повышение температуры, изменение количества осадков, увеличение

концентрации CO<sub>2</sub> в воздухе. В целом для регионов умеренного климата прогнозируется скорее позитивный эффект происходящих климатических изменений на урожайность полевых культур и скорость прохождения фаз развития, однако на этом фоне повышается их чувствительность к вредным организмам, что зачастую не учитывают в прогнозных оценках продуктивности агросистем.

Хотя системы защиты растений сыграли важную роль в увеличении производства сельскохозяйственной продукции за последние 50 лет [3], это было достигнуто зачастую благодаря избыточному использованию пестицидов, что противоречит последним нормативным актам, принятым, в частности, в ЕС по снижению пестицидной нагрузки на посевы [4]. Вместе с тем, увеличение влияния антропогенных факторов, в том числе глобальное перемещение людей и товаров (продуктов) растительного происхождения, повышает риски проникновения экзотических вредных организмов в новые регионы, которые ранее были непригодны для произрастания [5]. В результате в некоторых регионах, избыточно влажных, или, напротив, засушливых и жарких, это может существенно снизить урожайность и

вынудит пересмотреть практикуемые мероприятия по защите посевов в силу их неэффективности [5]. Кроме того, последнее может заметно увеличить концентрацию  $\text{CO}_2$  в воздухе из-за резкого снижения фотосинтеза и, соответственно, поглощения  $\text{CO}_2$  агрофитоценозом.

Имеющиеся сегодня модели изменения климата часто не учитывают его возможные эффекты на динамику и видовой состав сорного ценоза в посевах полевых культур. Это обусловлено отсутствием результатов длительных наблюдений или эмпирических подходов для их включения в указанные модели, что снижает точность прогнозов [6]. Цель работы – оценить реакцию разных видов (жизненных форм) сорняков на повышение концентрации  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_3$ , доз УФ-В в разном сочетании на фоне возрастающей температуры, варьирующих влагообеспеченности и агрофона и проанализировать эффекты указанных факторов на конкурентоспособность культурных и сорных растений в агрофитоценозе и возможные изменения использования гербицидов в целях защиты посевов от сорняков.

## СОРНЫЕ РАСТЕНИЯ В АГРОФИТОЦЕНОЗАХ

В глобальном смысле сорные растения вызывают наибольшие потери урожая (34%) в сравнении с вредителями (18%) и болезнями (16%) [3]. В США потери урожая только кукурузы изменялись от 10 до 83%, а в восточной Канаде за период с 2007 по 2013 г. они составили в среднем 51% [7]. Средние потери урожая зерновых колосовых культур от сорняков в Российской Федерации варьируют в диапазоне 15–22, пропашных культур – 35–45 и овощных – до 70% [8]. На сельскохозяйственных угодьях Центрального федерального округа РФ встречается более 35 видов сорных растений из более чем 20 ботанических семейств, при этом отмечен все возрастающий уровень встречаемости на полях злостных, трудно искореняемых видов (до 30% пула сорняков) при их общем количественном увеличении (до 250 шт./м<sup>2</sup> двудольных, в том числе до 40 шт./м<sup>2</sup> корнеотпрысковых). Причиной такого положения на фоне изменения климата может являться грубое нарушение агротехники, включая отход от принятых севооборотов и систем обработки почвы, а также снижение числа всех мероприятий по борьбе с сорняками. В Сибири известны более 300 видов сорных растений, из них распространены 67 видов, в том числе 37 наиболее вредоносных [9]. Сорные растения, как и теплолюбивые культуры, по мере потепления климата расширяют ареал своего распространения в северные широ-

ты, где могут служить в качестве растения-хозяина для новых вредителей и болезней.

Конкурентная способность культуры в посевах с сорной растительностью определяется прежде всего физиолого-биохимическими особенностями культурного и сорного растения (вид/форма, скорость начального роста, в том числе корней, фаза развития или этап органогенеза, тип фотосинтетического метаболизма углерода ( $\text{C}_3$ - и  $\text{C}_4$ -виды), аллелопатические взаимодействия, устойчивость к стрессорам и др.) [10, 11]. Заметное влияние на этот показатель оказывают почвенные (влажность, pH, плотность и способы обработки почвы, агрофон) и погодные условия, агротехника культуры (густота посева, ширина междурядий, севооборот), а также количество, соотношение и даже пространственное распределение отдельных сорных видов в агрофитоценозе. Что касается эффективности использования ресурсов (воды, солнечной радиации, элементов питания) у видов с одним и тем же циклом фотосинтетического метаболизма углерода ( $\text{C}_3$  или  $\text{C}_4$ ), она в силу большей устойчивости к стрессорам и пластичности преимущественно выше у сорных видов, что зачастую, хотя и не всегда, может определять их более высокую в сравнении с культурой конкурентоспособность в посевах.

Экстремальные климатические явления, такие как засухи, наводнения, ураганы, частота возникновения которых, как ожидается, в условиях климатических изменений будет возрастать, также могут усилить инвазию сорных растений, в том числе по причине ослабления биотической резистентности аборигенных природных видов.

Пристального внимания заслуживает конкуренция культурных и сорных растений в агрофитоценозе при повышенной концентрации  $\text{CO}_2$ . При этом нетто-фотосинтез, накопление биомассы и продуктивность  $\text{C}_3$ -культур увеличивается больше, чем  $\text{C}_4$ -видов [2]. Среди 15-ти наиболее важных полевых культур, за исключением кукурузы, сорго, сахарного тростника, 12 относятся к растениям с  $\text{C}_3$ -циклом. С другой стороны, 14 из 18 наиболее злостных сорняков в мире представлено  $\text{C}_4$ -видами. Среди них свинорой, сыть округлая, гумай, куриное просо, шетинник зеленый, сорго алеппское, ширица запрокинутая, ежовник обыкновенный, росичка гребневидная и др. [12]. В то же время 19 из 38 типичных сорняков в посевах кукурузы ( $\text{C}_4$ -вида) имеют  $\text{C}_3$ -цикл метаболизма углерода. Анализ показывает, что в посевах  $\text{C}_4$ -культур увеличение концентрации  $\text{CO}_2$  повышает конкурентоспособность как  $\text{C}_4$ -, так и  $\text{C}_3$ -сорных видов, в посевах  $\text{C}_3$ -видов –  $\text{C}_3$ -сорняков. Вместе с тем  $\text{C}_3$ -культуры в последнем случае получают преимущество над  $\text{C}_4$ -сорными вида-

ми. При этом особенно существенным может быть реакция многолетних инвазивных видов, в частности, бодяка полевого, биомасса которого увеличилась на 70% [13].

Вместе с тем зависимость конкурентоспособности растительных особей в агрофитоценозе от большого числа факторов и условий осложняет прогнозирование исхода их конкуренции только на основе типов углеродного метаболизма, как и обнаружение одного единственного показателя, ее лимитирующего.

### ПОВЫШЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

С повышением содержания парниковых газов в атмосфере и температуры воздуха ареал распространения многих сорных видов с  $C_4$ -типом метаболизма, таких как щирица запрокинутая (*Amaranthus retroflexus* L.), щетинник зеленый (*Setaria viridis*), росички (*Digitaria*), гумай (*Sorghum halepense* L.) может распространиться на север, что значительно расширит число сорных видов в Северной Европе [14–16]. Щетинник зеленый может стать серьезным конкурентом кукурузы при повышении температуры в период ее прорастания в условиях северной части Центральной Европы, где температуры пока ниже оптимальных для этой культуры [17]. В условиях повышенных температур и аридизации климата в районах интенсивного растениеводства  $C_4$ -сорные виды, в частности, щирица запрокинутая будут доминировать в посевах  $C_3$ -культур (сои), а подорожник малый (*Plantago minor*) с повышением концентрации  $CO_2$  – в посевах пшеницы [18, 19]. Вместе с тем, глобальное потепление климата повышает частоту наступления экстремальных погодных условий, в результате чего снижаются популяции видов сорных растений с недостаточной фенотипической пластичностью и меняется число видов и их соотношение и в агрофитоценозах [20, 21].

Показано, что поглощение корневой системой и восходящий транспорт почвенных гербицидов по ксилеме, как и их трансформация в почвах также будут зависеть от повышающейся температуры [22]. Температура оказывает существенное влияние на скорость деградации почвенных гербицидов, в частности, из группы сульфонилмочевины [23]. При послевсходовой обработке посевов испаряемость некоторых гербицидов, в частности, трифлуралина (trifluralin) с повышением температуры возрастает, что снижает его эффективность против сорняков [24]. Абсорбция глифосата листьями  $C_3$ -сорняка десмодиума извилистого (*Desmodium tortuosum* (Sw.) DC.) также зависела от температуры [25]. Вместе с тем увеличение температуры и относительной влажности воздуха способствовало трехкратному повышению эф-

фективности действия гербицида мезотрион (mesotrione) при защите от амброзии [26]. Именно относительная влажность воздуха, оказывая влияние на гидратацию кутикулы и высыхание капель рабочего раствора гербицида на поверхности листьев, определяла максимальный фитотоксичный эффект сульфонилмочевины [27]. Эффективность применения гербицида пиритиобак-натрия (pyrithiobac) против щирицы Палмера (*Amaranthus palmeri*) достигала максимума в диапазоне температур 20–34°C, снижаясь за его пределами [28]. Глюфосинат практически полностью подавлял рост редьки дикой при дневной/ночной температуре 20/15 и 25/20°C, но не при 10/5°C [29].

### ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА СОРНЫЕ РАСТЕНИЯ

Температура почвы играет ключевую роль в прорастании семян сорных растений и их выживании, особенно в условиях холодной почвы [30]. Установлен широкий диапазон температур для прорастания семян видов сорных растений. Например, звездчатка средняя (*Stellaria media* L.) хорошо выживает в холодном климате, в то время как некоторые из наиболее злостных сорных растений в посевах сои, кукурузы и хлопчатника реагируют на температурный градиент в несколько градусов. Ежовник обыкновенный (куриное просо), как и сида колючая, относится к достаточно теплолюбивым видам с высоким температурным оптимумом для роста и накопления сухой массы. Пространственное распространение гумая (*Sorghum halepense* L.) в относительно прохладном климате ограничивается чувствительностью ризом к температуре  $< -3^\circ C$ . Не отличается холодоустойчивостью также вьюнок полевой (*Convolvulus arvensis* L.) [31], однако он прорастает в достаточно широком диапазоне температур (15–35°C) с оптимальной температурой  $\approx 24^\circ C$ . Интересно, что в ответ на повышение температуры на 3°C биомасса и площадь листьев ротбеллии высокой (*Rottboellia cochinchinensis* (Lour.) W.D. Clayton) увеличились соответственно на 88 и 68% [32].

Большие потери урожая сои и кукурузы на среднем западе США обусловлены распространением ряда очень агрессивных видов сорных растений тропического и субтропического происхождения, например, гумая [33]. По мере повышения температуры прогнозируется дальнейшее перемещение подобных сорных видов в более северные широты, особенно  $C_4$ -видов, в частности, споробола индийского (*Sporobolus indicus* L.) [34]. Распространение сорных видов типично умеренной зоны – дикого проса (*Panicum millacum* L.) и бодяка полевого (*Canada thistle* L.), напротив, будет ограничиваться [35].

В России, согласно экспертным оценкам, потепление климата может привести к “осеврению” сельского хозяйства и оказать позитивное влияние на урожайность в умеренных и высоких широтах [36]. Хотя потепление на 1°C и продвигает экономически оправданную границу возделывания зерновых культур в России на 300 км в более высокие широты и, возможно, станет позитивным фактором для умеренных зон, это не сможет компенсировать потерь урожая в основных зерновых районах, где усилится аридизация. Последняя по мере дальнейшего потепления климата будет способствовать доминированию видов сорняков с глубоко проникающей мощной корневой системой. Кроме того, искомые условия содействуют более длительному, вплоть до 7 лет, сохранению жизнеспособности/всхожести семян сорных растений в сухой почве [37], что показано в частности для горца многоцветкового (*Polygonum cilinode Michx*). Интересно, что в условиях Австралии куманика (*Rubus fruticosus L.*) – типичный вид сорных растений в посевах сельскохозяйственных культур – смещается в более северные широты из-за чувствительности к повышенным температурам и засухе. Аналогичная тенденция отмечена для улекса европейского (*Ulex europaeus L.*) и лантаны сводчатой (*Lantana camara L.*), что обусловлено их повышенной требовательностью к обеспечению влагой. Засуха снижает конкурентоспособность щетинника [38], но повышает ее у гумая в посевах кукурузы [39].

Из-за общей тенденции потепления климата в Центральной России отмечено заметное повышение уровня засоренности посевов пропашных культур (кукурузы) позднелетними теплолюбивыми видами сорняков, в частности, ежовником обыкновенным и щирицей запрокинутой [8]. В последней работе выделена группа из 16-ти видов сорняков, численность и вредоносность которых во всех регионах России в последние десятилетия неуклонно растет. При этом сорный ценоз, в частности, в посевах озимой пшеницы, отличается по годам не только видовым разнообразием, но и биологическими группами и жизненными формами. Вследствие потепления климата и мягких условий перезимовки доля зимующих сорняков (ромашки непахучей, пастушьей сумки, звездчатки средней, фиалки полевой, осота полевого, ярутки полевой, мятлика однолетнего) в посевах озимой пшеницы составила в ценозе сорной растительности >70% и за последнее десятилетие увеличилась с 40 до 80%. При этом отмечена миграция в северные регионы России ряда южных видов сорняков – щирицы запрокинутой, ежовника обыкновенного, мальвы приземистой, бурчника лекарственного, латука компасного, молочая остроуго, паслена черного и льнянки обыкновенной.

Сумма эффективных температур (>5°C) в Азербайджанской Республике за последние 25–30 лет увеличилась в зависимости от региона на 5–8°C, причем особенно сильно на юге, западе и северо-западе страны на фоне заметного снижения количества осадков. Это привело к аридизации климата и существенному уменьшению гидротермического коэффициента, рассчитываемого как отношение суммарного количества осадков к сумме эффективных температур. Это не могло не сказаться на продуктивности полевых культур, поскольку >60% сельхозгодий уже находилось в полузасушливых районах страны.

Хотя в Азербайджане последние 20 лет посевные площади под орошением увеличились на 23%, это не затронуло предгорные и горные районы республики, что благодаря пластичности сорняков резко увеличило их вредоносность в посевах. Многие из видов сорных растений, характерных для этих полей в 1980-е гг., в связи с изменением климатических условий перестали расти в прежних агроценозах и мигрировали в северные районы республики. Причиной этого является уменьшение суммы осадков за последние годы. На орошаемых полях видовой состав сорных растений сохранился неизменным, как и на фермерских полях, где практикуют монокультуру, и для защиты от сорняков широко используют гербициды.

Потепление может ускорить развитие растений, в том числе сорных видов. Например, в опытах повышение температуры на 4°C (нереальное в природе) ускорило появление всходов мари белой и щетинника на 26 и 35 сут соответственно, цветение – на 50 и 31.5 сут [40]. Накопление биомассы у C<sub>3</sub>-растений оказалось более чувствительным к повышению температуры, что может нивелировать позитивный эффект углекислотной подкормки на накопление биомассы в репродуктивной фазе и семенную продуктивность сорных видов. Согласно модели, в Англии лисохвост мышехвостный (*Alopecurus myosuroides*) в посевах озимой пшеницы к 2046–2065 гг. в результате повышения температуры может распространиться в зависимости от типа и водоудерживающей способности почв далеко на север страны [41].

К вопросу о возможностях моделирования роста и развития сорных видов в посевах обращаются и российские исследователи [42]. Однако предлагаемая модель учитывает, во-первых, только агротехнические факторы (вспашку, сроки сева, удобрения) и физиологические особенности растений (банк семян, жизненную форму и др.), и, во-вторых, имеет жесткие условия, при которых модельный прогноз наиболее точен (например, только для участков со слабой, средней и сильной засоренностью). Эти особенности приводят к

ограниченному использованию математических зависимостей на практике, тем более что они не учитывают влияние изменяющихся факторов среды на конкурентоспособность культурных и сорных растений в агрофитоценозе.

### ПОВЫШЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ CO<sub>2</sub>

Повышенные концентрации CO<sub>2</sub> могут увеличить фотосинтез и продуктивность сельскохозяйственных культур [2], изменить морфологию растений, структуру и архитектуру посева, микроклимат и соотношение органов растений в ценозе и др. [43].

Как и полевые культуры, многие сорные растения реагируют положительно на данный фактор, причем в результате снижения устьичной апертуры продуктивность транспирации у них возрастает [35, 44]. C<sub>3</sub>-виды увеличивают площадь листьев и биомассу в большей мере, чем C<sub>4</sub>-виды [45]. При этом обнаружена достаточно широкая норма реакции на повышение концентрации CO<sub>2</sub> благодаря взаимодействию этого фактора с температурой, освещенностью, влагообеспеченностью и агрофоном. Искомый фактор стимулирует рост и накопление биомассы C<sub>3</sub>- (овсяница), C<sub>3</sub>/C<sub>4</sub>-переходного вида (просо) и C<sub>4</sub>-видов (амброзия). Углекислотная подкормка стимулировала образование пыльцы у щирицы и скорость развития овсюга (*Avena fatua* L.).

В этих условиях заметно повышается также репродуктивный потенциал сорняков. Например, многократно увеличилось количество цветков щирицы [46], что непосредственно коррелировало с накоплением большей биомассы и повышенной площадью листьев [47, 48]. Кроме того, в этих условиях увеличивается как биомасса, так и доля корней в биомассе растения, как это показано на примере бодяка полевого, что затрудняет контроль за многолетними сорными растениями [49] и расширяет ареал их распространения.

Установлено также, что сильнее на повышение концентрации CO<sub>2</sub> реагируют виды C<sub>3</sub>-сорняков, размножающиеся вегетативным способом [50]. Поэтому прогнозируют, что распространение многолетних сорняков, доминирующих, в частности, в посевах риса и сои, будет расширяться из-за стимулирования роста именно корневых систем [51].

Повышенная концентрация озона при выращивании сои и пшеницы в двупольном севообороте при нулевой обработке почвы не оказывала влияние на содержание азота в почве и ее микробиологическую активность, накопление биомассы, густоту стеблестоя и минерализацию азота в отличие от повышенной концентрации CO<sub>2</sub> при выращивании, стимулировавшей эти процессы

[2, 52]. Вместе с тем в другом опыте с соей повышение концентрации O<sub>3</sub> на 20% увеличило содержание азота и углерода в почве соответственно на 12 и 15% [53] на фоне повышения содержания N-NH<sub>4</sub>. Последнее могло быть обусловлено меньшей симбиотической азотфиксацией, что обнаружено также в посеве арахиса [54]. Потенциальное влияние повышенных концентраций озона как на конкурентоспособность культурных и сорных растений в агрофитоценозе, так и круговорот питательных веществ в почве до сих пор корректно не оценено в регионах высокоинтенсивного сельского хозяйства, в частности, в южной Калифорнии, Восточном Китае или на севере Индии, где влияние O<sub>3</sub> на полевые культуры в силу высокого содержания существенно [55]. Например, у сои с увеличением концентрации O<sub>3</sub> с 30 до 90 ppb, нереальных в природе и ожидаемых лишь в конце XXI столетия, эффективность утилизации солнечной энергии снизилась с 0.89 до 0.68 г сухой массы/МДж, а урожайность семян — с 450 до 320 г/м<sup>2</sup>. По имеющимся на сегодня данным, температура не играет такой значимой роли в определении чувствительности растений к O<sub>3</sub>.

Что касается сравнительных исследований действия повышенных концентраций CO<sub>2</sub> и O<sub>3</sub> в отдельности и в сочетании, проведенных на редиесе, оба газа снижали устьичную проводимость, а их сочетание снижало ее еще сильнее. Действие озона уменьшало эффективность использования влаги (ЭИВ), а CO<sub>2</sub>, напротив, повышало. Сочетание действия 2-х газов, не оказывая вначале заметного влияния на ЭИВ, существенно ее снижало с увеличением экспозиции по сравнению с действием данных газов в отдельности. Это связано с ускорением старения растения под действием озона. Подобных исследований на сорняках не проводили.

В опытах с пшеницей и овсюгом — доминирующим сорным растением в посевах пшеницы — повышенные дозы ультрафиолетовой радиации, коррелирующей отрицательно с содержанием тропосферного озона, не влияя на интенсивность фотосинтеза, увеличивали конкурентоспособность пшеницы за счет ингибирования роста стеблей растений овсюга (*Avena fatua* L.).

Вместе с тем опыты в фитотроне на растениях подсолнечника и кукурузы при разном сочетании повышенных температуры, концентрации CO<sub>2</sub> и доз УФ-В радиации показали, что температура и CO<sub>2</sub> гораздо сильнее влияли на рост и накопление биомассы, чем любое реалистичное повышение УФ-В излучения.

Ультрафиолетовая радиация, в отличие от озона, даже при очень высоком уровне излучения не вызывала заметного изменения интенсивности

фотосинтеза или урожайности сои, а взаимодействия УФ-В и  $O_3$  практически не было. Пока неясно, в какой мере подобные реакции видоспецифичны, особенно по отношению к сорнякам. Однако даже имеющиеся на сегодня отдельные данные свидетельствуют о том, что  $O_3$  представляет для полевых культур гораздо более серьезную проблему, чем увеличение доз УФ-В излучения.

Исследования совместного действия повышенной температуры и концентрации  $CO_2$  на конкурентоспособность культурных и сорных растений в агроценозах единичны [56]. В данной работе показано, что при повышении концентрации  $CO_2$  и температуре 27/21°C  $C_3$ -растения риса получают преимущество в урожайности над сорными растениями с  $C_4$ -типом фотосинтеза. Вместе с тем при одновременном повышении как концентрации  $CO_2$ , так и температуры преимущество переходит к сорному растению. Данное исследование показывает, что результат конкуренции культурного и сорного растения в посевах трудно предсказать на основе только знаний эндогенных механизмов регуляции фотосинтеза растений, принадлежности к  $C_3$ - или  $C_4$ -типу фотосинтеза, а также модели роста и развития  $C_4$ -сорного вида в посевах  $C_3$ -культуры. Что касается культур (риса, сои, пшеницы) зерновая продуктивность в опытах при обогащении  $CO_2$  и температуре  $>26^\circ C$  снижалась на 10% на каждый градус. В странах с жарким климатом температуры  $>35^\circ C$  приведут к существенному снижению урожайности из-за возросшей чувствительности цветения и закладки семян к высоким температурам, а также дефицита влаги вследствие повышенной эвапотранспирации. Ситуация осложняется еще больше при сочетании повышенной концентрации  $CO_2$  и засухи. Например, если доля биомассы сорных видов в посевах многолетних трав (культурные пастбища) увеличивалась с повышением содержания  $CO_2$  в воздухе при ограниченной и оптимальной влагообеспеченности примерно в равной мере [57], в аналогичном опыте с томатом ( $C_3$ -вид) и амарантом колосистым (*Amaranthus retroflexus* L.) в качестве сорного растения ( $C_4$ -вид) преимущество при оптимальной влагообеспеченности получал томат, а при засухе в сочетании с углекислотной подкормкой – сорное растение [58]. Это обусловлено большей продуктивностью транспирации и соответственно более эффективным использованием воды видом сорного растения [10, 59].

Ввиду высокой адаптивности сорного компонента агрофитоценоза видовой состав сорных растений существенно меняется не только в зависимости от агротехники культуры, но и погодноклиматических условий вегетационных сезонов.

Например, посевы озимой пшеницы в Центральной России в особо засушливые и жаркие сезоны были засорены зимующими сорняками на 89%, тогда как в дождливый сезон их доля снизилась до 59%. В последнем случае в Подмоскovie посевы яровых культур особенно сильно зарастали яровым сорняком марью белой, причем общая засоренность всех культур была в 2.5 раза больше, чем в засушливых условиях [8]. В засушливых условиях в сорном ценозе доминировала ромашка непахучая, достигая в отдельные годы 60–80% от общего количества сорняков. Это может свидетельствовать о высокой конкурентоспособности данного вида. Многолетние сорняки – осот полевой, бодяк полевой, чистец болотный, подорожник большой в этих условиях были немногочисленными.

С удвоением концентрации  $CO_2$  в атмосфере прогнозируется повышение температуры воздуха на 1–5°C, что вызовет аридизацию интенсивно используемых для целей растениеводства южных территорий [22, 36]. Такой сценарий в сочетании с повышенной вероятностью наступления засух может заметно осложнить защиту яровых культур от сорных растений [17], причем в засушливых условиях  $C_4$ -сорняки получают преимущество над  $C_3$ -видами. Подобное развитие событий особенно осложнит ситуацию в зонах интенсивного рисосеяния в Юго-Восточной Азии, где в условиях дефицита поливной воды фермеры вынуждены переходить на выращивание риса на богаре. Однако для этого необходимы засухоустойчивые сорта и гибриды риса. Вместе с тем в условиях засухи рис не может составить конкуренцию видам сорных растений с  $C_4$ -типом углеродного метаболизма, доминирующим в сорном ценозе [60, 61]. Переход с целью экономии воды от высадки рассады к прямому посеву семян риса в почву привел к дальнейшему повышению конкурентоспособности сорных видов над культурой и изменил динамику их роста и развития [62]. В результате засуха существенно снижала урожайность риса [63], не оказывая ощутимого влияния на накопление биомассы и развитие амаранта колючего (*Amaranthus spinosus*) и лептохлои китайской (*Leptochloa chinensis*) даже при минимальной влажности почвы.

Интересными представляются сравнительные исследования реакции риса и весьма вредоносного в посевах красного риса (сорняка), имеющих  $C_3$ -тип фотосинтеза и одинаковую анатомо-морфологическую структуру фотосинтетического аппарата, на повышенную концентрацию  $CO_2$  (варианты: 300 – контроль, 400 и 500 ммоль<sup>-1</sup>) при густоте посева 8 и 16 растений/м<sup>2</sup> [64]. Как биомасса, так и семенная продуктивность при обеих густотах посева оказались больше в опытных вариантах у сорного вида. Эта работа – одна из пер-

вых, где сравнили таксономически и биохимически одинаковые формы риса. В другом опыте яровой рапс в условиях глобального потепления на фоне одновременного увеличения концентрации  $O_3$ , хотя и снижал урожайность в сравнении с нормальными условиями, но благодаря лучшей антиоксидантной защите в меньшей мере, чем таксономически близкий сорный вид — дикая горчица [65]. При текущем климате конкуренция не оказала существенного влияния на оба вида.

Вместе с тем существуют специфические сорняки и для других культур — льна (плевел льняной, торица льняная и др.), проса (ежовник обыкновенный, щетинники). К произрастанию в соседстве с гречихой приспособились гречиха татарская и гречишка вьюнковая, с горохом — горох полевой, с овсом — овсюг и др. Данный факт существенно усугубляет проблему контроля сорняков, поскольку в этом случае наблюдается их максимальная приспособленность к выживанию в условиях контроля со стороны человека.

Вызывает серьезные опасения возможное снижение качества урожая риса при ожидаемом к концу столетия повышении концентрации  $CO_2$  в атмосфере до 500 ppm [66]. Снижение содержания белка, железа, цинка, а также витаминов В1, В2, В5 и В9 может заметно уменьшить питательную ценность риса, являющегося основным продуктом питания для более чем 2-х миллиардов человек [67].

#### РЕАКЦИЯ СОРНЯКОВ В АГРОФИТОЦЕНОЗЕ НА СОЧЕТАНИЕ ФАКТОРОВ СРЕДЫ

Известно, что стимуляция нетто-фотосинтеза при углекислотной подкормке выражена сильнее на растениях  $C_3$ -, чем  $C_4$ -видов, но характер реакции зависит в том числе от температуры, влагообеспеченности и агрофона [68]. Повышение температуры, частоты и интенсивности осадков [66] ускоряют выход семян сорняков из покоя и прорастание независимо от их реакции на  $CO_2$  [69, 70], оказывая влияние на пространственно-временное распределение разных вредных видов растений в агрофитоценозах. После прорастания прежде всего влагообеспеченность оказывает определяющее влияние на итоговую реакцию культуры и сорных видов на повышение концентрации  $CO_2$ . Она может быть иной, нежели реакция только нетто-фотосинтеза растений из-за принадлежности к разному типу углеродного метаболизма. При этом водный и минеральный стресс сильнее ограничивают реакцию  $C_3$ -, но не  $C_4$ -видов, что в свою очередь влияет на конкурентоспособность культуры и сорняков в посевах [71]. Что касается одновременного повышения

температуры и концентрации  $CO_2$ , реакция на подобное изменение условий по накоплению биомассы одних сорных видов может быть позитивной, других — негативной [72], как и водообеспеченности на фоне углекислотной подкормки [73]. В случае с температурой конкурентоспособность некоторых культур в сравнении с сорняками может оказаться меньше [74], что подтверждено, например, в полевых опытах с ячменем и щирцей запрокинутой (*Amaranthus retroflexus* L.) на юге Финляндии [75]. В литературе также мало сведений о результатах конкуренции культурных и сорных видов растений в посевах на отличающемся агрофоне при повышенной концентрации  $CO_2$ . В последнем случае как при сильном, так и умеренном дефиците элементов питания увеличение биомассы как культуры, так и сорного вида может быть минимальным [76]. Например, при совместном выращивании куриного проса ( $C_4$ -сорняк) и риса ( $C_3$ -культура) на фоне повышенной на 200 ppm от нормальной концентрации  $CO_2$  в воздухе, биомасса риса увеличилась сильнее, чем сорного вида только при достаточном азотном питании [77]. На низком агрофоне преимущество в накоплении биомассы переходило к куриному просу из-за снижения числа побегов риса.

Приведенные выше данные показывают, что опыты с углекислотными подкормками сорных растений необходимо проводить на фоне изменения температуры, влагообеспеченности и агрофона. Игнорирование данного факта может привести к некорректным прогнозным оценкам конкурентоспособности видов в посевах в разрабатываемых моделях и осложнить в перспективе реализацию мероприятий по защите культур от сорняков [78].

#### ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДЕЙСТВИЯ ГЕРБИЦИДОВ

Влияние концентрации  $CO_2$  и/или изменения климата на эффективность применения гербицидов определяется спецификой действия последних, видом сорняка и исходной конкурентоспособностью культурных и сорных видов в посевах. Например, если углекислотная подкормка не оказывает влияния на чувствительность амаранта колосистого (*Amaranthus retroflexus* L.) к глифосату, резистентность мари белой (*Chenopodium alba* L.) к последнему снижалась. Однако при некотором ингибировании роста ее полностью уничтожения отмечено не было [79]. Аналогичная тенденция отмечена также в опытах с бодяком полевым (*Cirsium arvense* L.), пыреем ползучим (*Elytrigia repens* L.) [80] и рядом экзотических  $C_4$ -трав [81]. В последней работе, по мнению авторов, устойчивость к глифосату сорных видов можно было бы объяснить индуцированным повышенной кон-

центрацией  $\text{CO}_2$  увеличением биомассы и площади листьев, следствием чего может быть эффект разбавления гербицида. Однако это предположение противоречит общей тенденции отсутствия прямой стимуляции роста  $\text{C}_4$ -растений в условиях обогащения воздуха двуокисью углерода. Вместе с тем не исключено, что сорные растения на подобные условия могут реагировать сильнее, чем культуры, что было показано ранее [82]. Другой гербицид — глюфосинат, действующий на клеточную мембрану, в аналогичной ситуации снижал эффективность действия против бодяка.

Одновременное повышение концентрации двуокиси углерода в атмосфере и температуры воздуха также может потенциально изменить эффективность действия гербицидов [83]. В подобных условиях ускоряется развитие сорняков, и время их нахождения в фазе проростков, наиболее чувствительной к действию гербицидов, сокращается. Например, цигалофоп-бутил (*Cyhalofop Butyl*) используют в качестве послевсходового селективного гербицида против куриного проса (*Echinochloa crusgalli* L.) в посевах риса. Данный гербицид поглощается листьями и, транспортируясь по флоэме в меристематические ткани, ингибирует синтез липидов. Дефицит последних в конечном итоге приводит к гибели всего растения. С повышением концентрации углекислоты до 700 ppm и температуры до 38/26°C, поглощение искомого гербицида и его транспорт из обработанного листа как у устойчивой, так и чувствительной формы сорняка, практически не изменились [84]. Эффективность действия гербицида, рассчитанная по степени влияния на накопление биомассы сорняком, снизилась у устойчивой формы в опытных вариантах на 50%. Это указывает на возможное увеличение гербицидоустойчивости куриного проса как ответной реакции на изменение условий выращивания [85].

Повышение концентрации  $\text{CO}_2$  и температуры одновременно косвенно может повлиять на обработку почвы: меньше времени остается для полевых работ, ускоряется зарастание почвы сорными видами, усиливается вегетативное размножение [87], что в результате ограничивает время для механической борьбы с сорняками.

Любой стрессор, действующий на культурное растение, усиливает его восприимчивость к вредителям и болезням, и снижает конкурентоспособность с сорными растениями в агрофитоценозах [88]. Например, засушливые условия стимулируют формирование толстой кутикулы листьев с меньшей плотностью устьиц и их проводимостью, что в сочетании с возросшей опушенностью листьев затрудняет проникновение гербицида в ткани листа и, соответственно, снижает эффективность его действия. Вместе с тем, она макси-

мальна на растениях с высокой скоростью обмена веществ, что достигается в благоприятных условиях выращивания.

Рост видов сорной растительности, происходящих из тропических регионов, отличается повышенной чувствительностью даже к незначительным изменениям температуры. Однако потенциальный синергический эффект одновременного повышения температуры и концентрации  $\text{CO}_2$  на них пока не установлен. На основании отдельных опытов предполагается отрицательное влияние искомым условий на тропические культуры, что, в частности, показано на примере луговых трав [89]. Это может оказать существенное влияние на конкурентоспособность культур и защиту посевов от сорных видов в результате отмеченных выше изменений анатомо-морфологических характеристик листьев, ведущих к снижению поступления в них гербицидов и, соответственно, эффективности их действия [90–92]. Повышение концентрации  $\text{CO}_2$  снижало эффективность действия глифосата на целый ряд ядовитых сорных растений с  $\text{C}_3$ - и  $\text{C}_4$ -типом фотосинтеза [93]. Вместе с тем она не зависела от концентрации  $\text{CO}_2$  у щирицы запрокинутой (*Amaranthus retroflexus* L.) и споробола индийского (*Sporobolus indicus* L.) с  $\text{C}_4$ -типом фотосинтеза, что должно привлечь внимание исследователей. Приведенные примеры с учетом резкого увеличения в последние годы числа видов сорняков с устойчивостью к гербицидам [94] вынуждают разрабатывать новые технологии защиты посевов. Однако это может привести к увеличению стоимости защитных мероприятий [95].

#### СЕЛЕКЦИЯ СОРТОВ С ПОВЫШЕННОЙ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬЮ С СОРНЫМИ ВИДАМИ

В отличие от селекции на устойчивость к вредителям и болезням, селекции на повышенную конкурентоспособность с сорняками в агрофитоценозах уделялось меньше внимания. Вместе с тем сорта некоторых культур отличаются подобным свойством: сорта фасоли [96], томата, устойчивого к повилке [97] или мелкосемянных зерновых культур [98], демонстрирующих отличающуюся конкурентоспособность при выращивании в монокультуре и в засоренных посевах. Немаловажную роль в подобном исходе играют аллелопатические свойства культур как, например, у риса сорта Рондо, выращиваемого в штате Техас (США) в системе органического земледелия [99]. В результате скрещивания шведского сорта яровой мягкой пшеницы с низкой аллелопатической активностью и туниского сорта — с высокой, методами классической селекции был создан сорт с

повышенной аллелопатической активностью [100]. В Юго-Восточной Азии, используя аналогичные подходы, были созданы сорта риса, способные подавлять сорняки в посевах [101–103]. Сорта риса с подобными свойствами были созданы также в США [104]. При этом быстрый начальный рост растений в сочетании с накоплением большей биомассы в результате интенсификации побегообразования и аллелопатической активности определяли повышенную конкурентоспособность сортов [105].

В условиях аридизации в связи с потеплением климата перспективна, в том числе для успешной конкуренции с сорной растительностью, селекция засухоустойчивых сортов. Однако они отличаются сравнительно низкой урожайностью, а поиск генетических доноров устойчивости идет в направлении совершенствования архитектоники растений, усиления мощности корневой системы, опущенности листьев и стеблей и др. Например, устойчивые к периодической засухе сорта сорго отличаются, в частности, глубоко проникающей корневой системой, высокой удельной длиной корней (см/см<sup>3</sup> почвы), толстой кутикулой листьев, активным отложением в них эпоксидных восков и эффективным функционированием устьичного аппарата [106, 107]. Генетические манипуляции позволили создать и коммерциализировать засухоустойчивую кукурузу Drought Grade™ (США) [108]. Однако засухоустойчивость далеко не всегда определяет исход конкуренции в посевах в пользу культуры, как, например, в посевах 2-х устойчивых сортов суходольного риса, засоренных спермакоце муточкастым (*Spermacoce verticillata* L.), в условиях как оптимальной, так и ограниченной влагообеспеченности [109]. Аналогичные данные получены также в другом опыте при выращивании сортов риса на богаре в присутствии в посевах 2-х видов сорных растений – щирицы колючей (*Amaranthus spinosus* L.) и лептохлои китайской (*Leptochloa chinensis* L.) с С<sub>4</sub>-типом фотосинтеза, которые, в отличие от риса, выжили и сформировали листья и побеги в условиях засухи [63].

#### ЗАЩИТНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Возросший интерес к ресурсосберегающим технологиям в земледелии предполагал широкое использование глифосата для защиты посевов от сорняков. Однако это привело к резкому увеличению числа резистентных к гербицидам биотипов наиболее вредоносных сорняков. Нулевая обработка почвы при выращивании пшеницы, которую рассматривали в свое время как прорывную технологию, существенно увеличила количество и флористический состав сорных видов [110]. На-

пример, в посевах начал доминировать такой вредоносный сорняк, как щавель малый (*Rumex acetosella* L.) [111]. Повышенная толерантность к глифосату была отмечена как для сельскохозяйственных, так и инвазивных видов сорных растений, в частности, многолетнего сорняка пырея ползучего [112]. Однако подобная тенденция относится не ко всем видам сорных растений. Например, щирица зеленая, в отличие от мари белой и бодяка полевого, при углекислотной подкормке не проявляла устойчивость к глифосату [49]. Различная реакция на обработку глифосатом обнаружена также среди инвазивных травянистых форм с одинаковым типом углеродного метаболизма – С<sub>3</sub> или С<sub>4</sub> [81]. Однако глифосат при длительном применении может повысить восприимчивость культур к целому ряду болезней [113, 114]. Таким образом, защита устойчивых к глифосату культур от некоторых видов сорняков в ближайшем будущем может быть более проблематичной, особенно при минимальной обработке почвы. Другая сложность может заключаться в снижении эффективности обработок глифосатом против многолетних сорняков, поскольку по мере изменения климата происходит увеличение массы корневищ и ризом в растениях. Последнее, очевидно, вызовет повышение затрат на защитные мероприятия.

Непосредственное влияние изменений климата на физиологию, анатомию и морфологию сорных растений окажет косвенное воздействие на эффективность применения гербицидов в результате влияния на их поглощение, транспорт и метаболизм. Изменения погодных условий, включая время наступления засух или длительных интенсивных осадков, могут изменить сроки, а также сократить период (окно) максимального благоприятствования действия гербицидов и в конечном итоге также снизить эффективность их действия. Заметно осложняет ситуацию усиливающееся по мере изменения климата вегетативное размножение корневищных и корнеотпрысковых сорняков, достаточно толерантных к ограниченной влагообеспеченности почвы. Вышеизложенное предполагает изменение тактики защиты культур от сорных видов и ее адаптацию к изменившимся погодным условиям с учетом экологии и биологии сорняков. При этом особое внимание необходимо будет уделить синхронизации сроков защитных мероприятий с жизненным циклом развития сорных видов, также реагирующим на изменение параметров климата [112].

Большое значение в выборе стратегии борьбы с сорняками имеет тип засоренности почвы: малолетними сорняками с преобладанием однолетних и многолетних, выросших из семян (первый год жизни), корнеотпрысковыми корневищными или смешанным сорным ценозом.

Интегрированная защита от сорняков в Российской Федерации предполагает использование в первую очередь приемов агротехники как наиболее рациональных, экономичных и экологически безопасных. Среди агротехнических приемов ключевыми являются правильно подобранный севооборот, дифференцированная обработка почвы (сочетание отвальной и безотвальной) и использование явления аллелопатии некоторых видов растений (рапс, горчица, редька дикая и др.). В тех случаях, когда агротехническими методами невозможно подавить сорняки до безопасного уровня, целесообразно применить химическую прополку. С этой целью в различных почвенно-климатических зонах Российской Федерации используют комбинированные гербицидные препараты, имеющие в своем составе 2–3 действующих вещества, различающиеся механизмами действия и селективности и обеспечивающие снижение экотоксикантных нагрузок на окружающую среду.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Климатические изменения, оказывая влияние на конкурентоспособность культурных и сорных растений, могут заметно изменить методы борьбы против сорняков, включая химический метод с использованием смесевых гербицидов с повышенной биологической и хозяйственной эффективностью и сниженным экологическим риском. При этом особого внимания заслуживает как прямое влияние атмосферных факторов на растительные сообщества, так и косвенное – на эффективность применения гербицидов. Однако разработанные до настоящего времени модели роста и развития сорняков в агрофитоценозах весьма приблизительны и для их верификации используют данные влияния отдельных факторов изменения климата как на культуры, так и (намного реже) на сорные растения. Крайне мало исследований, включающих долгосрочные совместные действия указанных выше атмосферных факторов (загрязнителей), внутри- и межвидовую конкуренцию культуры и сорных растений, наличие вредителей и болезней на фоне изменяющихся температуры, агрофона и влагообеспеченности. Кроме того, многие исследования страдают серьезными методическими изъянами: либо воздействия неадекватно установлены, либо их дозы, в случае атмосферных факторов, неестественно высоки. Например, реакция растений на УФ-В на слабом свете в фитотронах выражена гораздо сильнее, чем при солнечном освещении. По этой причине полевые опыты более адекватно характеризуют влияние УФ-В на накопление биомассы и продуктивность растения. Однако даже в этом случае в поле растения длительное время подвергались воздействию концентрации тропо-

сферного  $O_3$ , соответствующей 15–25% снижению  $O_3$  в стратосфере, что, свою очередь, может повысить дозу УФ-В на 30–59% по сравнению с естественным фоном. Это гораздо больше, чем может происходить в реальности, и соответствует по прогнозам параметрам истощения озона в стратосфере в зоне интенсивного сельскохозяйственного производства через 30 лет. В результате данные литературы для одной и той же культуры или вида сорного растения весьма противоречивы, что необходимо учитывать при анализе их конкурентоспособности и мероприятий по защите посевов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глобальное потепление на 1.5°C: Специальный доклад МГЭИК о последствиях глобального потепления на 1.5°C выше доиндустриальных уровней и о соответствующих траекториях глобальных выбросов парниковых газов в контексте укрепления глобального реагирования на угрозу изменения климата, а также устойчивого развития и усилий по искоренению нищеты / Под ред. Массон-Дельмотт В., Чжай П., Пёртнер Г.О., Робертс Д., Ски Д., Шукла П.Р., Пирани А., Муфума-Окия В., Пеан К., Пидкок Р., Коннорс С., Мэтьюз Д.Б.Р., Чжень Я., Чжоу С., Гомис М.И., Лонной Е., Мейкок Т., Тигнор М., Уотерфилд Т. Межправительственная группа экспертов по изменению климата, 2019. 94 с.
2. Кошкин Е.И., Андреева И.В., Гусейнов Г.Г. Влияние глобальных изменений климата на продуктивность и устойчивость сельскохозяйственных культур к стрессорам // Агротехника. 2019. № 12. С. 83–96.
3. Oerke E.-C. Crop losses to pests // J. Agricult. Sci. 2006. V. 144 (1). P. 31–43.
4. Hossard L., Philibert A., Bertrand M., Colnenne-David C., Debaeke P., Munier-Jolain N., Jeuffroy M.H., Richard G., Makowski D. Effects of halving pesticide use on wheat production // Sci. Rep. 2014. V. 4:4405. P. 1–7.
5. Chakraborty S., Newton A.C. Climate change, plant diseases and food security: an overview // Plant Pathol. 2011. V. 60. № 1. P. 2–14.
6. Shaw M.W., Osborne T.M. Geographic distribution of plant pathogens in response to climate change // Plant Pathol. 2011. V. 60. P. 31–43.
7. Soltani N., Dille J.A., Burke I.C., Everman W.J., Van-Gessel M.J., Davis V.M., Sikkema P.H. Potential corn yield losses due to weeds in North America // Weed Tech. 2016. V. 30. Iss. 4. P. 979–984.
8. Особенности формирования сорного ценоза в посевах сельскохозяйственных культур // Адаптивно-интегрированная защита растений / Под ред. Спиридонова Ю.Я., Соколова М.С., Глинушкина А.П. М.: Печатный город, 2019. 628 с.
9. Власенко Н.Г., Власенко А.Г., Садохина Т.П., Кудашкин П.И. Сорные растения и борьба с ними при возделывании зерновых культур в Сибири. Новосибирск: СибНИИ земледелия и химизации сельского хозяйства, 2007. 127 с.

10. Кошкин Е.И. К проблеме конкуренции культурных и сорных растений в агрофитоценозе // Изв. ТСХА. 2016. Вып. 4. С. 53–68.
11. Andrews I.K.S., Storkey J., Sparkes D.L. A review of the potential for competitive cereal cultivars as a tool in integrated weed management // Weed Res. 2015. V. 55. P. 239–248.
12. Korres N.E., Norsworthy J.K., Tehranchian P., Gitsopoulos T.K., Loka D.A., Oosterhuis D.M., Gealy D.R., Moss S.R., Burgos N.R., Miller M.R., Palhano M. Cultivars to face climate change effects on crops and weeds: a review // Agron. Sustain. Develop. 2016. V. 36. № 12. 22 p.
13. Ziska L.H., Blumenthal D.M., Runion G.B., Hunt E.R.J., Diaz-Soltero H. Invasive species and climate change: an agronomic perspective // Climat. Change. 2011. V. 105. P. 13–42.
14. Weber E., Gut D. A survey of weeds that are increasingly spreading in Europe // Agron. Sustain. Develop. 2005. V. 25. P. 109–121.
15. Hanzlik K., Gerowitz B. Occurrence and distribution of important weed species in German winter oilseed rape fields // J. Plant Dis. Prot. 2012. V. 119. P. 107–120.
16. Ramesh K., Matloob A., Aslam F., Florentine S.K., Chauhan B.S. Weeds in a changing climate: vulnerabilities, consequences, and implications for future weed management // Front. Plant Sci. 2017. V. 8. 95 p.
17. Peters K., Gerowitz B. Important maize weeds profit in growth and reproduction from climate change conditions represented by higher temperatures and reduced humidity // J. Appl. Bot. Food Qual. 2014. V. 87. P. 234–242.
18. McDonald A., Riha S., DiTommaso A., DeGaetano A. Climate change and the geography of weed damage: analysis of U.S. maize systems suggests the potential for significant range transformations // Agric. Ecosys. Environ. 2009. V. 130. P. 131–140.
19. Mahajan G., Singh S., Chauman B.S. Impact of climate change on weeds in the rice-wheat cropping system // Curr. Sci. 2012. V. 102. P. 1254–1255.
20. Das T.K., Sharma A.R., Pathak H. Crop-weed balance studies under climate change // Climate change impact, adaptation and mitigation in agriculture: methodology for assessment and application / Eds. H. Panhak, P.K. Aggarwal, S.D. Singh. New Delhi: Indian Agricultural Research Institute, 2012. P. 131–146.
21. Peters K., Breitsameter L., Gerowitz B. Impact of climate change on weeds in agriculture: A review // Agron. Sustain. Develop. 2014. V. 34. P. 707–721.
22. Rodenburg J., Meinke H., Johnson D.E. Challenges for weed management in African rice systems in a changing climate // J. Agric. Sci. 2011. V. 149. P. 427–435.
23. McDowell R.W., Condon L.M., Main B.E., Dastgheib F. Dissipation of imazapyr, flumetsulam and thifensulfuron in soil // Weed Res. 2008. V. 37. P. 381–389.
24. Kudsk P., Kristensen J.L. Effect of environmental factors on herbicide performance // Proceedings of the first international weed control congress, Melbourne, 1992. V. 4. P. 173–186.
25. Sharma S.D., Singh M. Environmental factors affecting absorption and bio-efficacy of glyphosate in Florida beggarweed (*Desmodium tortuosum*) // Crop Protect. 2001. V. 20. Iss. 6. P. 511–516.
26. Johnson B.C., Young B.G. Influence of temperature and relative humidity on the foliar activity of mesotrione // Weed Sci. 2002. V. 50. P. 157–161.
27. Ramsey R.J.L., Stephenson G.R., Hall J.C. A review of the effects of humidity, humectants, and surfactant composition on the absorption and efficacy of highly water-soluble herbicides // Pest. Biochem. Physiol. 2005. V. 82. P. 162–175.
28. Mahan J.R., Dotray P.A., Light G.G. Thermal dependence of enzyme function and inhibition; implications for herbicide efficacy and tolerance // Physiol. Plant. 2004. V. 20. P. 187–195.
29. Kumaratilake A.R., Preston C. Low temperature reduces glufosinate activity and translocation in wild radish (*Raphanus raphanistrum*) // Weed Sci. 2005. V. 53. P. 10–16.
30. Zimdahl R.L. Fundamentals of weed science. Academic Burlington, 2007. 655 p.
31. Halvorson W.L., Guertin P. Factsheet for *Ipomoea purpurea* (L.) Roth. USGS weeds in the west project: status of introduced plants in Southern Arizona parks. U.S. Geological Survey, Southwest Biological Science Center and University of Arizona, 2003.
32. Ziska L.H., Bunce J.A. Predicting the impact of changing CO<sub>2</sub> on crop yields: some thoughts on food // New Phytol. 2007. V. 175 (4). P. 607–618.
33. Riar D.S., Norsworthy J.K., Steckel L.E., Stephenson D.O., Eubank T.W., Scott R.C. Assessment of weed management practices and problem weeds in the mid-south United States – soybean: a consultant’s perspective // Weed Technol. 2013. V. 27. P. 612–622.
34. Dukes J.S., Mooney H.A. Does global change increase the success of biological invaders? // Trends Ecol. Evol. 1999. V. 14 (4). P. 135–139.
35. Ziska L.H., Runion G.B. Future weed, pest and disease problems for plants // Agroecosystems in a changing climate / Eds. Newton P.C.D., Carman A., Edwards G.R., Niklaus P.A. CRC: Boston, 2007. P. 262–287.
36. Жученко А.А. Экологическая генетика культурных растений и проблемы агросферы (теория и практика): Монография. М.: Изд-во “Агрорус”, 2004. Т. I. 690 с.
37. Storrer A., Cook T. What impact does drought have on weeds? // Primefact 430, State of New South Wales through NSW Department of Primary Industries, 2007. № 7322. P. 1–3.
38. McGiffen M.E.J., Forcella F., Lindstrom M.J., Reicosky D.C. Covariance of cropping systems and foxtail density as predictors of weed interference // Weed Sci. 1997. V. 45. P. 388–396.
39. Leguizamón E.S., Yanniccari M.E., Guaiamet J.J., Acciarresi H.A. Growth, gas exchange and competitive ability of *Sorghum halepense* populations under different soil water availability // Can. J. Plant Sci. 2011. V. 91. P. 1011–1025.

40. Lee J. Combined effect of elevated CO<sub>2</sub> and temperature on the growth and phenology of two annual C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> weedy species // *Agric. Ecosys. Environ.* 2011. V. 140. P. 484–491.
41. Stratonovich P., Storkey J., Semenov M.A. A process-based approach to modelling impacts of climate change on the damage niche of an agricultural weed // *Glob. Change Biol.* 2012. V. 18. P. 2071–2080.
42. Бородуй С.А., Зубков А.Ф. Имитационно-статистическое моделирование биоценологических процессов в агроэкосистемах. СПб.: РАСХН–ВИЗР, 2001. 136 с.
43. Eastburn D.M., Degennaro M.M., Delucial E.H., Demody O., McElrone A.J. Elevated atmospheric carbon dioxide and ozone alter soybean diseases at SoyFACE // *Glob. Change Biol.* 2010. V. 16. P. 320–330.
44. Patterson D.T., Westbrook J.K., Joyce J.V., Lingren P.D., Rogasik J. Weeds, insects, and diseases // *Climate Change.* 1999. V. 43. P. 711–727.
45. Walthall C.J., Hatfield J., Backlund P. Climate change and agriculture in the United States: effects and adaptation // *USDA Tech. Bulletin.* 2012. № 1935. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, 186 p.
46. Naidu V.S.G.R., Paroha S. Growth and biomass partitioning in two weed species *Parthenium hysterophorus* (C<sub>3</sub>) and *Amaranthus viridis* (C<sub>4</sub>) under elevated CO<sub>2</sub> // *Ecol. Environ. Cons.* 2008. V. 14 (4). P. 9–12.
47. Korres N.E. Encyclopaedic dictionary of weed science: Theory and digest. Paris: Lavoisier SAS, 2005. 695 p.
48. Korres N.E., Norsworthy J.K. Influence of Palmer amaranth inter-row distance and emergence date on seed production in wide-row and drill-seeded soybean // *Proceedings of the Weed Science Society of America, Annual Meeting, Lexington, Kentucky, USA, February 9–12, 2015.*
49. Ziska L.H., Faulkner S., Lydon J. Changes in biomass and root: shoot ratio of field-grown Canada thistle (*Cirsium arvense*), a noxious, invasive weed, with elevated CO<sub>2</sub>: implications for control with glyphosate // *Weed Sci.* 2004. V. 52 (4). P. 584–588.
50. Ziska L.H., George K. Rising carbon dioxide and invasive, noxious plants: potential threats and consequences // *Water Resour. Rev.* 2004. V. 16. P. 427–446.
51. Chandrasena N. How will weed management change under climate change? Some perspectives // *J. Crop. Weed.* 2009. V. 5 (2). P. 95–105.
52. Cheng W., Inubushi K., Yagi K., Sakai H., Kobayashi K. Effects of elevated carbon dioxide concentration on biological nitrogen fixation, nitrogen mineralization and carbon decomposition in submerged rice soil // *Biol. Fertil. Soils.* 2001. V. 34 (1). P. 7–13.
53. Pujol Pereira E.I., Chung H., Scow K., Sadowsky M.J., van Kessel C., Six J. Soil nitrogen transformations under elevated atmospheric CO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> during the soybean growing season // *Environ. Pollut.* 2011. V. 159 (2). P. 401–407.
54. Tu C., Booker F.L., Burkey K.O., Hu S. Elevated atmospheric carbon dioxide and O<sub>3</sub> differentially alter nitrogen acquisition in peanut // *Crop Sci.* 2009. V. 49. Iss. 5. P. 1827–1836.
55. Booker F., Muntifering R., McGrath M. The ozone components of global change: potential effects on agriculture and horticulture plant yield, product quality and interactions with invasive species // *J. Integrat. Plant Biol.* 2009. V. 51 (4). P. 337–351.
56. Alberto A., Ziska L., Cervancia C., Manalo P. The influence of increasing carbon dioxide and temperature on competitive interactions between a C<sub>3</sub> crop, rice (*Oryza sativa*) and a C<sub>4</sub> weed (*Echinochloa glabrescens*) // *Funct. Plant Biol.* 1996. V. 23 (6). P. 795–802.
57. Newton P.C.D., Clark H., Bell C.C., Glasgow E.M. Interaction of soil moisture and elevated CO<sub>2</sub> on the above-ground growth rate, root length density and gas exchange of turves from temperate pasture // *J. Exp. Bot.* 1996. V. 47 (6). P. 771–779.
58. Valerio M.M., Tomecek B., Lovelli S., Ziska L.H. Quantifying the effect of drought on carbon dioxide-induced changes in competition between a C<sub>3</sub> crop (tomato) and a C<sub>4</sub> weed (*Amaranthus retroflexus*) // *Weed Res.* 2011. V. 51. P. 591–600.
59. Knapp A.K., Hamerlyn C.K., Owensby C.E. Photosynthetic and water relations response to elevated CO<sub>2</sub> in the C<sub>4</sub> grass, *Andropogon gerardii* // *Int. J. Plant Sci.* 1993. V. 154. P. 459–466.
60. Saito K. Weed pressure level and the correlation between weed competitiveness and rice yield without weed competition: An analysis of empirical data // *Field Crops Res.* 2010. V. 117 (1). P. 1–8.
61. Caton B.P., Mortimer M., Hill J.E., Johnson D.E. A Practical field guide to weeds of rice in Asia / 2<sup>nd</sup> Edn. Los Baños: International Rice Research Institute, 2010. 118 p.
62. Matloob A., Khaliq A., Tanveer A., Hussain S., Aslam F., Chauhan B.S. Weed dynamics in dry direct-seeded fine rice as influenced by tillage system, sowing time and weed competition duration // *Crop Protect.* 2015. V. 71. P. 25–38.
63. Chauhan B.S., Abugho S.B. Effect of water stress on the growth and development of *Amaranthus spinosus*, *Lepidochloa chinensis*, and rice // *Am. J. Plant Sci.* 2013. V. 4. P. 989–998.
64. Ziska L.H., Tomecek M.B., Gealy D.R. Competitive interactions between cultivated and red rice as a function of recent and projected increases in atmospheric carbon dioxide // *Agron. J.* 2010. V. 102. P. 118–123.
65. Kacienė G., Miškelytė D., AbdElgawad H., Beemster G., Asard H., Dikšaitytė A., Žaltauskaitė J., Sujetovienė G., Januškaitienė I., Juknys R. O<sub>3</sub> pollution on a future climate increases the competition between summer rape and wild mustard // *Plant Physiol. Biochem.* 2019. V. 135. P. 194–205.
66. IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, 2014.
67. Zhu C., Kobayashi K., Loladze I., Zhu J., Jiang Q., Xu X., Liu G., Seneweera S., Ebi K.L., Drewnowski A., Fukagawa N.K., Ziska L.H. Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) levels this century will alter the protein, micronutrients, and vitamin content of rice grains with potential health consequences for the poorest rice-dependent countries // *Sci. Adv.* 2018. V. 4. 8 p.

68. *Hikosaka K., Onoda Y., Kinugasa T., Nagashima H., Anten N.P.R., Hirose T.* Plant responses to elevated CO<sub>2</sub> concentration at different scales: leaf, whole plant, canopy, and population // *Ecol. Res.* 2005. V. 20. P. 243–253.
69. *Ooi M.K.J., Denham A.J., Santana V.M., Auld T.D.* Temperature threshold of physically dormant seeds and plant functional response to fire: variation among species and relative impact of climate change // *Ecol. Evolut.* 2014. V. 4. P. 656–671.
70. *Jaganathan G.K., Liu B.* Role of seed sowing time and microclimate on germination and seedling establishment of *Dodonaea viscosa* (Sapindaceae) in a seasonal dry tropical environment – an insight into restoration efforts // *Botany.* 2015. V. 93 (1). P. 23–29.
71. *Belote R.T., Weltzina J.F., Norby R.J.* Response of an understory plant community to elevated CO<sub>2</sub> depends on differential responses of dominant invasive species and is mediated by soil water availability // *New Phytol.* 2003. V. 161. P. 827–835.
72. *Tremmel D.C., Patterson D.T.* Responses of soybean and five weeds to CO<sub>2</sub> enrichment under two temperature regimes // *Can. J. Plant Sci.* 1993. V. 73. P. 1249–1260.
73. *Springer C.J., Ward J.K.* Flowering time and elevated atmospheric CO<sub>2</sub> // *New Phytol.* 2007. V. 176. P. 243–255.
74. *Wolfe D.W., Ziska L., Petzoldt C., Seaman A., Chase L., Hayhoe K.* Projected change in climate thresholds in the North eastern U.S.: implications for crops, pests, livestock, and farmers // *Mitigat. Adapt. Strat. Glob. Change.* 2008. V. 13. P. 555–575.
75. *Hyvonen T.* Impact of temperature and germination time on the success of a C<sub>4</sub> weed in a C<sub>3</sub> crop: *Amaranthus retroflexus* and spring barley // *Agric. Food Sci.* 2011. V. 20. P. 183–190.
76. *Seneweera S., Milham P., Conroy J.* Influence of elevated CO<sub>2</sub> and phosphorus nutrition on the growth and yield of a short-duration rice (*Oryza sativa* L. cv. Jarrah) // *Aust. J. Plant Physiol.* 1994. V. 21. P. 281–292.
77. *Zhu C., Zeng Q., Ziska L.H., Zhu J., Xie Z., Liu G.* Effect of nitrogen supply on carbon dioxide induced changes in competition between rice and barnyard grass (*Echinochloa crus-galli*) // *Weed Sci.* 2008. V. 56. P. 66–71.
78. *Lima M., Navarrete L., Gonzalez-Andujar J.L.* Climate effects and feedback structure determining weed population dynamics in a long-term experiment // *PLoS ONE.* 2012. V. 7:e30569.
79. *Ziska L.H., Teasdale J.R., Bunce J.A.* Future atmospheric carbon dioxide may increase tolerance to glyphosate // *Weed Sci.* 1999. V. 47. P. 608–615.
80. *Ziska L.H., Teasdale J.R.* Sustained growth and increased tolerance to glyphosate observed in a C<sub>3</sub> perennial weed, quackgrass (*Elytrigia repens*), grown at elevated carbon dioxide // *Aust. J. Plant Physiol.* 2000. V. 27. P. 159–164.
81. *Manea A., Leishman M.R., Downey P.O.* Exotic C<sub>4</sub> grasses have increased tolerance to glyphosate under elevated carbon dioxide // *Weed Sci.* 2011. V. 59. P. 28–36.
82. *Ziska L.H., Bunce J.A.* Influence of increasing carbon dioxide concentration on the photosynthetic and growth stimulation of selected C<sub>4</sub> crop and weeds // *Photosynth. Res.* 1997. V. 54. P. 199–208.
83. *Varanasi A., Prasad P.V.V., Jugulam M.* Impact of climate change factors on weeds and herbicide efficacy // *Adv. Agron.* 2015. V. 135. P. 107–146.
84. *Refatti J.P., Avila L.A., Camargo E.R., Ziska L.H., Oliveira C., Salas-Perez R., Rouse C.E., Roma-Burgos N.* High [CO<sub>2</sub>] and temperature increase resistance to Cyhalofop-Butyl in multiple-resistant *Echinochloa colona* // *Front. Plant Sci.* 2019. V. 10. Art. 529. P. 1–11.
85. *Rouse C.E., Burgos N.R., Norsworthy J.K., Tseng T.M., Starkey C.E., Scott R.C.* *Echinochloa* resistance to herbicides continues to increase in Arkansas rice fields // *Weed Technol.* 2018. V. 32. P. 34–44.
86. *Roma-Burgos N., Heap I.M., Rouse C.E., Lawton-Rauh A.L.* Evolution of herbicide-resistant weeds / Eds. Korres N.E., Burgos N.R., Duke S.O. Boca Raton, FL: CRC Press, 2019. P. 92–132.
87. *Ziska L.H.* Rising carbon dioxide and weed ecology // *Weed Biology and Management.* Dordrecht: Kluwer Publishing, 2004. P. 159–176.
88. *Patterson D.T.* Weeds in a changing climate // *Weed Sci.* 1995. V. 43. P. 685–701.
89. *Scott J.K., Murphy H., Kriticos D.J., Webber B.L., Ota N., Loebel B.* Weeds and climate change: supporting weed management adaptation. CSIRO: Australia, 2014. 73 p.
90. *Coakley S.M., Scherm H., Chakabotho S.* Climate change and plant disease management // *Ann. Rev. Phytopathol.* 1999. V. 37. P. 399–426.
91. *Poorter H., Navas M.L.* Plant growth and competition at elevated CO<sub>2</sub>: on winners, losers and functional groups // *New Phytol.* 2003. V. 157 (2). P. 175–198.
92. *Dukes J.C., Pontius J., Orwig D., Garnas J.R., Rodgers V.L., Brazee N., Cooke B., Theoharides K.A., Stange E.E., Harrington R., Ehrenfeld J., Gurevitch J., Lerdau M., Stinson K., Wick R., Ayres M.* Responses of insect pests, pathogens, and invasive plant species to climate change in the forests of northeastern North America: What can we predict? // *Can. J. For. Res.* 2009. V. 39. P. 231–248.
93. *Ziska L.H.* Climate, CO<sub>2</sub> and invasive weed management // *Invasive species and global climate change* / Eds. Ziska L.H., Dukes J.S. CABI Invasive Series, Boston: Wallingford, 2014. P. 293–305.
94. *Heap I.* The international survey of herbicide resistant weeds. [Электр. ресурс] [www.weedscience.org](http://www.weedscience.org)
95. *Karl T.R., Melillo J.M., Peterson T.C.* Global climate change impacts in the United States. A state of knowledge report from the U.S. Global Change Research program. N.Y.: Cambridge University Press, 2009. 196 p.
96. *Malik V.S., Swanton C.J., Michaels T.E.* Interaction of white bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars, row spacing, and seeding density with annual weeds // *Weed Sci.* 1993. V. 41. P. 62–68.
97. *Goldwasser Y., Lanini W.T., Wrobel R.L.* Tolerance of tomato varieties to *Lespedeza dodder* // *Weed Sci.* 2001. V. 49. P. 520–523.
98. *Juskiw P.E., Helm J.H., Salmon D.F.* Competitive ability in mixtures of small grain cereals // *Crop Sci.* 2000. V. 40. P. 159–164.

99. *Gealy D.R., Yan V.* Weed suppression potential of 'Rondo' and other indica rice germplasm lines // *Weed Techn.* 2012. V. 26. P. 517–524.
100. *Bertholdsson N.O.* Breeding spring wheat for improved allelopathic potential // *Weed Res.* 2010. V. 50. P. 49–57.
101. *Chen X.H., Hu F., Kong C.H.* Varietal improvement in rice allelopathy // *Allelopathy J.* 2008. V. 22. P. 379–384.
102. *Pheng S., Olofsdotter M., Jahn G., Nesbitt H., Adkins S.* Potential allelopathic rice lines for weed management in Cambodian rice production // *Weed Biol. Manag.* 2009. V. 9. P. 259–266.
103. *Kong C.H., Chen X.H., Hu F., Zhang S.Z.* Breeding of commercially acceptable allelopathic rice cultivars in China // *Pest. Manag. Sci.* 2011. V. 67. P. 1100–1106.
104. *Gealy D.R., Moldenhauer K.A., Jia M.H.* Field performance of STG06L-35-061, a new genetic resource developed from crosses between weed-suppressive indica rice and commercial southern U.S. long-grains // *Plant Soil.* 2013. V. 370. P. 277–293.
105. *Worthington M., Reberg-Horton S.C.* Breeding cereal crops for enhanced weed suppression: optimizing allelopathy and competitive ability // *J. Chem. Ecol.* 2013. V. 39. P. 213–231.
106. *Assefa Y., Staggenborg S.A., Prasad V.P.V.* Grain sorghum water requirement and responses to drought stress: a review // *Online. Crop Manag.* 2010. V. 9 (1). <https://doi.org/10.1094/CM-2010-1109-01-RV>
107. *Schittenhelm S., Schroetter S.* Comparison of drought tolerance of sweet sorghum and sorghum-sudangrass hybrids // *J. Agron. Crop Sci.* 2014. V. 200. P. 46–53.
108. *Waltz E.* Beating the heat // *Nat. Biotechnol.* 2014. V. 32. P. 610–613.
109. *Cerqueira F.B., Erasmo E.A.L., Silva J.I.C., Nunes T.V., Carvalho G.P., Silva A.A.* Competition between drought-tolerant upland rice cultivars and weeds under water stress condition // *Planta Daninha.* 2013. V. 31 (2). P. 291–302.
110. *Matloob A., Khaliq A., Chauhan B.S.* Weeds of rice in Asia: problems and opportunities // *Adv. Agron.* 2015. V. 130. P. 291–336.
111. *Chauhan B.S., Prabhjot-Kaur M.G., Randhawa R.J., Singh H., Kang M.S.* Global warming and its possible impact on agriculture in India // *Adv. Agron.* 2014. V. 123. P. 65–121.
112. *Ziska L.H., McConnell L.L.* Climate change, carbon dioxide, and pest biology: monitor, mitigate, management // *J. Agric. Food Chem.* 2015. V. 64. P. 6–12.
113. *Кошкин Е.И., Гусейнов Г.Г.* Экологическая физиология сельскохозяйственных культур. М.: Изд-во "Проспект", 2020. 576 с.
114. *Martinez D.A., Loening U.E., Graham M.C.* Impacts of glyphosate-based herbicides on disease resistance and health of crops: a review // *Environ. Sci. Europe.* 2018. V. 30. № 2. 14 p.

## Response of Weeds in the Canopy to Climate Change

**E. I. Koshkin<sup>a,#</sup>, I. V. Andreeva<sup>a</sup>, G. G. Guseinov<sup>b</sup>,  
K.G. Guseinov<sup>c</sup>, and F. S.-U. Dzhaliyov<sup>a</sup>**

<sup>a</sup> *Russian State Agrarian University—Moscow Timiryazev Agricultural Academy  
Timiryazevskaya ul. 49, Moscow 127550, Russia*

<sup>b</sup> *Group of Companies HH group  
shosse Khyrdalan-Binagadi 34N, AZ1102 Baku, Republic of Azerbaijan*

<sup>c</sup> *Institute of Crop Protection and Industrial Crops  
Aziza Alieva str. 91, AZ1100 Gyanja, Republic of Azerbaijan*

<sup>#</sup> *E-mail: ekoshkin@rgau-msha.ru*

Response of different species (life forms) of weeds in a canopy to elevated concentrations of CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, rates UV-B in a combination with increased air temperatures as well as water and mineral nutrition supply is discussed in the review. Effects of the above factors on crop – weed competitiveness and its relationship to possible changes in herbicides use efficiency against weeds are analyzed.

*Key words:* weeds, weed – crop competitiveness, crop protection against weeds, herbicides, climate change.