

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 6, 2021

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Плодородие почв

Баланс элементов питания дерново-подзолистой почвы в льняном севообороте <i>Н. Н. Кузьменко</i>	3
Взаимовлияние калия и магния при выращивании картофеля на серой лесной почве <i>В. Н. Якименко</i>	8
Микроэлементы в межгорно-котловинных агроландшафтах Горного Алтая <i>О. А. Ельчианинова, А. В. Пузанов, Т. А. Рождественская, С. Я. Двуреченская</i>	16

Удобрения

Агроэкологическая оценка применения органо-минерального удобрения за ротацию полевого севооборота на деградированной дерново-подзолистой почве <i>А. И. Иванов, Ж. А. Иванова</i>	28
--	----

Регуляторы роста растений

Влияние состава питательных сред и регуляторов роста при клональном микроразмножении некоторых хозяйственно ценных представителей рода <i>Rubus</i> L. <i>Д. Н. Зонтиков, С. А. Зонтикова, К. В. Малахова</i>	36
--	----

Пестициды

Вредоносность саранчовых сохраняется благодаря сформированной резистентности в их популяциях к инсектицидам <i>А. Ю. Олейников, В. Г. Коваленков, О. В. Кузнецова</i>	43
Контроль остаточных количеств пестицидов в объектах окружающей среды <i>А. А. Данилова</i>	49

Агроэкология

Содержание и распределение йода и фтора в почвах Ишимской степи <i>Г. А. Конарбаева, Е. Н. Смоленцева, Ю. В. Кравцов</i>	57
Влияние цианобактерий и лигногумата на рост и биохимические показатели растений ячменя <i>Е. В. Коваль, С. Ю. Огородникова</i>	65
Влияние размера фитомассы различных предшественников и содержания в ней калия на урожайность люцерны <i>Е. Н. Пакина, Г. Н. Гасанов, Т. А. Асварова</i>	73

Экотоксикология

Оценка воздействия меди на проростки сортов ярового двурядного ячменя (<i>Hordeum vulgare</i> L.) различного географического происхождения <i>А. В. Дикарев, В. Г. Дикарев, Н. С. Дикарева</i>	79
--	----

ИСТОРИЯ НАУКИ

120 лет со дня рождения Е.Н. Мишустина (1901–1991) <i>А. М. Семенов, В. Н. Кудяров</i>	91
---	----

КРИТИКА И БИБЛИОГРАФИЯ

Джукич Д.А., Семенов А.М., Лутовац М.В., Мандич Л.Г., Иутинская Г.А., Подгорский В.С. Почвенные экосистемы – загрязнение и очистка. Сербия, Нови Сад: Крагуевацкий ун-т, фак-т агрономии в Чачаке, Балканский НЦ РАЕН, изд-во “SAJNOS” ДОО, 2020. ISBN 978-86-87611-77-1 (AFC). 628 с. <i>Ю. Я. Спиридонов</i>	93
---	----

ЮБИЛЕИ

80 лет со дня рождения В.И. Кирюшина	95
--------------------------------------	----

Contents

No. 6, 2021

EXPERIMENTAL ARTICLES

Soil Fertility

- Balance of Nutrition Elements on Sod-Podzolic Soil in Flax Crop Rotation
N. N. Kuzmenko 3
- Interaction of Potassium and Magnesium in Cultivation of Potatoes on Gray Forest Soil
V. N. Yakimenko 8
- Microelements in Agrolandscapes of Altai Intermountain Basins
O. A. Elchininova, A. V. Puzanov, T. A. Rozhdestvenskaya, S. Ya. Dvurechenskaya 16

Fertilizers

- Agroecological Evaluation of Organic-Mineral Fertilizer for One Rotation of a Field Crop Rotation in Degraded Sod-Podzolic Soil
A. I. Ivanov, Zh. A. Ivanova 28

Plant growth regulators

- Influence of the Composition of Nutrient Media and Growth Regulators during Clonal Micropropagation of Some Economically Valuable Representatives of the Genus *Rubus* L.
D. N. Zontikov, S. A. Zontikova, K. V. Malahova 36

Pesticides

- Harmfulness of Locusts Is Preserved Due to the Formed Resistance in Their Populations to Insecticides
A. Yu. Oleynikov, V. G. Kovalenkov, O. V. Kuznetsova 43
- Control of Pesticide Residuals in the Environment
A. A. Danilova 49

Agroecology

- Content and Distribution of Iodine and Fluorine in the Soils of the Ishim Steppe
G. A. Konarbaeva, E. N. Smolentseva, Yu. V. Kravtsov 57
- Investigation of the Influence of Cyanobacteria and Lignohumate on the Life of Barley Plants
E. V. Koval, S. Yu. Ogorodnikova 65
- Influence of the Size of the Phytomass of Various Precursors and the Content of Potassium in It on the Yield of Alfalfa
E. N. Pakina, G. N. Hasanov, T. A. Asvarova 73

Ecotoxicology

- Assessment of Copper Influence to the Spring Barley (*Hordeum vulgare* L.) Variants Seedlings of Different Geographical Origin
A. V. Dikarev, V. G. Dikarev, N. S. Dikareva 79

HISTORY OF SCIENCE

- 120 Years since the Birth of E.N. Mishustin (1901–1991)
A.M. Semenov 91

CRITIQUE AND BIBLIOGRAPHY

- Djukich D.A., Semenov A.M., Lutovats M.V., Mandich L.G., Iutinskaya G.A., Podgorsky V.S. Soil ecosystems-pollution and purification. Serbia, Novi Sad: Kragujevac University, Fac-t agronomy in Cacak, Balkan Research Center of the Russian Academy of Sciences, SAJNOS Publishing House UNTIL, 2020. ISBN 978-86-87611-77-1 (AFC). 628 pp.
Yu. Ya. Spiridonov 93

ANNIVERSARIES

- 80 Years since the Birth of V.I. Kiryushin 95
-

БАЛАНС ЭЛЕМЕНТОВ ПИТАНИЯ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ В ЛЬНЯНОМ СЕВООБОРОТЕ¹

© 2021 г. Н. Н. Кузьменко

Федеральный научный центр лубяных культур –
обособленное подразделение Научно-исследовательский институт льна
172002 Торжок, Тверская обл., ул. Луначарского, 35, Россия

E-mail: kuzmenko.nataliya2010@mail.ru

Поступила в редакцию 04.12.2020 г.

После доработки 17.01.2021 г.

Принята к публикации 11.03.2021 г.

В стационарном опыте на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве в 7-польном льняном севообороте в 2012–2018 гг. изучили баланс элементов питания в почве при разной насыщенности льняного севооборота органическими и минеральными удобрениями. Приведены данные изменения показателей баланса питательных веществ, их содержания в почве, продуктивности при применении в севообороте органической, минеральной, органо-минеральной систем удобрения в 9-й ротации. Показано, что положительный баланс питательных веществ обеспечило применение органо-минеральной системы удобрения при сочетании навоза 5.7 т с минеральными удобрениями (NPK)170 на 1 га севооборотной площади. Среднегодовая доза составила N70P61.4K118.6. Интенсивность баланса азота была равна 117, фосфора – 180 и калия – 111%, среднегодовая продуктивность севооборота – 41.9 ц з.е./га, окупаемость 1 кг NPK – 5.5 кг зерновых единиц.

Ключевые слова: дерново-подзолистая почва, система удобрения, баланс питательных веществ, льняной севооборот.

DOI: 10.31857/S0002188121060089

ВВЕДЕНИЕ

В условиях дерново-подзолистых почв России урожайность сельскохозяйственных культур в значительной степени определяется уровнем плодородия почвы и применением удобрений. Применение органических и минеральных удобрений наряду с влиянием на общий уровень урожайности является наиболее существенным фактором, способствующим сохранению и повышению плодородия почв. В современных условиях ведения сельского хозяйства при дефиците удобрений и их высокой стоимости сохранение плодородия почв довольно проблематично [1–4].

Существенное значение при оценке систем удобрения и показателей плодородия почв принадлежит определению баланса питательных веществ в почве. Величина потребления и потерь питательных веществ зависит от гранулометрического состава почвы, вида, доз, сроков применения удобрений, от агротехнических приемов воз-

делывания культуры, погодных и ряда других условий [2, 5].

Современные требования к оптимальным показателям баланса дифференцированы в зависимости от уровня плодородия почв. Для азота необходимо поддерживать интенсивность баланса на уровне 80–110%, интенсивность баланса фосфора при низком его содержании в почве – не менее 200, при среднем – 150, при высоком и очень высоком – 80–100%, для калия при низком содержании в почве – 130–150, при среднем – 110–130, повышенном – 80–100% [6]. При разработке системы удобрения в льняном севообороте важно определить оптимальную насыщенность севооборота органическими и минеральными удобрениями, обеспечивающую бездефицитный баланс элементов питания и сохранение плодородия почвы.

В связи со снижением уровня почвенного плодородия возникает необходимость периодического уточнения приходных и расходных статей баланса элементов питания, требует получения информации, необходимой для прогноза изменения уровня плодородия почвы во времени, а также разработки рациональных систем удобрения

¹ Работа выполнена по Госзаданию № 075-00853-19-00 и финансовой поддержке Минобрнауки.

Таблица 1. Схема стационарного опыта

Вариант, №	Система удобрения	Удобрения за ротацию севооборота	НПК, кг д.в./га севооборотной площади
1	Без удобрения (контроль)	0	0
2	Органическая система — навоз 11.4 т/га	Навоз 80 т/га	150
3	Минеральная система — (НПК)150 эквивалентно дозе навоз 11.4 т/га	N400P200K480	150
4	Органо-минеральная система — навоз 5.7 т/га + (НПК)77 эквивалентно дозе навоз 11.4 т/га	Навоз 40 т/га + N200P100K240	150
5	Органо-минеральная система — навоз 5.7 т/га + (НПК)120	Навоз 40 т/га + N200P250K400	200
6	Органо-минеральная система — навоз 5.7 т/га + (НПК)170	Навоз 40 т/га + N300P350K540	250

для его сохранения, что возможно оценить только в длительных опытах [4, 7, 8].

Цель работы — изучить баланс элементов питания в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве при разной насыщенности льняного севооборота органическими и минеральными удобрениями.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в длительном стационарном опыте, заложенном в 1948 г. на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве на базе опытного поля ФНЦ ЛК в Тверской обл. Чередование культур в севообороте следующее: пар чистый — озимая рожь с подсевом многолетних трав (клевер красный и тимopheевка) — многолетние травы 1-го года пользования — многолетние травы 2-го года пользования — лен-долгунец — ячмень — овес. В 9-й ротации севооборота (2012–2018 гг.) изучали влияние систем удобрения (органической, минеральной, органо-минеральной), эквивалентных по количеству элементов питания за севооборот (150 кг д.в./га) и влияние насыщенности севооборота органическими и минеральными удобрениями (200 и 250 кг д.в./га) на показатели плодородия почвы и продуктивность севооборота. Схема опыта представлена в табл. 1.

В опыте использовали навоз крупного рогатого скота (**Нав**) состава: N — 0.50, P₂O₅ — 0.25, K₂O — 0.60%, который вносили в пару под озимую рожь. Минеральные удобрения вносили под все культуры севооборота в рекомендованных дозах. Общая площадь делянки составляла 72 м², учетная — 36 м², повторность трехкратная.

Возделывание культур в севообороте проводили согласно рекомендованной для данной зоны технологии возделывания. Технологические про-

цессы по выращиванию и уборке осуществляли с максимальным использованием серийных машин и оборудования. Наблюдения и исследования в опыте, химические анализы почвы и растений осуществляли в соответствии с методическими указаниями [9–11] и ГОСТ 26204-84-ГОСТ 26213-84 [12].

Для обоснования наиболее эффективных систем удобрения в 9-й ротации севооборота на основании урожайности и химического состава полученной продукции был рассчитан хозяйственный баланс НПК. В приходной части учитывали поступление элементов питания с удобрениями, в расходной — их вынос основной и побочной продукцией.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Показано, что возделывание культур без применения удобрений привело к дефициту азота в почве в размере 33.2, фосфора — 14.6 и калия — 37.5 кг/га. Продуктивность севооборота была самой низкой — 22.7 ц з.е./га. Применение систем удобрения, эквивалентных по количеству внесенных за севооборот элементов питания (150 кг д.в./га севооборотной площади или среднегодовая доза N57.1P28.6K68.6), обеспечило слабоположительный и близкий между собой баланс азота и фосфора. Баланс калия был отрицательным, с наибольшим дефицитом (–36.9 кг/га) отметили при применении органо-минеральной системы удобрения, при которой получили наиболее высокую продуктивность — 40.3 ц з.е./га, на 1.4 и 3.7 ц з.е./га больше ($HCP_{05} = 3.6$), чем при органической и минеральной системах удобрения. Более высокая урожайность культур при применении органо-минеральной системы удобрения была получена не только за счет удобрений, но и за счет почвенного плодородия. Вынос калия куль-

Таблица 2. Дозы удобрений и хозяйственный баланс элементов питания в 9-й ротации при разной насыщенности севооборота удобрениями

№	Вариант	Среднегодовое внесение удобрений, кг/га			Средневзвешенный ежегодный вынос, кг/га			Среднегодовой баланс, $\pm$ кг/га			Интенсивность баланса, %		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
1	Без удобрения	0	0	0	33.2	14.6	37.5	-33.2	-14.6	-37.5	0	0	0
2	Нав 11.4 т/га	57.1	28.6	68.6	56.5	27.4	91.4	+0.6	+1.1	-22.8	101	104	75
3	(NPK)150 эквивалентно дозе навоз 11.4 т/га	57.1	28.6	68.6	55.1	27.2	80.5	+2.0	+1.3	-11.9	104	105	85
4	Нав 5.7 т/га + (NPK)77 эквивалентно дозе навоз 11.4 т/га	57.1	28.6	68.6	58.3	27.7	105.5	-1.2	+1.0	-36.9	98	103	65
5	Нав 5.7 т/га + (NPK)120 = 200 кг д.в.	57.1	50.0	95.7	66.0	32.0	112.4	-8.9	+18.0	-16.7	86	156	85
6	Нав 5.7 т/га + (NPK)170 = 250 кг д.в.	70.0	61.4	118.6	59.7	34.2	107.2	+10.3	+27.2	+11.4	117	180	111

Таблица 3. Влияние разных систем удобрения на содержание элементов питания в почве и продуктивность льняного севооборота в 9-й ротации

Вариант	Содержание P ₂ O ₅ (по Кирсанову)		Содержание K ₂ O (по Кирсанову)		Продуктивность севооборота, ц. з.е./га	Окупаемость 1 кг NPK, кг з.е.
	мг/кг					
	2011 г.	2018 г.	2011 г.	2018 г.		
1	81	82	66	51	22.7	—
2	278	281	166	139	38.9	7.1
3	144	167	124	121	36.6	5.6
4	199	223	178	123	40.3	8.1
5	295	320	203	199	42.4	7.1
6	272	289	167	214	41.9	5.5
НСП ₀₅	20		62		3.6	

турами севооборота с урожаем в этом варианте составил 105.5 кг/га/год, в 1.5 раза больше, чем внесли с удобрениями (68.6 кг д.в./га). Его содержание в почве за ротацию 7-польного севооборота (с 2011 до 2018 г.) снизилось на 55 мг/кг (табл. 2, 3).

Повышение доз удобрений при органо-минеральной системе обеспечило большую продуктивность севооборота — 42.4 и 41.9 ц з.е./га и одновременно более высокий вынос питательных веществ урожаем. Применение в севообороте навоза 5.7 т/га в сочетании с минеральными удобрениями в дозе 120 кг д.в./га севооборотной площади (среднегодовая доза N57.1P50K95.7) обеспечило положительный баланс фосфора — +18.0 кг/га, увеличение его содержания в почве на 25 мг/кг при дефиците азота — 8.9 и калия — 18.1 кг/га (интенсивность баланса 156, 86 и 85%).

Положительный баланс всех элементов питания: азота — +10.3, фосфора — +27.3 и калия — +11.4 кг/га (интенсивность баланса 117, 180 и 111%) получили при самой высокой насыщенности севооборота удобрениями: навоз 5.7 т/га + +170 кг д.в. в форме минеральных удобрений/га севооборотной площади (среднегодовая доза N70P61.4K118.6).

Данные интенсивности баланса, полученные в нашем опыте для азота и калия, близки к рекомендуемым другими авторами для льняных севооборотов. Например, интенсивность баланса азота рекомендуется поддерживать на уровне 100—130, фосфора — 120—150 и калия — 105—120% [8, 13]. Интенсивность баланса фосфора в нашем исследовании была более высокой.

Применение данной насыщенности севооборота удобрениями позволило увеличить в почве содержание подвижного фосфора за 9-ю ротацию с 272 до 289 (на 17) мг/кг, содержание калия — со 167 до 214 (на 47) мг/кг. Только в этом варианте сложился положительный баланс калия. Продуктивность севооборота в сравнении с вариантом 5, где насыщенность была меньше, имела тенденцию к снижению с 42.4 до 41.9 ц з.е./га, окупаемость удобрений снизилась с 7.1 до 5.5 кг з.е.

Рост продуктивности в севообороте сопровождался большим выносом элементов питания. Отрицательный баланс калия в льняном севообороте объясняется наиболее высоким его выносом культурами севооборота. В среднем в удобренных вариантах вынос калия превосходил вынос азота в 1.7 раза, фосфора — в 3.3 раза (табл. 2).

Примененные в севообороте дозы азота 57.1 кг д.в./га (варианты 2–5) обеспечили его баланс в почве от слабо отрицательного (–8.9) до слабо положительного (+2.0 кг/га). Только в одном варианте при применении среднегодовой дозы N70 (вариант 6) получили положительный его баланс в размере +10.3 кг/га. Интенсивность баланса составила 117%.

Небольшой дефицит азота в почве можно допустить, учитывая, что в севообороте в течение 2-х лет возделываются многолетние травы (клевер красный и тимофеевка). При средней урожайности сена 47 ц/га после уборки в почве оставалось в среднем такое же количество органических остатков (46 ц/га) в виде стерни и корней. Растительные остатки многолетних трав содержат: азота — 1.05–2.25, фосфора — 0.33–0.57, калия — 1.09–2.50%. С ними в почву поступало: азота — 48.3–103.5, фосфора — 15.2–26.2 и калия — 50.1–115 кг/га.

Баланс фосфора при применении в севообороте дозы 28.6 кг д.в./га (варианты 2–4) можно было определить как уравновешенный. Интенсивность баланса 103–105%. Повышение дозы фосфора до 50 и 61.4 кг д.в./га (варианты 5 и 6) обеспечило его положительный баланс в размере +18.0 и +27.2 кг/га соответственно, интенсивность увеличилась до 156 и 180%, содержание элемента в почве повысилось на 25 и 17 мг/кг и было в пределах ошибки опыта.

Отрицательный баланс калия практически во всех вариантах опыта свидетельствовал о том, что высокий уровень продуктивности севооборота достигнут за счет использования его из почвы, т.е. за счет почвенного плодородия. Примененные в севообороте дозы калия 68.6 и 95.7 кг д.в./га (варианты 2–5) были недостаточными для сохране-

ния его почвенных запасов. За ротацию севооборота содержание калия в почве при применении данных доз удобрений снизилось в среднем на 22.5 мг/кг (табл. 3). Положительный баланс калия +11.4 кг/га и прирост его содержания на 47 мг/кг получили при применении дозы K118.6 (вариант 6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сохранение запасов питательных веществ в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве с очень высоким содержанием подвижного фосфора и повышенным содержанием калия в 7-польном льняном севообороте обеспечило применение органо-минеральной системы удобрения при сочетании навоз 5.7 т/га + 170 кг д.в. в форме минеральных удобрений/га севооборотной площади. Среднегодовая доза составила N70P61.4K118.6. Баланс элементов питания в почве составил: азота — +10.3, фосфора — +27.2 и калия — +11.4 кг/га в год при интенсивности 117, 180 и 111% соответственно. Среднегодовая продуктивность севооборота составила 41.9 ц з.е./га, окупаемость 1 кг NPK — 5.5 кг зерновых единиц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Чекмарев П.А.* Состояние плодородия почв и мероприятия по его повышению в 2012 г. // *Агрохим. вестн.* 2012. № 1. С. 2–4.
2. *Сычев В.Г., Шафран С.А.* О балансе питательных веществ в земледелии России // *Плодородие.* 2017. № 1. С. 1–4.
3. *Лана В.В.* Повышение плодородия почв и эффективности применения удобрений — основные приоритеты в развитии агрохимических исследований (на примере республики Беларусь) // *Плодородие.* 2019. № 3. С. 3–6.
4. *Kosolapova A., Yamaltdinova V., Mitrofanova E., Fomin D., Teterlev I.* Yields of field crops and sod-podzolic soil fertility of west Ural depending on fertilizer system // *Bulgar. J. Agricult. Sci.* 2016. V. 22. № 3. P. 381–385.
5. *Жуков Ю.П.* Агроэкологическая оценка различных удобрений в адаптивно-ландшафтных системах земледелия // *Агро XXI.* 2008. № 1–3. С. 37–39.
6. *Державин Л.М.* Научно-методологические основы проектирования применения удобрений в ресурсосберегающих технологиях // *Плодородие.* 2011. № 3. С. 19–22.
7. *Семендяева Н.В.* Влияние длительного применения удобрений на свойства дерново-подзолистой почвы таежной зоны западной Сибири // *Агрохимия.* 2010. № 3. С. 3–11.
8. *Горбылева А.И., Горелько Н.М.* О принципах планирования системы удобрения в севооборотах // *Всероссийский конф. "Почвенно-агрохимические и биологические проблемы формирования высокопродуктивных агроценозов"*. Тез. докл. Пушкино, 1988. С. 195–197.

9. Методические указания по проведению исследований в длительных опытах с удобрениями. Ч. 1. М.: ВАСХНИЛ, 1986. 146 с.
10. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М.: Колос, 1979. 415 с.
11. Методические указания по проведению агрохимических исследований со льном-долгунцом. М.: ВАСХНИЛ, 1972. 49 с.
12. ГОСТ 26204-84 — ГОСТ 26213-84. Почвы. Методы анализа. М.: Изд-во стандартов, 1984. 54 с.
13. Петрова Л.И. Эффективный баланс азота, фосфора и калия в льняном севообороте (для льноводных хозяйств Нечерноземной зоны России) // Информ. листок № 60—92. Тверь: Тверской ЦНТИ, 1992.

Balance of Nutrition Elements on Sod-Podzolic Soil in Flax Crop Rotation

N. N. Kuzmenko^{a, #}

^a Federal Scientific Center of Bast-Fiber Crops Breeding,
ul. Lunacharskogo 35, Tver district, Torzhok 172002, Russia

[#] E-mail: kuzmenko.nataliya2010@mail.ru

In a stationary experiment on sod-podzolic light loamy soil in a 7-field flax crop rotation in 2012–2018, the balance of nutrients in the soil was studied at different saturation of the flax crop rotation with organic and mineral fertilizers. The data on changes in the indicators of the balance of nutrients, their content in the soil, and productivity when using organic, mineral, and organo-mineral fertilizer systems in the 9th rotation in the crop rotation are presented. It is shown that a positive balance of nutrients was provided by the use of an organo-mineral fertilizer system when combining 5.7 tons of manure with mineral fertilizers (NPK) 170/ha of crop rotation area. The average annual dose was N70P61.4K118.6. The intensity of the nitrogen balance was equal to 117, phosphorus — 180 and potassium — 111%, the average annual crop rotation productivity was 41.9 c g.u./ha, the payback of 1 kg of NPK was 5.5 kg of grain units.

Key words: sod-podzolic soil, fertilizer system, nutrient balance, flax crop rotation.

631.416.4/.8:633.491:631.445.25

ВЗАИМОВЛИЯНИЕ КАЛИЯ И МАГНИЯ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ КАРТОФЕЛЯ НА СЕРОЙ ЛЕСНОЙ ПОЧВЕ

© 2021 г. В. Н. Якименко

*Институт почвоведения и агрохимии СО РАН
630090 Новосибирск, просп. Лаврентьева, 8/2, Россия*

E-mail: yakimenko@issa-siberia.ru

Поступила в редакцию 26.11.2020 г.

После доработки 09.12.2020 г.

Принята к публикации 11.02.2021 г.

На серой лесной среднесуглинистой почве показаны изменения продуктивности картофеля, особенности потребления им калия и магния при совместном использовании различных доз калийных и магниевых удобрений (на фоне NP); рассчитан вынос и баланс этих элементов. Установлена специфика взаимовлияния калия и магния при совместном внесении в почву на почвенное содержание их легкообменной и обменной форм.

Ключевые слова: агроценоз, почва, картофель, удобрения, калий, магний.

DOI: 10.31857/S0002188121050136

ВВЕДЕНИЕ

Калий и магний выполняют ряд существенных физиологических функций в растительном организме и являются важными и незаменимыми элементами минерального питания растений. Общие запасы калия и магния в большинстве минеральных почв довольно значительны, и зависят прежде всего от их минералогического и гранулометрического состава, а также типа почвообразования. По обобщенным литературным данным, валовое содержание калия в почвах земледельческой зоны умеренного пояса в среднем составляет 1.5–2.5% [1–3], магния – 0.5–1.5% [4, 5]. Относительно высокое валовое содержание калия и магния в основных пахотных почвах при достаточно равномерном распределении по почвенному профилю служит зачастую обоснованием для невнимания к регулированию режима этих элементов в агроценозах. Однако уже достаточно давно в научной печати сообщается о нарастающем истощении фонда калия и магния в агропочвах не только легкого, но и более тяжелого гранулометрического состава [1, 2, 6–14]; эти процессы значительно усиливаются в интенсивных агроценозах. В этой связи исследования по изучению трансформации калийного и магниевых состояний почв при их сельскохозяйственном использовании представляются достаточно актуальными.

Для эффективного регулирования минерального питания выращиваемых культур необходимо знать и учитывать специфику взаимовлияния

отдельных элементов, в т.ч. калия и магния, в системе почва–растение. В ряде проведенных ранее научных работ [5–7, 9, 12–18] установлено антагонистическое в целом взаимодействие между одновалентными катионами H^+ , NH_4^+ , K^+ , с одной стороны, и Ca^{2+} и Mg^{2+} , с другой, в почвенных процессах адсорбции–десорбции и при поглощении этих элементов растениями из почв и удобрений. В то же время показано, что в зависимости от абсолютного количества определенных ионов в почвенном растворе и их соотношения между ними могут возникать как явления антагонизма, так и синергизма [19]. В опытах, по мере увеличения концентрации калия в питательном растворе при невысоком исходном его содержании, поглощение растениями кальция сначала значительно ускорялось (синергизм), затем замедлялось и далее резко уменьшалось (антагонизм) [19].

Особенности взаимовлияния отдельных элементов могут кардинально меняться в зависимости от действия различных факторов. Установлено, что на характер взаимодействия K и Mg, их эффективность, существенное влияние оказывают условия внешней среды, вид и даже сорт выращиваемой культуры [5–9, 12–14, 19–21].

В целом можно сказать, что имеющиеся литературные данные по взаимовлиянию калия и магния в процессе выращивания сельскохозяйственных растений не всегда однозначны. Вероятно, это связано с различиями почвенно-климатиче-

Таблица 1. Урожайность картофеля в микрополевом опыте на серой лесной почве, кг/делянку

Вариант	Клубни				Ботва			
	2018 г.	2019 г.	2020 г.	среднее	2018 г.	2019 г.	2020 г.	среднее
1. Без удобрений	0.53	0.44	0.37	0.45	0.18	0.13	0.14	0.15
2. NP	0.75	0.57	0.49	0.60	0.29	0.29	0.33	0.30
3. NP + K-1	0.87	0.81	0.72	0.81	0.32	0.34	0.47	0.38
4. NP + K-1 + Mg-1	1.01	0.89	0.81	0.90	0.44	0.32	0.48	0.41
5. NP + K-1 + Mg-2	0.78	0.78	0.70	0.75	0.28	0.38	0.52	0.39
6. NP + K-2	0.92	0.83	0.76	0.84	0.37	0.33	0.52	0.41
7. NP + K-2 + Mg-1	0.94	0.82	0.76	0.84	0.35	0.34	0.47	0.39
8. NP + K-2 + Mg-2	0.76	0.73	0.73	0.74	0.34	0.33	0.46	0.38
HCP ₀₅	0.11	0.13	0.12	0.11	0.10	0.06	0.07	0.08

Примечание. Нумерация вариантов та же в табл. 2, 3.

ских условий проведения исследований, варьированием вносимых доз удобрений, биологическими особенностями возделываемых культур. Учитывая важность оптимизации режима калия и магния в агроценозах, проведение дальнейших исследований по этой проблематике с учетом региональной специфики является целесообразным.

Цель работы – в полевом опыте на серой лесной почве оценить эффективность совместного внесения калия и магния на урожайность картофеля, содержание этих элементов в растительной продукции и почве.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Микрополевым опытом на серой лесной среднесуглинистой старопашотной почве проводили в 2018–2020 гг. на научно-исследовательском стационаре ИПА СО РАН (Новосибирская обл., Искитимский р-н). В опыте использовали почву с однородными агрохимическими свойствами: содержание обменного калия (1 М $\text{CH}_3\text{COONH}_4$) перед закладкой опыта составляло 10.2, обменного магния – 7.3 мг/100 г почвы. Каждая делянка размером 0.5 × 0.5 м для максимального снижения влияния соседних вариантов и окружающей почвы была изолирована по периметру полиэтиленовой пленкой до глубины 0.4 м (до горизонта В). На каждой делянке выращивали одно растение картофеля сорта Джелли, клубни перед посадкой тщательно калибровали.

Схема опыта показана в табл. 1, повторность пятикратная. Дозы макроэлементов составляли (г д.в./делянку): N – 2.5, P – 1.5, K-1 – 2.5, K-2 – 3.8, Mg-1 – 1.25, Mg-2 – 2.5. Удобрения в форме аммонийной селитры, двойного суперфосфата, хлористого калия и окиси магния вносили ежегодно перед посадкой клубней. В пересчете на кг д.в./га использованные в опыте дозы примерно были

равны: N – 100, P – 60, K-1 – 100, K-2 – 150, Mg-1 – 50, Mg-2 – 100. В ранее проведенных исследованиях [2, 22] в расположенном рядом полевым опыте с картофелем на аналогичной почве доза NPK-1 была установлена как оптимальная.

Почвенные и растительные образцы на анализ отбирали во время уборки урожая и анализировали стандартными, общепринятыми методами [23, 24]. Содержание элементов в растительной продукции определяли после мокрого озоления по Гинзбург. Почвенные формы калия и магния экстрагировали: легкообменную – вытяжками 0.0025 М и 0.025 М раствора CaCl_2 , обменную – 1 М $\text{CH}_3\text{COONH}_4$, подвижный Mg – 1 М KCl и определяли их содержание в вытяжках на атомно-абсорбционном спектрометре “Квант-2А”.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Различная интенсивность применения минеральных удобрений в вариантах опыта соответствующим образом отразилась на продуктивности картофеля (табл. 1). В контрольном варианте продуктивность растений лимитировалась дефицитом всех макроэлементов, в фоновом – калия и магния. Очевидно, что почвенные запасы этих элементов не обеспечивали полноценный рост и развитие картофеля. Наивысшая в опыте урожайность была получена в варианте с оптимизированным минеральным питанием (NP + K-1 + Mg-1), особенно отчетливо это проявилось в первый год проведения опыта в условиях отсутствия какого-либо последствия ранее внесенных удобрений. Совместное применение калия и магния в таких дозах и соотношении (на фоне NP) обеспечивало полноценный продукционный процесс картофеля, повышая эффективность использования NP.

Таблица 2. Содержание сухого вещества и макроэлементов в картофеле в зависимости от уровня минерального питания, % (средние за 3 года)

Вариант, №	Клубни					Ботва				
	сухое вещество	К	Mg	N	P	сухое вещество	К	Mg	N	P
1	24.5	1.45	0.032	0.79	0.46	15.8	0.66	0.17	0.94	0.31
2	23.3	1.16	0.036	1.15	0.54	15.8	0.42	0.17	1.12	0.39
3	23.5	1.57	0.046	1.33	0.45	14.2	0.78	0.17	1.20	0.39
4	23.5	1.56	0.046	1.36	0.42	14.3	0.82	0.18	1.22	0.38
5	23.0	1.50	0.050	1.35	0.47	14.0	0.96	0.20	1.14	0.37
6	23.0	1.68	0.050	1.35	0.43	14.2	0.86	0.16	1.26	0.35
7	23.3	1.64	0.052	1.36	0.46	13.9	1.12	0.16	1.34	0.33
8	23.2	1.60	0.058	1.28	0.47	13.7	1.40	0.16	1.24	0.32
<i>HCP</i> ₀₅	1.4	0.12	0.009	0.26	0.08	0.9	0.37	0.02	0.23	0.06

Внесение повышенной дозы магния (Mg-2) дополнительно к NP + K-1 обесценивало действие и калия, и самого магния – урожайность клубней снижалась практически до уровня варианта NP. При относительном увеличении концентрации магния в почвенном растворе его взаимодействие с калием стало носить явно антагонистический характер.

Повышение дозы внесенного калия в варианте NP + K-2 сопровождалось тенденцией к росту урожайности картофеля по сравнению с вариантом NP + K-1, т.е. увеличение уровня калийного питания (в данном интервале) в целом положительно влияло на растения. Однако дополнительное внесение магния на повышенном калийном фоне не оказывало видимого воздействия на продуктивность картофеля – урожайность клубней в вариантах NP + K-2 и NP + K-2 + Mg-1 была одинаковой. Очевидно, что повышенный фон калия затруднял магниевое питание картофеля. При этом дальнейшее увеличение дозы магния в варианте NP + K-2 + Mg-2 привело лишь к снижению эффективности продукционного процесса растений.

Биомасса ботвы картофеля, в отличие от клубней, мало зависела от уровня калийно-магниевого питания (табл. 1); во всех вариантах NPK и NPK-Mg она была примерно одинаковой и по продуктивности, и по внешнему виду. Следовательно, все особенности влияния калия и магния на рост и развитие растений отражались главным образом на запасующих и репродуктивных органах и в значительно меньшей степени – на вегетативных органах.

Уровень минерального питания картофеля оказывал влияние на поступление макроэлементов в растительную продукцию (табл. 2). Содержание калия в картофеле хорошо отражало уро-

вень его калийного питания, устойчиво возрастая и в ботве, и в клубнях в ряду вариантов NP → NP + K-1 → NP + K-2. Дополнительное внесение магния несколько тормозило поступление калия в клубни, оказывая определенное антагонистическое воздействие. В то же время усиление магниевого питания заметно повышало накопление калия в ботве, вызывая некоторый синергетический эффект. Тем самым подтверждена возможность противоположного взаимодействия между элементами при их поглощении различными органами растений [19].

По мере оптимизации калийного питания картофеля (NP → NP + K-1 → NP + K-2) отметили очевидную тенденцию к увеличению поступления почвенного магния в клубни. Дополнительное внесение магниевых удобрений способствовало дальнейшему росту его концентрации в запасующих органах. Иной характер поглощения магния наблюдали в вегетативных органах. Умеренное калийное питание картофеля в варианте NP + K-1 не изменило содержание магния в ботве по сравнению с вариантом NP, а дополнительное внесение магниевых удобрений заметно увеличило его накопление. Высокие дозы калия (K-2) в значительной степени блокировали поступление магния в вегетативные органы при всех использованных в опыте его дозах, демонстрируя явное антагонистическое воздействие. Очевидно, что характер и эффективность взаимовлияния калия и магния в процессе потребления растениями в значительной степени зависели от их концентрации и соотношения в почвенном растворе.

Содержание азота и фосфора в растительной продукции было примерно одинаковым во всех вариантах с их внесением и слабо зависело от уровня калийно-магниевого питания картофеля. Количество сухого вещества в клубнях было

Таблица 3. Среднегодовой баланс калия и магния в опыте, г/делянку

Вариант, №	Калий					Магний				
	вынос			приход	баланс	вынос			приход	баланс
	клубни	ботва	общий			клубни	ботва	общий		
1	1.6	0.2	1.8	—	—1.8	0.04	0.04	0.08	—	—0.08
2	1.6	0.2	1.8	—	—1.8	0.05	0.08	0.13	—	—0.13
3	3.0	0.4	3.4	2.5	—0.9	0.09	0.09	0.18	—	—0.18
4	3.3	0.5	3.8	2.5	—1.3	0.10	0.11	0.21	1.25	+1.04
5	2.6	0.5	3.1	2.5	—0.6	0.09	0.11	0.20	2.50	+2.30
6	3.3	0.5	3.8	3.8	0	0.10	0.09	0.20	—	—0.20
7	3.2	0.6	3.8	3.8	0	0.10	0.09	0.19	1.25	+1.06
8	2.8	0.7	3.5	3.8	+0.3	0.10	0.08	0.18	2.50	+2.32

близким во всех удобренных вариантах, а в ботве заметно снижалось по мере увеличения дозы внесенных удобрений.

В общей структуре выноса калия картофелем подавляющая часть приходилась на клубни (табл. 3); соотношение выноса калия между клубнями и ботвой в вариантах опыта варьировало в пределах (4–8) : 1, при соотношении 6.6 : 1 в оптимальном варианте NP + K-1 + Mg-1. В этой связи можно полагать, что способ использования ботвы картофеля в агропроизводстве (остается на поле или ее вывозят) мало отразится на общем выносе и балансе калия в агроценозе. Удельное потребление калия при сбалансированном минеральном питании (вариант NP + K-1 + Mg-1) составляло 4.2 г/кг клубней с учетом ботвы.

Внесение NP-удобрений в фоновом варианте не способствовало дополнительной мобилизации почвенного калия по сравнению с контрольным вариантом; вынос калия возрастал с увеличением дозы калийного удобрения. Наибольший продуктивный вынос калия отмечен в варианте NP + K-1 + Mg-1. Вероятно, совместное внесение умеренных доз калия и магния сопровождалось определенным синергетическим эффектом, оптимизируя минеральное питание картофеля. Внесение повышенных доз магния (Mg-2) на всех фонах калийного питания снижало потребление калия растениями, оказывая очевидное антагонистическое воздействие.

Вынос картофелем магния был в 15–20 раз меньше, чем калия. При всех уровнях минерального питания растений в опыте соотношение выноса магния клубнями и ботвой примерно равнялось 1. Удельное потребление магния при сбалансированном питании составляло 0.23 г/кг клубней с учетом побочной продукции.

По мере оптимизации питания картофеля в ряду вариантов контроль → фон → NP + K-1 →

→ NP + K-1 + Mg-1 вынос магния заметно увеличивался как из почвенных запасов, так и, вероятно, из удобрений. Несмотря на относительно малое потребление магния картофелем, дополнительное внесение умеренных, сбалансированных доз магниевого удобрения (на фоне NPK) существенно увеличивало продуктивность культуры (табл. 1). Высокие дозы калия (K-2) оказывали антагонистическое воздействие на потребление магния. При дополнительном внесении магния, особенно в повышенной дозе (Mg-2), отрицательное воздействие на растения лишь усиливалось.

В контрольном и фоновом вариантах опыта в условиях отсутствия дополнительного поступления калия закономерно формировался дефицитный его баланс. Однако и при внесении калийных удобрений в дозе K-1 в вариантах опыта баланс калия продолжал оставаться дефицитным; дополнительное использование магниевого удобрения (Mg-1) увеличивало дефицит калийного баланса в связи с интенсификацией продукционного процесса картофеля. Отметим, что допустимость и оправданность слабдефицитного баланса калия в агроценозе была показана в ранее проведенных исследованиях [1, 2]. Бездефицитный баланс калия в опыте складывался в вариантах с применением повышенной дозы калийного удобрения (K-2) как отдельно, так и совместно с магнием.

В вариантах опыта без внесения магния дефицит его баланса, несмотря на небольшую абсолютную величину, устойчиво нарастал по мере увеличения урожайности картофеля (табл. 1, 3). Очевидно, что при перманентном истощении почвенных запасов магния в интенсивных агроценозах, продуктивность выращиваемых культур может быть существенно лимитирована. Использование магневых удобрений в опыте обеспечи-

Таблица 4. Содержание обменного калия и магния (вытяжка 1 М раствора $\text{CH}_3\text{COONH}_4$) в почве опыта, мг/100 г почвы

Вариант	Калий			Магний		
	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.
Без удобрений	10.7	10.6	10.7	7.7	8.0	8.0
NP	10.6	9.6	9.3	7.5	7.7	7.5
NP + K-1	14.2	13.4	14.2	7.7	8.0	7.2
NP + K-1 + Mg-1	14.8	13.5	13.7	11.1	18.0	18.7
NP + K-1 + Mg-2	15.0	13.7	13.3	13.3	24.0	26.7
NP + K-2	16.6	18.5	18.4	7.3	7.8	7.5
NP + K-2 + Mg-1	17.4	18.0	18.0	11.2	18.8	19.0
NP + K-2 + Mg-2	18.0	18.1	18.2	13.2	24.2	27.3
HCP_{05}	1.4	1.2	2.1	1.3	1.8	2.5

вало выраженный положительный баланс этого элемента. При увеличении дозы (Mg-2) профицит баланса значительно возрастал, что, вероятно, было избыточным и нецелесообразным.

Баланс калия и магния, складывающийся в вариантах опыта, отражался в той или иной степени на содержании форм этих элементов в почве. Содержание обменного калия в почве вариантов без его внесения практически не изменилось за годы проведения опыта (табл. 4). Очевидно, что концентрация обменного калия в исходной старопашотной почве приблизилась к своему минимальному уровню, который уже не снижается при перманентном выносе элемента урожаями. Этот минимальный уровень обменного калия в почве, вероятно, составляют катионы, интрамицеллярно поглощенные почвенным комплексом и межслоевым пространством глинистых минералов, селективность этих катионов к обменным позициям почвенной матрицы выше, чем усваивающая способность выращиваемых культур. Данное количество обменного калия может быть извлечено из почвы соответствующими химическими экстрагентами, но в питании растений оно, видимо, не участвует. О наличии в почвах минимального уровня обменного калия ранее сообщали в печати [2, 25, 26]. Аналогичная ситуация складывалась и с обменным магнием — во всех вариантах без применения магниевых удобрений уровень обменной формы этого катиона в почве был стабильным, независимо от урожайности картофеля и внесения или невнесения NPK-удобрений.

В вариантах опыта с применением калийных удобрений содержание обменного калия в почве заметно возрастало, пропорционально внесенной дозе: при применении K-2 оно было существенно больше, чем при дозе K-1. Примечательно, что рост содержания калия в почве отмечали и при

отрицательном его балансе. В ранее проведенных исследованиях [1, 2, 26–28] также была показана возможность повышения почвенного содержания обменного калия при систематическом использовании в агроценозах калийных удобрений со слабо дефицитным балансом.

Следует отметить, что в условиях примерно одинакового ежегодного поступления и выноса калия в конкретных вариантах опыта, содержание обменной формы этого катиона в почве стабилизировалось на определенном уровне, в т.ч. минимальном. Очевидно, это было связано с наличием в почве специфического соотношения между формами (обменной и необменной) калия, обусловленного качественным и количественным составом почвенных калийсодержащих компонентов, и регулируемого посредством процессов трансформации (фиксации и мобилизации) [2].

Дополнительное внесение магния очень слабо влияло на почвенный уровень содержания обменной формы калия. При разных внесенных дозах магния на одном том же калийном фоне содержание обменного калия в почве практически не изменялось. Вероятно, это было связано с тем, что поглощательная способность почвы по отношению к калию больше, чем к магнию, поступающие с удобрениями катионы магния не могли эффективно вытеснять калий с интрамицеллярных позиций, составляющих основу почвенного фонда обменных катионов.

Содержание обменного магния в почве вариантов опыта существенно возросло при внесении магниевых удобрений, по мере роста профицита его баланса почвенный уровень обменного магния стабильно увеличивался. Характер накопления магния в почве не изменялся в зависимости от имеющегося калийного фона — и при дозе K-1, и при K-2 магний депонировался одинаково. Воз-

Таблица 5. Изменение содержания форм калия и магния в почве при различной интенсивности использования удобрений, мг/100 г почвы (2020 г.)

Вариант	Экстрагент				
	0.0025 М CaCl ₂		0.025 М CaCl ₂		1 М KCl
	K	Mg	K	Mg	Mg
Без удобрений	0.37	0.57	4.4	4.5	6.2
NP	0.23	0.57	4.0	3.9	5.7
NP + K-1	1.17	0.47	6.6	3.7	4.9
NP + K-1 + Mg-1	1.02	1.20	6.0	7.4	14.0
NP + K-1 + Mg-2	0.85	1.67	5.7	8.8	22.7
NP + K-2	1.77	0.30	8.2	3.9	5.0
NP + K-2 + Mg-1	1.62	1.37	7.8	8.1	14.0
NP + K-2 + Mg-2	1.53	1.83	7.3	8.3	22.7
HCP ₀₅	0.17	0.16	1.5	0.8	2.5

можно, поступающие в почву катионы магния занимали “свободные” обменные позиции в почвенной матрице, либо вытесняли другие катионы, например, Са.

Таким образом, результаты опыта свидетельствовали об индифферентном взаимовлиянии калия и магния на почвенное содержание их обменных форм; складывающийся в почве уровень содержания обменного калия и магния зависел только от применения или неприменения соответствующих удобрений и величины их доз.

Вытяжка 1 М уксуснокислого аммония (по методу Масловой) отражает общее содержание калия и магния на всех типах обменных почвенных позиций — и экстра-, и интрамицеллярных (главным образом), тогда как слабый раствор хлористого кальция вытесняет данные катионы только с наименее специфичных к ним позиций на планарных поверхностях глинистых минералов (экстрамицеллярно поглощенные) и в органическом веществе [2]. Эти легкообменные катионы составляют наиболее подвижную фракцию обменного пула и, соответственно, в наибольшей степени вовлечены в различные миграционные процессы, в т.ч. поглощение растениями. Уровень легкообменной фракции катиона дает представление о степени истощенности почвы, ее способности десорбировать данные ионы в почвенный раствор.

Результаты исследования показали, что внесенные в почву калий и магний оказывали заметное взаимовлияние на содержание легкообменных (вытяжка 0.0025 М CaCl₂) форм этих элементов (табл. 5). По нашим данным [2], при снижении уровня легкообменного калия <1 мг/100 г почвы

отмечали нарастающее лимитирование калийного питания растений, что и наблюдали в контрольном и фоновом вариантах рассматриваемого опыта. Использование калийных удобрений способствовало существенному повышению концентрации легкообменного калия (с 0.23–0.37 до 1.17–1.77 мг/100 г) пропорционально внесенной дозе. Однако при дополнительном применении магниевых удобрений отмечали явную тенденцию к снижению в почве содержания наиболее мобильной фракции калия; ионы магния активно конкурировали с калием за экстрамицеллярные позиции в ППК. При повышенных дозах магния, сопоставимых с калийными (K-1 и Mg-2, K-2 и Mg-2), происходило антагонистическое взаимодействие между этими ионами — содержание легкообменного калия в почве (фактически в почвенном растворе) достоверно снижалось, ухудшая соответственно условия калийного питания растений.

Одностороннее внесение калийных удобрений — дозы K-1 и особенно дозы K-2 — существенно снижало почвенное содержание легкообменного магния (с 0.57 до 0.47 и 0.30 мг/100 г соответственно), ограничивая обеспеченность картофеля этим элементом. Использование магниевых удобрений закономерно повышало концентрацию в почве наиболее мобильного магния (до 1.67–1.83 мг/100 г), причем, чем выше был калийный фон, тем значительнее увеличивалось содержание этой формы магния, вероятно, из-за большей заполненности ионами калия специфических позиций в почвенном поглощающем комплексе.

При использовании в качестве экстрагента более сильного раствора хлористого кальция (0.025 М) количество калия и магния, извлекаемое из почвы, заметно возросло. Очевидно, эта вытяжка вытесняла данные катионы не только с неспецифических (планарных) позиций, но и с позиций с большей энергией связи. Экстрагируемое из почвы количество калия и магния было промежуточным между почвенным содержанием соответствующих легкообменных и обменных форм этих элементов. Содержание этой фракции почвенного калия в почве опыта закономерно увеличивалось при использовании калийных удобрений, однако дополнительное внесение возрастающих доз магния сопровождалось некоторым уменьшением содержания легкообменного калия. Количество магния, переходящего в вытяжку 0.025 М CaCl₂, было одинаковым при разных дозах совместно внесенных магниевых и калийных удобрений. Это свидетельствовало о том, что почвенные обменные позиции, на которых могли бы адсорбироваться катионы магния, преимущественно занимали ионы калия уже при дозе K-1. Таким об-

разом, можно полагать, что калий в определенной степени ингибировал накопление в почве легкообменного магния (вытяжка CaCl_2) и его поглощение растениями.

Вытяжка 1 М KCl по своим экстрагирующим возможностям была близка к раствору 1 М ацетата аммония, соответственно количество извлекаемого этими экстрагентами подвижного и обменного магния было примерно равным (табл. 4, 5). Можно полагать, что катионы калия и аммония при сопоставимой концентрации оказывали примерно одинаковое вытесняющее воздействие на магний почвенного поглощающего комплекса. Характер накопления в почве магния, извлекаемого 2-мя этими вытяжками, был одинаковым и зависел только от использованной дозы магниевого удобрения и не зависел от калийного фона.

В ранее проведенных нами исследованиях на зональных почвах Западной Сибири [2] разработаны градации обеспеченности почв калием на основании почвенного содержания его различных форм. В ряде научных работ [8, 9, 20], выполненных в разных почвенно-климатических регионах, предлагают или приводят различные уровни и градации обеспеченности почв доступным для растений магнием. Результаты рассматриваемого опыта свидетельствуют, что в исследованной среднесуглинистой почве содержание магния, при котором отмечают лимитирование продуктивности картофеля и достоверную прибавку от внесения магниевого удобрения (на фоне NPK) составляет: в вытяжке 0.0025 М CaCl_2 — <0.6 мг/100 г, 0.025 М CaCl_2 — $<4-5$, 1 М KCl — $<6-7$, 1 М $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ — $<7-8$ мг/100 г почвы. Оптимальный продукционный процесс картофеля при выращивании на данной почве будет происходить при содержании в ней магния, извлекаемого указанными выше экстрагентами, в следующем ряду: >1.1 , $7.5-8.0$, $10-12$, $11-15$ мг/100 г почвы соответственно.

Экстраполируя результаты проведенного опыта на полевые производственные условия, можно предположить, что при выращивании картофеля на почвах, близких по свойствам исследованной, оптимальной дозой магния будет $20-30$ кг/га с совместным внесением $90-120$ кг K_2O /га (на фоне N90-120P60). Применяемые в таком соотношении калийные и магниевые удобрения обеспечат взаимное благоприятное воздействие на поступление этих элементов в растения и продуктивность культуры, а также на их содержание в почве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показало эффективность сбалансированного внесения калийных и магниевых удобрений при выращивании карто-

феля на серой лесной среднесуглинистой почве, а также специфику взаимовлияния калия и магния при потреблении их растениями и в почвенных процессах.

Внесение калийных удобрений на фоне применения NP устойчиво повышало продуктивность картофеля, дополнительное использование умеренных доз магния (в соотношении $\text{K} : \text{Mg} \geq 2 : 1$) оптимизировало минеральное питание растений и обеспечивало дальнейший рост урожайности клубней. Однако совместное применение повышенных доз калия и магния в соотношении, близком к $1 : 1$, оказывало существенное отрицательное воздействие на продуктивность картофеля, снижая ее до уровня варианта применения NP -удобрений, обесценивая тем самым действие и калия, и магния. Все особенности взаимовлияния калия и магния на рост и развитие картофеля отражались главным образом на запасающих органах (клубнях) и в значительно меньшей степени на вегетативных органах (ботве).

Взаимовлияние внесенных в почву с удобрениями калия и магния проявлялось прежде всего на почвенном содержании их легкообменных форм (фактически, почвенного раствора). Одностороннее внесение калийных удобрений существенно снижало содержание в почве легкообменного магния, ухудшая условия питания растений этим элементом. В то же время дополнительное внесение магния, особенно в повышенных дозах, сопровождалось заметным уменьшением содержания в почве наиболее мобильной фракции калия. Изменение почвенного содержания обменного калия и обменного магния зависело только от внесения (или невнесения) соответствующих удобрений и их доз. Накопление в почве обменной формы каждого из этих элементов не зависело от почвенного содержания другого элемента.

Результаты исследования свидетельствуют, что контроль за калийным и магниевым состоянием почв, оптимизация режимов этих элементов в интенсивных агроценозах заслуживают повышенного внимания. Для эффективного использования удобрений необходим учет особенностей взаимодействия калия и магния в питании растений и почвенных процессах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прокошев В.В., Дерюгин И.П. Калий и калийные удобрения. М.: Ледум, 2000. 185 с.
2. Якименко В.Н. Калий в агроценозах Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. 231 с.
3. Середина В.П. Калий и почвообразование. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 2012. 354 с.

4. Панников В.Д., Минеев В.Г. Почва, климат, удобрение и урожай. М.: Агропромиздат, 1987. 512 с.
5. Барбер С.А. Биологическая доступность питательных веществ в почве. М.: Агропромиздат, 1988. 376 с.
6. Мазаева М.М. Магниево питание растений и магниевые удобрения: Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. М., 1967. 42 с.
7. Мазаева М.М. Об обеднении дерново-подзолистой почвы магнием и возможности проявления не-обеспеченности им растений при длительном применении НРК-удобрений // Агрохимия. 1977. № 9. С. 97–101.
8. Прокошев В.В., Неугодова О.В., Смирнов Ю.А., Государева З.И. Магниевые удобрения в интенсивном земледелии. М.: ВНИИТЭИ-агропром, 1987. 52 с.
9. Аристархов А.Н. Оптимизация питания растений и применение удобрений в агроэкосистемах. М.: ЦИНАО, 2000. 524 с.
10. Беляев Г.Н. Калийные удобрения из калийных солей Верхнекамского месторождения и их эффективность. Пермь: Перм. кн. Изд-во, 2005. 304 с.
11. Афанасьев Р.А. Магний в системе почва–растение–животное // Плодородие. 2005. № 5. С. 19–21.
12. Шильников И.А., Сычев В.Г., Зеленов Н.А. Известкование как фактор урожайности и почвенного плодородия. М.: ВНИИА, 2008. 340 с.
13. Богдевич И.М., Ломонос О.Л. Магниевые удобрения на дерново-подзолистых почвах: аналит. обзор. Минск: ИПА, 2009. 40 с.
14. Якименко В.Н. Изменение содержания калия и магния в профиле почвы длительного полевого опыта // Агрохимия. 2019. № 3. С. 19–29.
15. Барбер С.А., Хамберт Р.П. Достижения в познании связей калия в почве и растениях // Удобрения. М.: Колос, 1965. С. 249–281.
16. The role of potassium in agriculture. Madison, Wisc.: Amer. Soc. Agronomy, 1968. 508 p.
17. Nemeth K., Mengel K., Grimme H. The concentration of K, Ca and Mg in the saturation extracts in relation to exchangeable K, Ca and Mg // Soil Sci. 1970. V. 109. № 3. P. 179–185.
18. Potassium in agriculture. Madison, Wis.: Amer. Soc. Agronomy, 1985. 1223 p.
19. Магницкий К.П. Взаимосвязи в питании растений // Агрохимия. 1967. № 10. С. 32–46.
20. Тихомирова В.Я. Влияние свойств почв, удобрений, извести и погодных условий на обеспеченность магнием сельскохозяйственных растений // Агрохимия. 2011. № 5. С. 84–89.
21. Таврыкина О.М., Богдевич И.М., Путятин Ю.В. Влияние возрастающих уровней обеспеченности дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы обменным магнием и удобрений на урожайность и качество зеленой массы кукурузы // Агрохимия. 2013. № 10. С. 39–45.
22. Якименко В.Н. Влияние калийных удобрений на урожайность и качество клубней картофеля в лесостепи Западной Сибири // Агрохимия. 2017. № 9. С. 39–48.
23. Практикум по агрохимии / Под ред. Минеева В.Г. М.: Изд-во МГУ, 1989. 304 с.
24. Муравин Э.А., Обуховская Л.В., Ромодина Л.В. Практикум по агрохимии. М.: КолосС, 2005. 288 с.
25. Никитина Л.В., Володарская И.В. Динамика обменного калия и его минимальные уровни в агроценозах на дерново-подзолистых почвах // Агрохимия. 2007. № 2. С. 14–18.
26. Якименко В.Н. Баланс калия, урожайность культур и калийное состояние почвы в длительном поле-вом опыте в лесостепи Западной Сибири // Агрохимия. 2019. № 10. С. 16–24.
27. Носов В.В., Соколова Т.А., Прокошев В.В., Иса-енко М.А. Изменение некоторых показателей калийного состояния дерново-подзолистых почв под влиянием применения калийных удобрений в длительных полевых опытах // Агрохимия. 1997. № 5. С. 13–19.
28. Якименко В.Н., Бойко В.С. Диагностика калийного состояния почв лесостепи Западной Сибири // Почвы и окружающая среда. 2019. Т. 2. № 2. С. 74.

Interaction of Potassium and Magnesium in Cultivation of Potatoes on Gray Forest Soil

V. N. Yakimenko

*Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Division, RAS
prosp. Lavrentyeva 8/2, Novosibirsk 630090, Russia
E-mail: yakimenko@issa-siberia.ru*

In the studies carried out on gray forest medium loamy soil, changes in the productivity of potatoes, the peculiarities of their consumption of potassium and magnesium with the combined use of various doses of potash and magnesium fertilizers (against the background of NP) are shown, the removal and balance of these elements are calculated. The specificity of the mutual influence of potassium and magnesium was established when their readily exchangeable and exchangeable forms are introduced into the soil on the soil content.

Key words: agrocenoses, soil, potatoes, fertilizers, potassium, magnesium.

УДК 631.416.9(571.15)

МИКРОЭЛЕМЕНТЫ В МЕЖГОРНО-КОТЛОВИННЫХ АГРОЛАНДШАФТАХ ГОРНОГО АЛТАЯ¹

© 2021 г. О. А. Ельчининова¹, *, А. В. Пузанов¹, Т. А. Рождественская¹, С. Я. Двуреченская¹

¹ Институт водных и экологических проблем СО РАН
656038 Барнаул, ул. Молодежная, 1, Россия

*E-mail: eoa59@mail.ru

Поступила в редакцию 28.12.2020 г.

После доработки 28.01.2021 г.

Принята к публикации 11.03.2021 г.

Выявлены особенности накопления и распределения микроэлементов в системе почва—сельскохозяйственные растения в межгорных котловинах Горного Алтая. Содержание марганца, меди и цинка в почвенном покрове убывало от черноземов обыкновенных и темно-каштановых почв среднегорных котловин к каштановым и светло-каштановым почвам высокогорных. Величины коэффициентов радиальной дифференциации марганца, меди и цинка в гумусовом горизонте (<1) свидетельствовали о биогенном накоплении и аккумулятивном распределении этих элементов как в каштановых почвах, так и черноземах обыкновенных. Коэффициент радиальной дифференциации молибдена варьировал в широких пределах: от 0.6 до 3.2. Его значительная величина в черноземе обыкновенном Уймонской котловины (2.3–3.2) в горизонте Вк обусловлена наличием карбонатного биогеохимического барьера. На содержание и характер профильного распределения биогенных элементов влиял комплекс почвенных факторов: чем тяжелее был гранулометрический состав, больше содержание органического вещества, карбонатов, емкость катионного обмена, тем больше валовое содержание исследованных микроэлементов. Большая часть поглощенных растениями (овсом и луговыми травами) марганца, меди и цинка локализовалась в корневой системе и меньшая — транспортировалась в надземные органы. Для марганца, меди и цинка характерным был барьерный тип накопления с коэффициентом корневого барьера >1 . Интенсивность накопления молибдена в корнях была меньше по сравнению с надземными органами ($K_{\text{кб}} < 1$). Сопряженное исследование почвы и растений показало, что содержание в почвах марганца (в почвах среднегорных котловин), меди и цинка было больше кларка, но меньше ПДК и ОДК, а превышение максимально допустимого уровня для кормов содержания марганца и молибдена в растениях агроландшафтов межгорных котловин Горного Алтая было незначительным и носило единичный и локальный характер. Концентрации марганца, меди и цинка в пастбищной траве и сене были больше, чем в надземной массе овса.

Ключевые слова: высокогорные и среднегорные котловины, почвы, надземная масса, корни, микроэлементы, внутрипрофильное распределение, коэффициент радиальной дифференциации, коэффициент корневого барьера.

DOI: 10.31857/S0002188121060041

ВВЕДЕНИЕ

Межгорные степные котловины — характерный элемент рельефа Горного Алтая. Они относятся к внутригорным эрозионно-тектоническим впадинам и понижениям и располагаются на высоте от 500 до 2500 м над уровнем моря. В центральной и преимущественно юго-восточной части на высоте 1100 м располагаются высокогорные сухие котловины, на высоте 500–1100 м — среднегорные. Общей особенностью климата этих территорий является его континентальность и сухость [1].

В настоящее время межгорные котловины являются центрами хозяйственной деятельности, где традиционное землепользование сочетается с элементами инновационных технологий, в т.ч. и ресурсосберегающих. Во второй половине прошлого столетия почти вся территория среднегорных котловин была распаханна. Основной культурой является овес, возделываемый на сено, который убирают в фазе молочной спелости. Климатические условия Уймонской и Абайской котловин позволяют возделывать скороспелые сорта овса и яровой пшеницы на зерно.

Во второй половине прошлого века появился термин “тяжелые металлы” (ТМ), который сразу

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН (№ госрегистрации 121031200177-1).

же приобрел негативное звучание. С этим термином связано представление о чем-то токсичном, опасном для живых организмов. Представление об обязательной токсичности ТМ, по мнению Алексеева [2], является заблуждением, т.к. в эту же группу попадают медь, цинк, молибден, кобальт, марганец, железо, т.е. те элементы, большое биологическое значение которых давно обнаружено и доказано. Некоторые из них в сельском хозяйстве получили название микроэлементов, что было связано с теми концентрациями, в которых они необходимы живым организмам. В настоящей работе обсуждаются проблемы содержания марганца, меди, цинка и молибдена как микроэлементов, но количество которых в почве и растениях регламентируется нормативными документами.

Микроэлементный состав почв межгорных котловин ранее был изучен Мальгиным [3], позднее — Балыкиным с соавт. [4–7]. В настоящее время изучение региональных особенностей распределения микроэлементов в компонентах агроландшафтов и их взаимосвязь с биогеохимическими условиями окружающей среды все еще остается весьма актуальным. Такая информация необходима для обоснования возможности производства экологически безопасной сельскохозяйственной продукции или разработки мероприятий по его обеспечению. Цель работы — выявление особенностей накопления и распределения микроэлементов в системе почва—сельскохозяйственные растения в межгорных котловинах Горного Алтая.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования были почвы и растительность высокогорных (Чуйской, Курайской) и среднегорных (Канской, Уймонской и Абайской) котловин.

Чуйская котловина находится на высоте 1700–1900 м над уровнем моря. Продолжительность безморозного периода 50–60 сут. Сумма активных температур ($>10^{\circ}\text{C}$) равна 1000–1100 $^{\circ}\text{C}$. Годовое количество осадков — 10–150 мм, коэффициент увлажнения — 0.1–0.2.

Курайская котловина расположена на высоте 1500–1600 м над уровнем моря. Климат резкоконтинентальный, продолжительность безморозного периода — <50 сут. Сумма активных температур ($>10^{\circ}\text{C}$) равна 1000–1100 $^{\circ}\text{C}$. Годовое количество осадков — 230–260 мм, коэффициент увлажнения — 0.2–0.3 [8]. Основной фон растительного покрова высокогорных котловин составляют сухостепные растительные формации, под которыми на покровных маломощных карбонатных каменистых суглинках и супесях формируются каштановые почвы.

Канская котловина расположена на высоте 1000–1100 м над уровнем моря. Продолжительность безморозного периода составляет 55–65 сут. Сумма активных температур ($>10^{\circ}\text{C}$) равна 1100–1200 $^{\circ}\text{C}$. Годовое количество осадков — 330–350 мм, коэффициент увлажнения — 0.5–0.6. В целом климат очень прохладный, засушливый и полусухой [8]. Основной фонд почвенного покрова Канской котловины образуют почвы каштанового и темно-каштанового подтипов и черноземы обыкновенные.

Абайская котловина находится на высоте 1010–1150 м н.у.м. Продолжительность безморозного периода — 60–70 сут. Сумма активных температур ($>10^{\circ}\text{C}$) равна 1200–1310 $^{\circ}\text{C}$. Годовое количество осадков — 400–450 мм, коэффициент увлажнения — 0.6–0.8 [8]. Основу почвенного покрова образуют черноземы обыкновенные.

Уймонская котловина — одно из немногих мест Горного Алтая, имеющая относительно благоприятные агроклиматические и почвенные условия для развития сельского хозяйства. Находится на высоте 1000 м н.у.м. Продолжительность безморозного периода — 75–95 сут. Сумма активных температур ($>10^{\circ}\text{C}$) равна 1450–1500 $^{\circ}\text{C}$. Годовое количество осадков равно 300–350 мм, коэффициент увлажнения — 0.6–0.8 [8]. Почвообразующие породы представлены чехлом лессовидных карбонатных суглинков, иногда достигающих значительной мощности (3–4 м) или же маломощными щебнистыми, как правило, карбонатными суглинками. Природные условия Уймонской котловины способствуют развитию обыкновенных и южных черноземов.

Согласно систематическому списку, разработанному и предложенному сотрудниками Института почвоведения и агрохимии СО РАН [9], почвы исследованной территории относятся к группе почв межгорных котловин и представлены каштановыми и черноземными почвами. При проведении полевых исследований использовали сравнительно-географический метод, позволяющий выявить коррелятивные зависимости между почвами, их свойствами, составом и совокупностью факторов почвообразования. При описании почвенного разреза применяли морфологический метод — изучение почв по внешним признакам, и профилно-генетический — изучение почвы с поверхности на всю глубину последовательно по генетическим горизонтам с последующим сопоставлением их свойств. Пробы почв отбирали по генетическим горизонтам в двойные полиэтиленовые пакеты. Всего было сделано 8 почвенных разрезов и отобрано 28 почвенных проб.

Пробоподготовка почвы на общий анализ заключалась в высушивании почвенных образцов на воздухе, растирании сухой почвы в фарфоровой ступке и пропускании через сито с диаметром отверстий 1 мм. Растительные образцы отбирали в местах, сопряженных почвенному разрезу, с площади 0.25 м² в 3-х повторностях. Надземную массу высушивали и взвешивали. Корни отбирали с этих же площадок на глубину максимального их распространения в виде монолитов размером 0.2 × 0.2 м, промывали их в проточной воде, затем — дистиллированной. Для определения содержания химических элементов рентгено-флуоресцентным методом с использованием синхротронного излучения почву и растения растирали в яшмовой ступке. Для определения содержания гумуса в почвенной пробе предварительно отбирали корни и корешки, растирали в фарфоровой ступке и пропускали через сито с диаметром отверстий 0.25 мм.

Для определения свойств почвы использовали систему химических, физико-химических и других анализов (сравнительно-аналитический метод). Гумус определяли по методу Тюрина, гранулометрический состав — методом пипетки (вариант Качинского с подготовкой почвы к анализу пирофосфатным методом), рН_{H₂O} — потенциометрическим методом, карбонаты — ацидиметрическим методом, емкость катионного обмена — методом Бобко—Аскинази для карбонатных почв. Определение содержания химических элементов в почве и растениях проводили методом РФА СИ (рентгено-флуоресцентный анализ с использованием синхротронного излучения). В работе использовали оборудование ЦКП “СЦСТИ” на базе УНУ “Комплекс ВЭПП-4—ВЭПП-2000” в ИЯФ СО РАН, поддержанное проектом RFMEFI62119X0022 [10]. Пределы обнаружения для проб почв: Mn — 50, Cu, Zn — 3, Mo — 0.35 ppm; для растительных проб: Mn — 10, Cu, Zn — 1, Mo — 0.15 ppm.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе проведенной работы были установлены основные особенности исследованных почв (табл. 1). В межгорных котловинах широко распространены каштановые почвы, где достаточно четко выделяются все 3 подтипа каштановых почв: темно-каштановые, каштановые и светло-каштановые. Общая особенность отложений, на которых формируются каштановые почвы межгорных котловин — высокое содержание скелетных включений (50—80%). Более половины мелкозема приходится на крупные фракции (песчаную, пылеватую) и только 9—15% — на илистую. Легкий гранулометрический состав с высоким содержанием крупнозема и незначительным содержанием тонкодисперсных фракций характерен для всех подтипов

каштановых почв. Содержание илистой фракции — <10%, в составе мелкозема преобладают фракции среднего песка и крупной пыли.

Реакция среды в профиле каштановых почв — щелочная и сильнощелочная. Каштановые почвы отличаются мощными карбонатными горизонтами с высоким содержанием карбонатов. Карбонаты обнаружены с самой поверхности. Для каштановых почв характерно низкое содержание и резкое снижение содержания гумуса вниз по профилю. Содержание гумуса в гумусовом горизонте составляет в темно-каштановых почвах 4.3% под пашней, 5.9 — под сенокосом, в каштановых — 4.7 в светло-каштановых — 2.7%. Качественный состав весьма специфичен для каштанового типа почв и имеет фульватную природу, что обусловлено криоаридными условиями гумусообразования в котловинах [11]. Емкость поглощения, обусловленная интегральным влиянием гумусированности и дисперсности мелкозема, низкая. Показатели агрохимических свойств заметно ухудшаются от темно-каштановых почв к светло-каштановым.

Гранулометрический состав черноземов обыкновенных среднегорных котловин неодинаков и неоднороден по профилю, что связано с разнообразием почвообразующих пород. Он варьирует от супесчаного в верхних горизонтах до средне- и тяжелосуглинистого — в нижних. Преобладают среднесуглинистые, в той или иной степени каменистые почвы. Мелкозем гумусового горизонта этих почв содержит много пыли и песка.

Содержание гумуса в гумусовом горизонте варьирует от 6.8 в Абайской котловине до 9.4% — в Уймонской. В составе гумуса преобладают гуминовые кислоты. Реакция среды в гумусовом горизонте нейтральная или слабощелочная, вниз по профилю она изменяется до явно щелочной. Карбонаты присутствуют с поверхности и содержание их с глубиной увеличивается до значительных величин (до 20%). Емкость обмена в черноземах межгорных котловин наибольшая в гумусовом горизонте и с глубиной снижается. В составе обменных катионов преобладает кальций. Перечисленные особенности оказывают существенное влияние на элементный состав почв.

Исследованные микроэлементы подразделяются на 2 группы: элементы с относительно постоянной концентрацией (Cu, Zn) и элементы с высоким варьированием концентраций в окружающей природной среде (Mn) [11].

Содержание марганца в почвенном покрове исследованной территории Горного Алтая характеризуется убыванием концентрации элемента от почв среднегорных котловин к высокогорным (рис. 1). Наибольшие концентрации обнаружены в почвах Уймонской и Абайской котловин.

Таблица 1. Физико-химические свойства почв котловин

Разрез	Горизонт	Глубина взятия образца, см	Гумус	Ил	Физическая глина	CaCO ₃	ЕКО	pH _{H₂O}
			%			мг-экв/100 г		
Высокогорные котловины								
Чуйская котловина, пастбище, светло-каштановая почва								
P.02-14	Ак	0—9	2.7	7.8	23.5	7.2	17.9	7.9
	Вк	15—25	1.2	6.1	12.6	5.6	15.2	8.4
	ВСк	>40	0.3	1.8	4.7	2.8	11.2	7.3
Курайская котловина, пастбище, каштановая почва								
P.01-14	Ак	0—15	4.7	1.3	10.8	4.2	12.7	7.1
	Вк	21—31	2.0	1.1	6.3	5.9	4.2	7.5
Среднегорные котловины								
Канская котловина, пастбище, темно-каштановая почва								
P.03-14	Ак	0—10	5.9	3.5	16.0	3.5	27.3	7.4
	Вк	33—43	1.9	8.7	20.3	8.2	16.7	7.8
Канская котловина, пашня, темно-каштановая почва								
P.04-14	Апах	3—13	4.3	2.7	18.6	3.1	30.9	7.5
	Вк	40—50	1.8	9.8	21.7	10.0	5.7	7.7
Уймонская котловина, пашня, чернозем обыкновенный								
P.05-14	Апах	1—11	9.4	7.2	33.8	3.8	30.7	6.8
	Вк	29—39	5.4	11.6	26.2	8.0	11.5	7.7
	Ск	45—56	3.6	5.1	18.0	19.0	7.7	8.3
Уймонская котловина, естественный сенокос, чернозем обыкновенный								
P.06-14	Ак	3—13	9.1	8.2	30.1	4.3	24.4	7.1
	Вк	16—26	2.1	16.2	41.9	10.6	11.3	8.1
	Ск	45—56	1.1	11.1	11.6	20.3	9.4	9.0
Абайская котловина, пашня, чернозем обыкновенный								
P.03-19	Ак'	0—6	6.8	3.6	28.7	4.8	41.8	7.8
	Ак''	7—13	6.9	4.2	28.9	4.8	33.1	7.8
	АВк	15—25	6.9	14.2	33.1	5.0	25.1	7.8
	Вк	34—45	5.7	13.2	39.6	14.2	20.9	8.1
	Ск	50—60	0.8	17.3	43.1	14.2	9.5	8.0
Абайская котловина, пашня, чернозем обыкновенный								
P.04-19	Ак'	0—10	8.4	7.3	13.3	5.0	30.6	7.5
	Ак''	10—17	8.6	7.2	14.6	4.9	22.1	7.5
	АВк	17—27	8.1	16.0	26.1	6.0	18.3	7.9
	Вк	35—45	5.0	18.2	26.7	19.1	13.0	8.3
	Ск	50—60	0.4	7.8	10.5	18.3	7.3	8.3

Распределение марганца в почвенной толще также неоднородно. Для всех исследованных почв отмечено биогенное накопление элемента. Содержание марганца в гумусово-аккумулятивном горизонте значительно больше, чем в почвообразующей породе. Если содержание марганца в горизонте С не превышает его кларк для почв ми-

ра [12], то в верхних горизонтах отмечены показатели, близкие к ПДК [13]. Миграция марганца вниз по профилю сводится к минимуму в связи с тем, что процессы выщелачивания в нижележащие горизонты ограничены недостаточной обеспеченностью исследуемой зоны влагой, а также содержанием карбонатов с самой поверхности.

Для марганца характерна резко выраженная тенденция к биогенной аккумуляции в гумусовых горизонтах [14]. Биогенное накопление марганца также свойственно почвам юга Западной Сибири [15].

Биогеохимия меди в основных природных компонентах Горного Алтая была изучена ранее Мальгиным [3]. Им было установлено, что большая часть территории Горного Алтая содержит микроэлемента почти в 2 раза больше кларка, рассчитанного для почв СССР [16]. Модальным классом содержания валовой меди является диапазон от 20 до 40 мг/кг. Повышенное содержание валовой меди в почвенном покрове Горного Алтая Мальгин [3] объяснял обогащенностью микроэлементом горных пород, на дериватах которых формируется почвенный покров. Вновь полученная нами информация близка ранее опубликованной. Максимальные концентрации характерны для черноземных почв среднегорных котловин, минимальные — для каштановых почв высокогорных и Канской среднегорной котловины (рис. 2). Вместе с тем содержание меди в каштановых почвах не превышает ОДК [17] для песчаных и супесчаных почв, составляющую 33 мг/кг, и в черноземах обыкновенных — ОДК для суглинистых и глинистых почв с $pH_{KCl} > 5.5$, составляющую 130 мг/кг.

Имеющиеся в литературе данные о влиянии почвообразовательного процесса на внутрипрофильное распределение меди довольно противоречивы. Ряд авторов отмечает ярко выраженную аккумуляцию меди в гумусовом горизонте, другие указывают на равномерное распределение ее по профилю. По данным [18], медь является элементом биогенной аккумуляции. Полученные нами данные подтверждают вышесказанное.

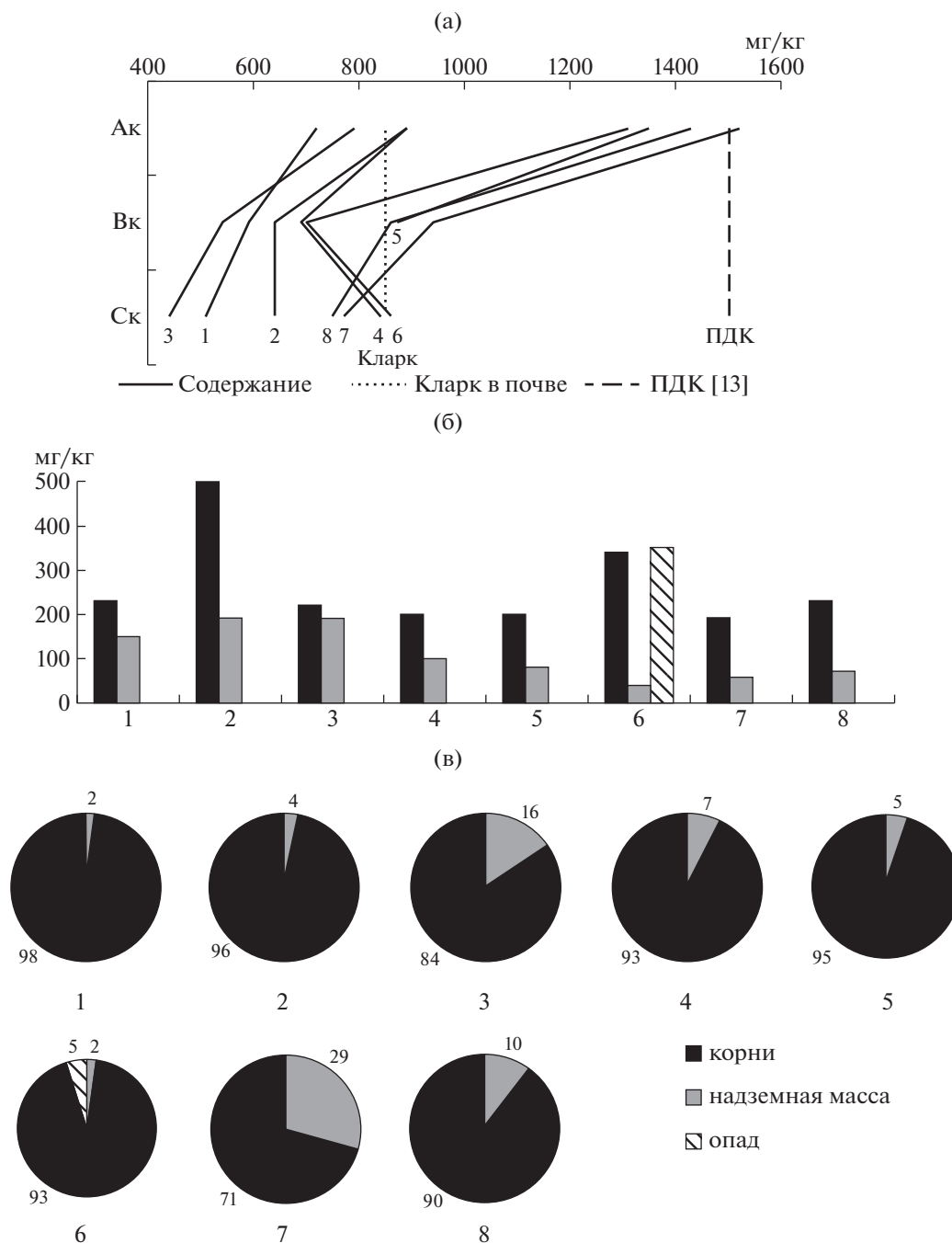
Содержание цинка во всех исследованных почвах превышает кларк [13] и ОДК [17] для песчаных и супесчаных почв, составляющую 55 мг/кг, в почвах легкого гранулометрического состава Чуйской, Курайской и Канской котловин, но находится в пределах ОДК для суглинистых и глинистых почв с $pH_{KCl} > 5.5$, составляющую 220 мг/кг, в почвах Уймонской и Абайской котловин (рис. 3). Полученные результаты вполне согласуются с приведенными ранее данными для каштановых почв Чуйской котловины [19] и черноземов обыкновенных Уймонской котловины [4]. Для цинка характерно ярко выраженное биогенное накопление как в каштановых, так и черноземных почвах.

В отличие от выше рассмотренных элементов, содержание и распределение молибдена даже в однотипных почвах значительно различается (рис. 4). Содержание молибдена в почвах меньше концентрации какого-либо другого необходимого микроэлемента. В каштановых почвах в гумусовом горизонте содержание элемента варьирует

от 1.03 до 1.13 мг/кг, в черноземах обыкновенных — в более широких пределах: от 0.82 до 1.45 мг/кг, что близко к среднему содержанию валового молибдена в почвах Алтайского края (0.8–1.4 мг/кг) [20]. Для почв мира Виноградов [12] определил кларк молибдена в почвах 2 мг/кг. Для внутрипрофильного распределения микроэлемента характерно наибольшее накопление в гумусовом горизонте в каштановой почве Курайской котловины, черноземе обыкновенном Уймонской котловины, в материнской породе — черноземе обыкновенном Абайской котловины. В остальных исследованных почвах максимум содержания молибдена приурочен к горизонту Вк. Данных по внутрипрофильному распределению молибдена в почвах в литературе немного. В работе [21] указывали на возможность накопления микроэлемента в горизонте А, связывая это с тем, что его содержание возрастает по мере увеличения содержания органического вещества. По мнению [22], во всех подтипах черноземов Центрального Черноземья, а также в каштановых и черноземных почвах Алтайского края [20] также наблюдается его биогенная аккумуляция.

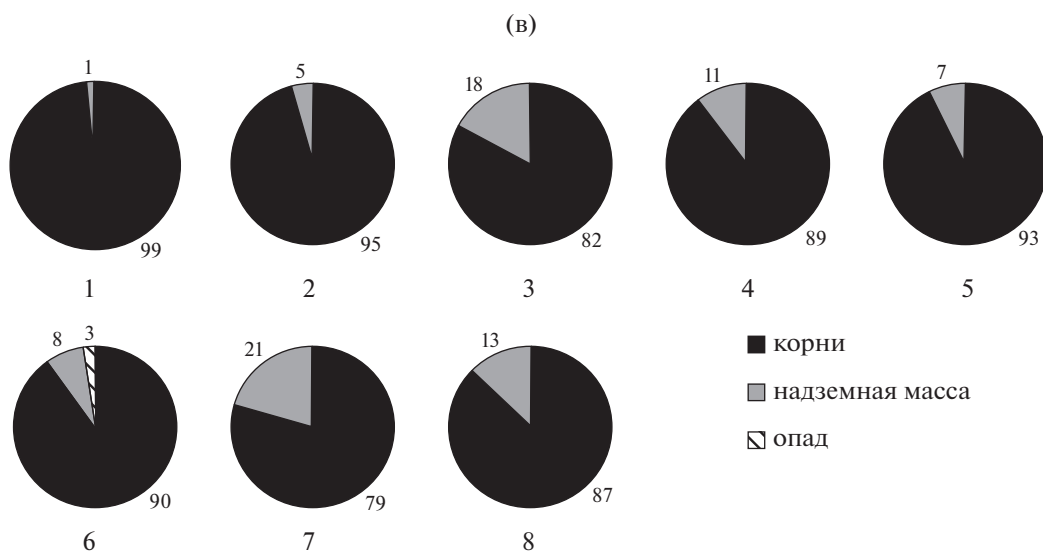
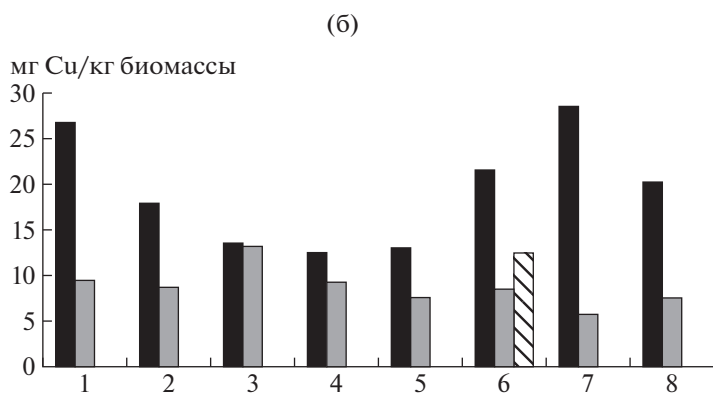
Более наглядно процессы перераспределения химических элементов в почвенном профиле характеризует коэффициент радиальной дифференциации (табл. 2) — отношение среднего содержания данного химического элемента в том или ином почвенном горизонте к среднему содержанию его в почвообразующей породе. Этот термин был предложен в 1970-х гг. взамен употреблявшегося ранее термина элювиально-аккумулятивный коэффициент [23]. Показано, что коэффициенты радиальной дифференциации марганца, меди и цинка в гумусовом горизонте > 1 , что еще раз свидетельствует о биогенном их накоплении и аккумулятивном распределении. В горизонте Вк величина коэффициента немного < 1 . Коэффициент радиальной дифференциации молибдена варьирует в более широких пределах: в гумусовом горизонте — от 0.6–0.8 в Абайской котловине до 2.0–2.7 в Уймонской. Значительная величина коэффициента в черноземе обыкновенном Уймонской котловины (2.3–3.2) в горизонте Вк связана с наличием карбонатного биогеохимического барьера.

Изучение содержания микроэлементов в почве, а также сопряженное исследование растений имеет большое значение для решения ряда прикладных агрохимических и агроэкологических задач. Для марганца, меди и цинка характерно максимальное накопление в корнях как полевых культур, так и растений сенокосов и пастбищ. Содержание вышеперечисленных микроэлементов в надземной массе значительно меньше. Оно находится в пределах нормальных концентраций (пределах нормальной регуляции) [24] и максимально допустимого уровня для кормов [25]: для



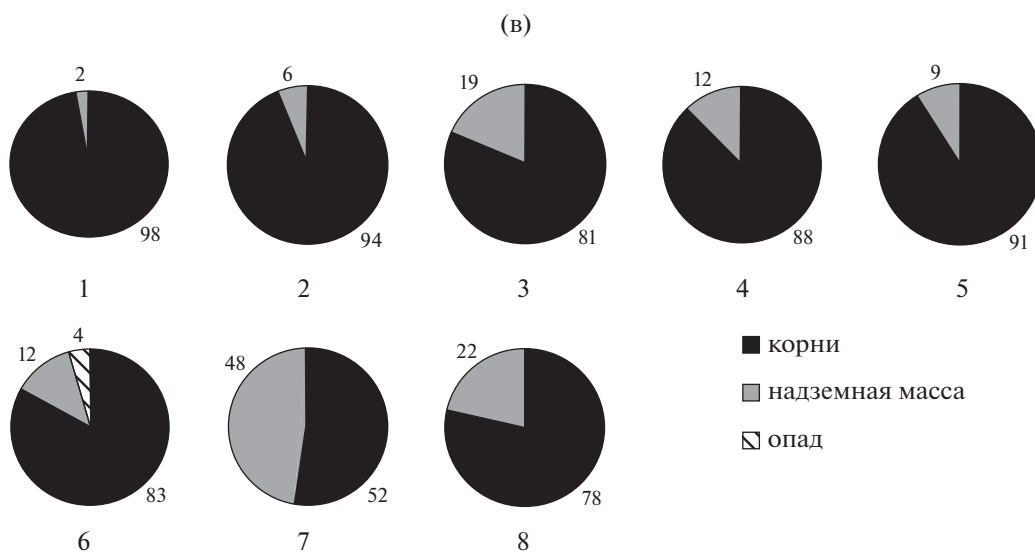
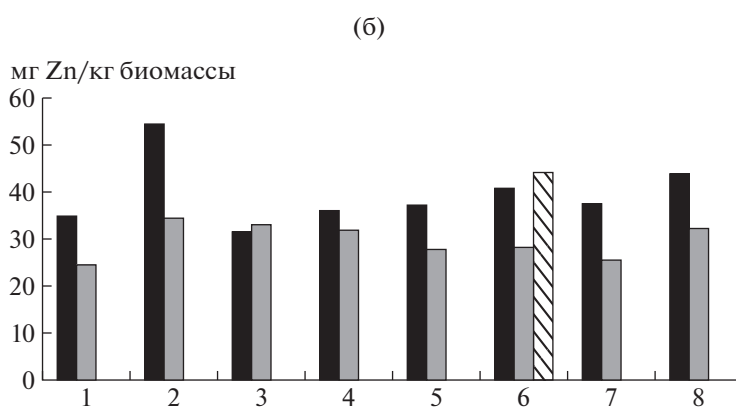
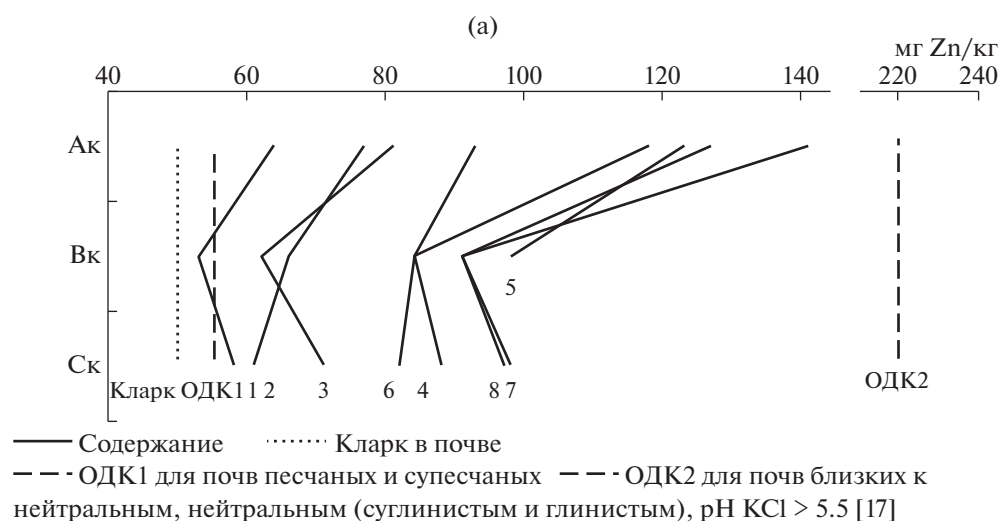
№	Котловина, угодие	Почва	№	Котловина, угодие	Почва
1	Чуйская, пастбище	Светло-каштановая	5	Уймонская, пашня	Чернозем обыкновенный
2	Курайская, пастбище	Каштановая	6	Уймонская, сенокос	
3	Канская, пастбище	Темно-каштановая	7	Абайская, пашня	
4	Канская, пашня	Темно-каштановая	8	Абайская, пашня	

Рис. 1. Распределение марганца в системе почва–растение: (а) — содержание и распределение элемента в почве, (б) — содержание элемента в растительности, (в) — распределение запасов элемента в растительности. То же на рис. 2–4.



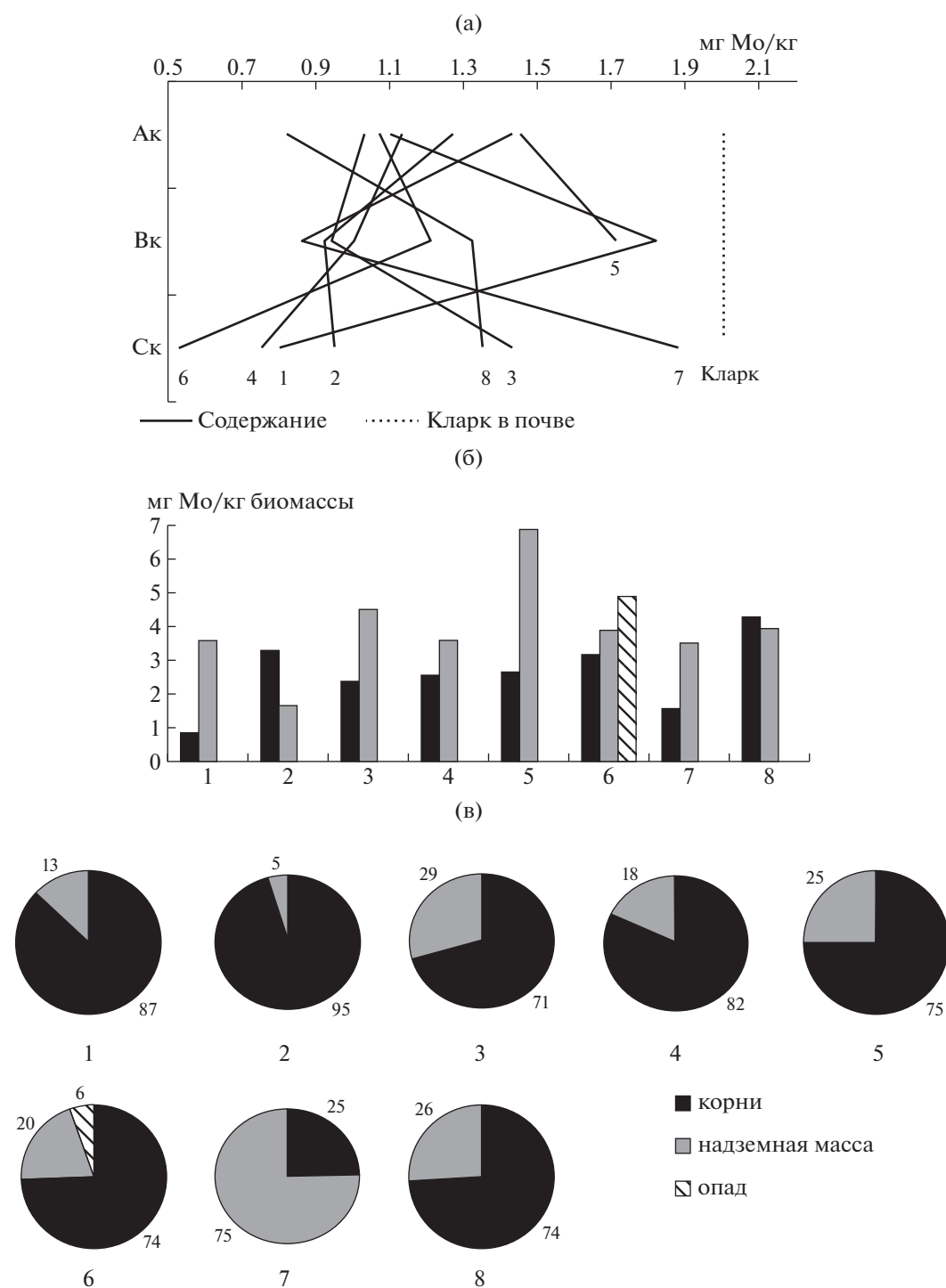
№	Котловина, угодие	Почва	№	Котловина, угодие	Почва
1	Чуйская, пастбище	Светло-каштановая	5	Уймонская, пашня	Чернозем обыкновенный
2	Курайская, пастбище	Каштановая	6	Уймонская, сенокос	
3	Канская, пастбище	Темно-каштановая	7	Абайская, пашня	
4	Канская, пашня	Темно-каштановая	8	Абайская, пашня	

Рис. 2. Распределение меди в системе почва–растение: (а) – содержание и внутрипрофильное распределение меди в почве, (б) – содержание меди в растительности, (в) – распределение запасов меди в растительности, %.



№	Котловина, угодие	Почва	№	Котловина, угодие	Почва
1	Чуйская, пастбище	Светло-каштановая	5	Уймонская, пашня	Чернозем обыкновенный
2	Курайская, пастбище	Каштановая	6	Уймонская, сенокос	
3	Канская, пастбище	Темно-каштановая	7	Абайская, пашня	
4	Канская, пашня	Темно-каштановая	8	Абайская, пашня	

Рис. 3. Распределение цинка в системе почва–растение: (а) — содержание и внутрипрофильное распределение цинка в почве, (б) — содержание цинка в растительности, (в) — распределение запасов цинка в растительности. %.



№	Котловина, угодие	Почва	№	Котловина, угодие	Почва
1	Чуйская, пастбище	Светло-каштановая	5	Уймонская, пашня	Чернозем обыкновенный
2	Курайская, пастбище	Каштановая	6	Уймонская, сенокос	
3	Канская, пастбище	Темно-каштановая	7	Абайская, пашня	
4	Канская, пашня	Темно-каштановая	8	Абайская, пашня	

Рис. 4. Распределение молибдена в системе почва—растение: (а) — содержание и внутрипрофильное распределение молибдена в почве, (б) — содержание молибдена в растительности, (в) — распределение запасов молибдена в растительности. %.

Таблица 2. Коэффициенты радиальной дифференциации почв (K_p) и корневого барьера ($K_{кб}$)

Разрез	Горизонт	K _p				K _{кб}			
		Mn	Cu	Zn	Mo	Mn	Cu	Zn	Mo
Высокогорные котловины									
Чуйская котловина, пастбище, светло-каштановая почва									
P.02-14	Ак	1.4	1.3	1.1	1.4	1.5	2.8	1.4	0.2
	Вк	1.2	1.2	0.9	2.3				
Курайская котловина, пастбище, каштановая почва									
P.01-14	Ак	1.4	1.3	1.3	1.3	2.6	2.0	1.6	2.1
	Вк	1.0	1.0	1.1	1.0				
Среднегорные котловины									
Канская котловина, пастбище, темно-каштановая почва									
P.03-14	Ак	1.8	1.3	1.1	0.7	1.2	1.0	1.0	0.5
	Вк	1.2	0.9	0.9	0.7				
Канская котловина, пашня, темно-каштановая почва									
P.04-14	Ак	1.1	1.3	1.1	1.5	2.0	1.3	1.1	0.7
	Вк	0.8	1.3	1.0	1.3				
Уймонская котловина, пашня, почва чернозем обыкновенный									
P.05-14	Ак	1.6	1.4	1.5	2.7	2.5	1.7	1.3	0.4
	Вк	1.0	1.4	1.2	3.2				
Уймонская котловина, естественный сенокос, почва чернозем обыкновенный									
P.06-14	Ак	1.5	1.7	1.4	2.0	8.5	2.5	1.4	0.8
	Вк	0.8	1.3	1.0	2.3				
Абайская котловина, пашня, почва чернозем обыкновенный									
P.03-19	Ак	2.0	1.3	1.4	0.8	3.2	5.0	1.5	0.4
	Вк	1.2	1.0	0.9	0.5				
Абайская котловина, пашня, почва чернозем обыкновенный									
P.04-19	Ак	1.9	2.3	1.3	0.6	3.3	2.7	1.4	1.1
	Вк	1.1	1.8	0.9	1.0				

меди 5.7–13.2 при норме 3–12 мг/кг, для цинка – 24.4–33.0 при норме 20–60 мг/кг, или выше нормальных показателей: для марганца – 40–190 мг/кг, но меньше верхней пороговой концентрации (≥ 500 мг/кг) [24]. Концентрация марганца, меди и цинка в пастбищной траве и сене больше, чем в надземной массе овса.

По-другому складывается распределение молибдена между надземной и подземной частями растений. Максимальные концентрации элемента характерны, наоборот, для надземной массы и варьируют в широких пределах: от 1.6 до 6.9 мг/кг при норме 1.0–2.5 мг/кг [16], а некоторые (овес, Уймонская котловина) превышают МДУ для кормов [25]. Это значительно больше, чем содержание в зерновых культурах, возделываемых на каштановых почвах и черноземах обыкновенных (0.2–0.5 мг/кг), и в разнотравье (0.6–0.7 мг/кг) Алтайского края [20]. На преимущественное на-

копление молибдена в надземной массе озимой пшеницы в фазе молочной спелости (3.29 против 0.95 мг/кг в корнях) указано в работе [26], естественной растительности (0.88 в листьях против 0.59 мг/кг в корнях) [27].

Расчет коэффициентов корневого барьера (отношения содержания элемента в корне к его содержанию в надземных органах) показал, что для марганца, меди и цинка характерным является барьерный тип накопления ($K_{кб} > 1$) (табл. 2). Интенсивность накопления молибдена в корнях меньше по сравнению с надземными органами ($K_{кб} < 1$).

Основным биологическим источником приноса марганца, меди и цинка в почвы являются корни за счет большего удельного веса в структуре общей биологической массы, на долю которых приходится 43–86% у овса и 82–97% у луговых трав. Например, в подземной массе овса сосредоточено: марганца – 71–95, цинка – 52–91,

меди — 79–93%. Для луговых трав этот показатель больше: марганца — 84–98, цинка — 81–98, меди — 82–99%. Ввиду того, что концентрация молибдена больше в надземной части, запасы его в корнях меньше, чем остальных элементов и составляют 25–75% в овсе и 71–87% в луговых травах. Незначительное участие опада в возвращении химических элементов в почву определено только на сенокосных угодьях: марганца — 2, цинка — 4, меди — 3, молибдена — 6%. На пастбище всю надземную массу поедает скот, находящийся здесь до наступления зимы. Также в хозяйствах практикуется выпас животных на пашне после уборки урожая до поздней осени. Поэтому на пашне и пастбище опад отсутствует.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что основными физико-химическими особенностями исследованных почв, определяющими содержание и распределение микроэлементов, являются легкий гранулометрический состав каштановых почв и легко- и среднесуглинистый — черноземов обыкновенных с высоким содержанием крупнозема, а также резкое снижение содержания гумуса и емкости катионного обмена вниз по профилю, слабощелочная реакция среды верхних горизонтов и щелочная — нижних. Лучшими агрохимическими свойствами обладают черноземы обыкновенные и темно-каштановые почвы среднегорных котловин, худшими — светло-каштановые почвы высокогорной Чуйской котловины.

Содержание марганца, меди и цинка в почвенном покрове исследованной территории Горного Алтая характеризуется уменьшением содержания элементов от черноземов обыкновенных и темно-каштановых почв среднегорных котловин к каштановым и светло-каштановым почвам высокогорных. Коэффициент радиальной дифференциации марганца, меди и цинка в гумусовом горизонте >1 , что свидетельствует о биогенном их накоплении и аккумулятивном распределении как в каштановых почвах, так и черноземах обыкновенных. Коэффициент радиальной дифференциации молибдена варьирует в широких пределах: в гумусовом горизонте — от 0,6–0,8 в Абайской котловине до 2,0–2,7 — в Уймонской. Значительная величина коэффициента в черноземе обыкновенном Уймонской котловины (2,3–3,2) в горизонте Вк обусловлена наличием карбонатного биогеохимического барьера.

Большая часть поглощенных растениями (овсом и луговыми травами) марганца, меди и цинка локализуется в корневой системе и меньшая транспортируется в надземную. Для марганца, меди и цинка характерным является барьерный тип накопления, коэффициент корневого барье-

ра >1 . Интенсивность накопления молибдена в корнях меньше по сравнению с надземными органами ($K_{\text{кб}} < 1$).

На содержание и характер профильного распределения биогенных элементов влияет комплекс почвенных факторов: гранулометрический состав, содержание органического вещества, наличие карбонатов, емкость катионного обмена, наличие геохимических барьеров (гумусовый, карбонатный горизонты). Чем тяжелее гранулометрический состав, больше содержание органического вещества, карбонатов и емкость катионного обмена, тем больше валовое содержание исследованных микроэлементов.

Сопряженное исследование почвы и растений позволило установить, что содержание в почвах марганца (в почвах среднегорных котловин), меди и цинка больше кларка, но меньше ПДК и ОДК, а превышение максимально допустимого уровня для кормов содержания марганца и молибдена в растениях агроландшафтов межгорных котловин Горного Алтая незначительное и носит единичный и локальный характер. Концентрация марганца, меди и цинка в пастбищной траве и сене больше, чем в надземной массе овса.

Авторы выражают благодарность Ю.П. Колмогорову за проведение анализов и сотруднику Ф.А. Дарьину за содействие в выполнении работ в Центре синхротронного и терагерцового излучения ИЯФ СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Банникова О.И. Межгорные котловины Алтая как объекты географических исследований // Мат-лы III Международ. конф. “День Земли: экология и образование”. Бийск, 1998. С. 223–224.
2. Алексеев Ю.В. Тяжелые металлы в почвах и растениях. Л.: Агропромиздат, Ленингр. отд-ние, 1987. 142 с.
3. Мальгин М.А. Биогеохимия микроэлементов в Горном Алтае. Новосибирск: Наука, СО, 1978. 272 с.
4. Балыкин Д.Н. Микроэлементы в почвах и растениях Уймонской котловины (Центральный Алтай) // Вестн. АлтайГАУ. 2009. № 5 (55). С. 29–31.
5. Балыкин Д.Н., Пузанов А.В. Микроэлементы в черноземах Уймонской котловины (Центральный Алтай) // Ползунов. вестн. 2004. № 2. С. 190–195.
6. Балыкин Д.Н., Пузанов А.В. Марганец, медь, молибден и бор в почвах среднегорных котловин Алтая // Мир науки, культуры, образов. 2007. № 4 (7). С. 27–30.
7. Балыкин Д.Н., Пузанов А.В., Ельчинова О.А. Редкоземельные элементы в почвах межгорных котловин Алтая // Географ. и природ. ресурсы. 2015. № 1. С. 105–112.
8. Модина Т.Д., Сухова М.Г. Климат и агроклиматические ресурсы Алтая. Новосибирск: Универс. кн. изд-во, 2007. 230 с.

9. Почвы Горно-Алтайской автономной области. Новосибирск: Наука, 1973. 352 с.
10. Piminov P.A. Synchrotron radiation research and application at VEPP-4 // *Physic. Proced.* 2016. V. 84. P. 19–26.
11. Волковинцев В.И. О закономерностях гумусообразования и природе гумуса каштановых почв Горного Алтая // Тр. конф. почвоведов Сибири и Дальнего Востока. Новосибирск, 1964. С. 327–340.
12. Виноградов А.П. Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 259 с.
13. ГН 2.1.7.2041-06 Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве. 6 с.
14. Ковда В.А., Якушевская И.В., Тюрюканов А.Н. Микроэлементы в почвах Советского Союза. М.: Изд-во МГУ, 1959. 68 с.
15. Ильин В.Б. Биогеохимия и агрохимия микроэлементов. Новосибирск: Наука, СО, 1973. 368 с.
16. Ковальский В.В., Андрианова Г.А. Микроэлементы в почвах СССР М.: Наука, 1970. 180 с.
17. ГН 2.1.7.2511-09 Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве. 12 с.
18. Протасова Н.А., Щербаков А.П., Конаева М.Т. Редкие и рассеянные элементы в почвах Центрального Черноземья. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1992. 168 с.
19. Архипов И.А. Биогеохимические особенности, определяющие ландшафтно-геохимическое поведение микроэлементов в почвах Алтая // *Вестн. АлтайГАУ*. 2014. № 4 (114). С. 23–27.
20. Спицына С.Ф., Томаровский А.А., Оствальд Г.В. Поведение молибдена в системе почва–растения на территории Алтайского края // *Вестн. АлтайГАУ*. 2014. № 2 (112). С. 53–57.
21. Томпсон Л.М., Троу Ф.Р. Почвы и их плодородие. М.: Колос, 1982. 320 с.
22. Протасова Н.А., Беляев А.Б. Макро- и микроэлементы в почвах Центрально-Черноземной зоны и почвенно-геохимическое районирование ее территории // *Почвоведение*. 2000. № 2. С. 204–211.
23. Глазковская М.А. Геохимические основы типологии и методики исследований природных ландшафтов. 2-е изд. Смоленск: Ойкумена, 2002. 288 с.
24. Ковальский В.В., Раецкая Ю.И., Грачева Г.И. Микроэлементы в растениях и кормах. М.: Колос, 1971. 236 с.
25. Временный максимально допустимый уровень (МДУ) содержания некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках. М., 1987. 5 с.
26. Ахмедова З.Н. Динамический баланс молибдена в агроценозе // *Изв. ДагестанГПУ. Естеств. и точн. науки*. 2009. № 2 (7). С. 23–29.
27. Рамазанова А.И., Рамазанова Н.И., Ахмедова З.Н. Содержание бора и молибдена в растениях основных фитоценозов равнинного Дагестана // *Вестн. ДагестанГУ. Сер. 1: Естеств. науки*. 2011. № 1. С. 132–137.

Microelements in Agrolandscapes of Altai Intermountain Basins

O. A. Elchinina^{a,*}, A. V. Puzanov^a, T. A. Rozhdestvenskaya^a, and S. Ya. Dvurechenskaya^a

^a Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, ul. Molodezhnaya 1, Barnaul 656038, Russia

*E-mail: eoa59@mail.ru

In this paper, the peculiarities of accumulation and distribution of biogenic elements in the system “soil–agricultural plants” in the intermountain basins of the Altai Mountains were identified. The content of manganese, copper and zinc in the soil cover decreased from ordinary chernozems and dark chestnut soils in mid-mountain basins to chestnut and light chestnut soils of high mountains. Coefficients (<1) of radial differentiation of manganese, copper and zinc in the humus horizon indicated biogenic accumulation and accumulative distribution of these elements in chestnut soils and ordinary chernozems. As for molybdenum, this coefficient varied widely (0.6–3.2). Its high value (2.3–3.2) for ordinary chernozems of the Uymon basin in Bc horizon was due to the carbonate biogeochemical barrier occurrence. A complex of soil factors influenced on content and nature of profile distribution of biogenic elements. For instance, i.e. the heavier the granulometric composition and the higher the organic matter content and carbonate/cation exchange capacity, the greater the total content of the studied trace elements were. Most manganese, copper and zinc absorbed by plants (oats and meadow grasses) was localized in the root system, whereas their little amount – in the above-ground system. The barrier type of accumulation was characteristic for manganese, copper and zinc with root barrier coefficient (RBC) exceeding 1. The intensity of molybdenum accumulation in roots was lower than in above-ground parts (RBC<1). A concurrent study of soils and plants revealed that concentrations of manganese (in soils of mid-mountain basins), copper and zinc were above the Clark value, but lower than MAC (maximum allowable concentration) and APC (approximate permissible concentration). Excess in MAC (for forage) of manganese and molybdenum in plants of agricultural landscapes of intermountain basins of the Altai Mountains was single, local and insignificant. The concentrations of manganese, copper and zinc in pasture grass and hay were higher than in the above-ground mass of oats.

Key words: high- and middle mountain basins, soil, above-ground mass, roots, biogenic elements, intra-profile distribution, radial differentiation coefficient, root barrier coefficient.

УДК 631.861:631.41:631.582:631.445.24

АГРОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРИМЕНЕНИЯ ОРГАНО-МИНЕРАЛЬНОГО УДОБРЕНИЯ ЗА РОТАЦИЮ ПОЛЕВОГО СЕВООБОРОТА НА ДЕГРАДИРОВАННОЙ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЕ

© 2021 г. А. И. Иванов¹, *, Ж. А. Иванова¹

¹ Агрофизический научно-исследовательский институт
195220 Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14, Россия

*E-mail: office@agrophis.ru

Поступила в редакцию 17.06.2020 г.

После доработки 27.08.2020 г.

Принята к публикации 11.03.2021 г.

В многолетнем полевом опыте (2012–2018 гг.) изучено влияние нового органо-минерального удобрения (ОМУ) в среднегодовых дозах от 1.6 до 3.9 т/га на агрохимические свойства подвергшейся деградации окультуренной дерново-подзолистой почвы и продуктивность 7-польного полевого севооборота. Наиболее значительные позитивные изменения произошли с кислотнo-основным и фосфатным состоянием почвы. При внесении ОМУ 1 т/га повышение показателей составило: pH_{KCl} —0.041 ед., S —0.068 смоль(экв)/кг, V —1.2%, $P_2O_{5\text{подв}}$ —4 мг/кг. На фоне средних и высоких доз ОМУ увеличилось содержание гумуса (на 0.27%) и подвижного калия (на 39 мг/кг). Следствием улучшения свойств и режимов почвы стало повышение продуктивности полевого севооборота в среднем на 53% (с 2.51 до 3.84 з.е./м²), а при сочетании с полным минеральным удобрением — на 102%, достигнув 5.08 з.е./м², вариabельность продуктивности культур и севооборота по годам сократилась в среднем в 1.2–1.4 и 1.7–3.0 раза соответственно. При использовании малых и средних доз эффективным было легирование ОМУ калием (K_2SO_4) из расчета 10 кг K_2O /т.

Ключевые слова: деградированная дерново-подзолистая почва, агрохимические свойства, севооборот, продуктивность, органо-минеральное удобрение (ОМУ), доза, баланс, эффективность удобрения.

DOI: 10.31857/S0002188121060053

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день преобладающая часть пахотных почв Нечерноземья затронута деградационными процессами [1–5]. Особенно ощутимы негативные изменения кислотнo-основных свойств и калийного режима прежних окультуренных дерново-подзолистых почв [5–9]. Это осложняет и без того непростую ситуацию с обеспечением хотя бы минимальной рентабельности полевого земледелия. В то же время в ряде областей Нечерноземья (и в частности, в Ленинградской обл.) неудовлетворительно используют немалые ресурсы для производства пометных удобрений [10, 11]. В значительной мере это определяется жесткими экологическими требованиями к применению последних, делающими практически обязательной предварительную промышленную переработку помета [11–14].

В Ленинградской области в ООО “Билавис” разработана энергосберегающая технология производства высококонцентрированного органо-минерального удобрения (ОМУ), представляющего собой гранулированную смесь сухого помета и золы. Последняя является продуктом сжигания части помета с целью высушивания основной его партии [15]. Цель работы — анализ основных данных завершеногo многолетнего полевого опыта по агроэкологической оценке этого удобрения.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Микрополевой опыт в полиэтиленовых сосудах без дна площадью 1 м² проводили в 2012–2018 гг. в Меньковском филиале АФИ на базе развернутого во времени полевого севооборота “пар сидеральный” (люпиновый)—пшеница озимая—ячмень +

+ многолетние травы—многолетние травы—многолетние травы—картофель—рапс яровой. С целью более объективной оценки влияния метеорологических условий опыт формировали одновременно в 3-х закладках, открывавшихся полями, в которых вносили ОМУ (пар под озимую пшеницу, ячмень с подсевом трав и картофель).

Для набивки сосудов использовали затронутую деградационным процессом супесчаную дерново-подзолистую почву контрольного (без удобрений) варианта стационарного опыта АФИ. Ее основные агрохимические свойства на этот момент были следующими: pH_{KCl} 4.74, гумус — 1.85%, $P_2O_{5\text{подв}}$ — 217 мг/кг, $K_2O_{\text{подв}}$ — 92 мг/кг (в 1982 г. при закладке стационарного опыта pH_{KCl} 5.60, гумус — 2.77%, $P_2O_{5\text{подв}}$ — 256 мг/кг и $K_2O_{\text{подв}}$ — 197 мг/кг).

Опыт выполняли по двухфакторной схеме: фактор А — минеральная система удобрения со средними (N75P50K50) и повышенными (N100P75K75) разовыми дозами (четырежды внесение за ротацию), фактор Б — дозы ОМУ: малые (3–4), средние (5–7) и высокие (7–10) т/га, в том числе с легированием калием K_2SO_4 из расчета 10 кг K_2O /т ОМУ (трехкратное внесение за ротацию севооборота). Более детальная характеристика методики дана в работе [16].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Поскольку в 1 т ОМУ содержалось 130 кг кальция, магния и калия в значительной степени в форме оксидов, гидрооксидов и гидрокарбонатов, среди агрохимических свойств почвы наибольшие позитивные изменения соответствовали кислотно-основным (табл. 1). Ранее при анализе данных первых 3-х лет опыта [16], была отмечена незначительность влияния средних и повышенных доз полного минерального удобрения на кислотно-основное состояние почвы. Но в целом за ротацию севооборота негативные изменения стали вполне ощутимыми. На фоне среднегодовых доз N43P29K29 pH_{KCl} исходно среднекислой почвы снизился на 0.36 ед. при увеличении показателя гидролитической кислотности на 1.14 смоль(экв)/кг. Такие изменения носили критический характер для развития требовательных к почвенной реакции культур: пшеницы озимой, ячменя и рапса. Поэтому на их фоне в начале вегетации в условиях прохладной дождливой погоды резко увеличивалось (вплоть до внешних признаков токсикоза) содержание подвижного марганца (до 38–46 мг/кг), усугубляемое оптимизацией азотного режима за счет минеральных удобрений.

Нейтрализующее действие ОМУ коррелировало с его дозами. В среднем в опыте в расчете на 1 т ОМУ/га повышение показателей за ротацию севооборота составило: pH_{KCl} — на 0.041 ед., $S_{\text{обм}}$ — на 0.068 смоль(экв)/кг, V — на 1.2%, снижение показателей — $H_{\text{обм}}$ — на 0.018 смоль(экв)/кг, H_T — на 0.078 смоль(экв)/кг. Дополнение ОМУ калием минерального удобрения эту закономерность не изменяло. С учетом принятых нормативов затрат извести для сдвига pH_{KCl} почвы на единицу [17], нейтрализующее действие 1 т ОМУ/га можно оценить эквивалентным действием 293 кг Са- CO_3 /га. Анализ трансформации всех показателей кислотно-основного состояния почвы позволил считать, что применение изученного ОМУ в полевых севооборотах на дерново-подзолистых почвах в среднегодовых дозах от 1.6 до 2.7 т/га может компенсировать инфильтрационные потери оснований и остановить ставший сегодня хроническим процесс подкисления указанных почв, а в дозе 3.9 т/га — оптимизировать это состояние.

Не столь однозначны полученные в опыте данные относительно влияния ОМУ на гумусное состояние и питательный режим почвы. Хотя и в этом случае прослежена зависимость от величин баланса органического вещества и питательных элементов (табл. 2).

В условиях севооборота с 3-мя полями бобовых и одним полем пропашных культур в вариантах опыта без удобрений и с одними минеральными удобрениями исходное содержание гумуса (1.82–1.88%) сохранялось. Хотя теоретические расчеты (по методике ВНИПТИОУ [18]) указывали на значительный дефицит его баланса. Одностороннее применение средних и высоких доз ОМУ обеспечивало формирование положительного баланса гумуса, выразившееся повышением его содержания относительно исходного показателя в среднем на 0.20%. На фоне минеральных удобрений расчеты показывали ухудшение показателей баланса. Но фактически, при сочетании полного минерального удобрения со средними и высокими дозами ОМУ содержание гумуса в почве увеличилось в среднем на 0.3%. Вероятно, при этом происходило накопление большей массы пожнивно-корневых остатков.

Анализ данных показал также, что использованная в опыте система удобрения на основе ОМУ имела и существенный недостаток — значительный дисбаланс в поступлении и потреблении растениями основных макроэлементов. Особенно остродефицитным был хозяйственный баланс азота, что определило и низкое содержание в почве минерального азота в конце опыта. Естествен-

Таблица 1. Влияние системы удобрения на кислотно-основные свойства дерново-подзолистой почвы (средние 3-х закладок опыта)

Вариант (фактор Б)	Агрохимические показатели почвы в конце ротации севооборота						V, %
	рН _{KCl}	Н _{обм}	Al _{подв}	H _г	S _{обм}	ЕКО	
Без минеральных удобрений (фактор А)							
Контроль (без ОМУ)	4.69	0.50	0.37	2.83	2.53	5.36	47
ОМУ 11 т/га	5.37	0.27	0.17	2.30	3.30	5.60	59
ОМУ 19 т/га	5.70	0.16	0.10	1.67	3.93	5.60	70
ОМУ 27 т/га	5.90	0.11	0.04	1.53	4.27	5.80	74
ОМУ 11 т/га + K110	5.43	0.29	0.18	2.43	3.87	6.30	61
ОМУ 19 т/га + K190	5.77	0.17	0.11	1.80	4.77	6.57	73
ОМУ 27 т/га + K270	5.93	0.10	0.03	1.53	4.70	6.23	75
N300P200K200 (фон 1) (фактор А)							
Контроль (без ОМУ)	4.57	0.61	0.47	3.97	2.50	6.47	39
ОМУ 11 т/га	5.10	0.34	0.23	2.93	2.97	5.90	50
ОМУ 19 т/га	5.40	0.27	0.19	2.33	3.63	5.96	61
ОМУ 27 т/га	5.63	0.19	0.11	1.80	4.50	6.30	71
ОМУ 11 т/га + K110	5.03	0.35	0.22	2.80	3.43	6.23	55
ОМУ 19 т/га + K190	5.27	0.23	0.17	2.50	3.93	6.43	61
ОМУ 27 т/га + K270	5.93	0.11	0.05	1.53	4.63	6.13	75
N400P300K300 (фон 2) (фактор А)							
Контроль (без ОМУ)	4.43	0.66	0.52	4.20	1.90	6.10	31
ОМУ 11 т/га	4.87	0.37	0.24	3.17	2.43	5.60	43
ОМУ 19 т/га	5.27	0.25	0.16	2.37	3.47	5.84	59
ОМУ 27 т/га	5.60	0.18	0.12	1.67	4.23	5.90	72
ОМУ 11 т/га + K110	5.23	0.28	0.16	2.50	3.27	5.77	57
ОМУ 19 т/га + K190	5.37	0.25	0.17	2.23	3.97	6.20	64
ОМУ 27 т/га + K270	5.83	0.14	0.08	1.67	5.20	6.87	76
НСП ₀₅ фактор А	0.15	0.08	0.05	0.14	0.15	0.29	1
фактор Б	0.19	0.14	0.08	0.21	0.23	0.44	3

но, что показатели биологического баланса были лучшими, поскольку 33% севооборотной площади занимали активные азотфиксаторы – клевер и люпин. Иначе был бы невозможен столь высокий агрономический эффект.

Напротив, вследствие высокого содержания в ОМУ фосфора (45 кг/т), интенсивность хозяйственного баланса этого элемента (особенно при высоких дозах) была необоснованно завышенной (до 248–363%). Конечно, при этом наблюдали значительное накопление в почве подвижных соединений фосфора (69 мг P₂O₅/кг) в среднем в вариантах опыта с удобрениями (по 4 мг/кг в расчете на 1 т ОМУ/га). Для повышения содержания P₂O₅ на 1 мг/кг затрачивалось, таким образом, остаточного фосфора удобрений 7.2 кг/га. В абсо-

лютном контроле (без удобрений) содержание подвижного P₂O₅ за 7 лет снизилось на 50 мг/кг, или по 1 мг/кг в расчете на каждые 4 кг/га дефицита баланса фосфора. Это свидетельствовало о резком снижении фосфатной буферной способности среднеоккультуренных почв относительно их хорошооккультуренных аналогов [19], главным образом вследствие постепенного расходования их органической составляющей и ретраградации при подкислении. В целом трансформация показателей фосфатного состояния почвы под влиянием ОМУ указывала на обоснованность приоритетного использования этого нового удобрения на бедных фосфатами почвах.

Баланс калия в севообороте был дефицитным почти во всех вариантах опыта. Но снижение со-

Таблица 2. Влияние систем удобрения на гумусное состояние и питательный режим дерново-подзолистой почвы (средние 3-х закладок опыта)

Дозы ОМУ за ротацию (фактор Б)	Агрохимические показатели почвы в конце ротации севооборота (2018 г.)							
	Гумус		N		P ₂ O ₅		K ₂ O	
	баланс, т/га	%	баланс, кг/га	N _{мин.} , мг/кг	баланс, кг/га	P ₂ O ₅ подв, мг/кг	баланс, кг/га	K ₂ O _{подв} , мг/кг
Без минеральных удобрений (фактор А)								
0	–10.2	1.88	–735	15	–196	167	–588	82
ОМУ 11 т/га	+0.11	1.97	–636	19	+211	256	–486	90
ОМУ 19 т/га	+2.23	2.08	–503	22	+523	277	–365	130
ОМУ 27 т/га	+5.53	2.05	–201	24	+882	32	–108	144
ОМУ 11 т/га + K110	–0.65	2.00	–729	15	+188	257	–27	94
ОМУ 19 т/га + K190	+2.27	2.08	–533	19	+516	298	–199	146
ОМУ 27 т/га + K270	+4.61	2.00	–309	21	+852	318	+76	163
N300P200K200 за ротацию севооборота (фон 1) (фактор А)								
0	–2.67	1.88	–638	17	–85	226	–656	76
ОМУ 11 т/га	–0.50	2.03	–555		+318	273	–566	99
ОМУ 19 т/га	+2.45	2.20	–345	26	+651	277	–385	115
ОМУ 27 т/га	+4.27	2.25	–228	28	+958	314	–274	139
ОМУ 11 т/га + K110	–2.11	1.93	–770	19	+152	248	–629	91
ОМУ 19 т/га + K190	+0.43	2.05	–606	22	+581	296	–402	128
ОМУ 27 т/га + K270	+4.04	2.05	–284	28	+944	326	–46	119
N400P300K300 за ротацию севооборота (фон 2) (фактор А)								
0	–4.02	1.82	–770	18	–57	209	–776	76
ОМУ 11 т/га	–2.74	1.97	–794	20	+318	263	–772	94
ОМУ 19 т/га	+0.37	2.12	–537	22	+662	305	–553	98
ОМУ 27 т/га	+2.29	2.30	–406	24	+774	331	–431	112
ОМУ 11 т/га + K110	–2.39	1.90	–840	15	+304	272	–583	101
ОМУ 19 т/га + K190	–0.52	2.15	–675	19	+625	325	–270	120
ОМУ 27 т/га + K270	+2.84	2.15	–361	24	+786	336	–368	152
HCP ₀₅ фактор А		0.08		3		14		7
фактор Б		0.12		7		17		10

держания его подвижных форм (на 8–10 мг/кг) произошло только в вариантах без применения ОМУ. На фоне тоже отрицательного баланса в вариантах с малыми дозами ОМУ содержание подвижного калия сохранилось на исходном уровне, а в вариантах со средними и высокими дозами даже повысилось (в среднем на 38 мг/кг). Установленная закономерность является очередным подтверждением обоснованности мнения ряда ученых [7, 8, 20] о недостаточной изученности процессов преобразования соединений калия в почве. Вероятно, в почвенно-агрохимических условиях обсуждаемых вариантов опыта имело место стимулирующее действие ОМУ в направлении мобилизации калия с более энергоемких позиций [7, 8, 21].

Внесение в почву NPK в составе ОМУ в количестве от 1133 до 2781 кг/га и органического вещества 8–20 т/га за ротацию севооборота сопровождалось улучшением не только агрохимических, но и агрофизических свойств почвы [15], следовательно и ее питательного и водно-воздушного режимов. Поэтому положительное действие этого удобрения на первых культурах отметили даже при визуальных наблюдениях уже в начальных фазах онтогенеза. Напротив, полное минеральное удобрение (а вероятнее, его азотный компонент) в условиях выраженного подкисления почвы на фоне прохладной дождливой погоды в начале вегетации вызывало и при повышении дозы усиливало признаки марганцевого токсикоза мо-

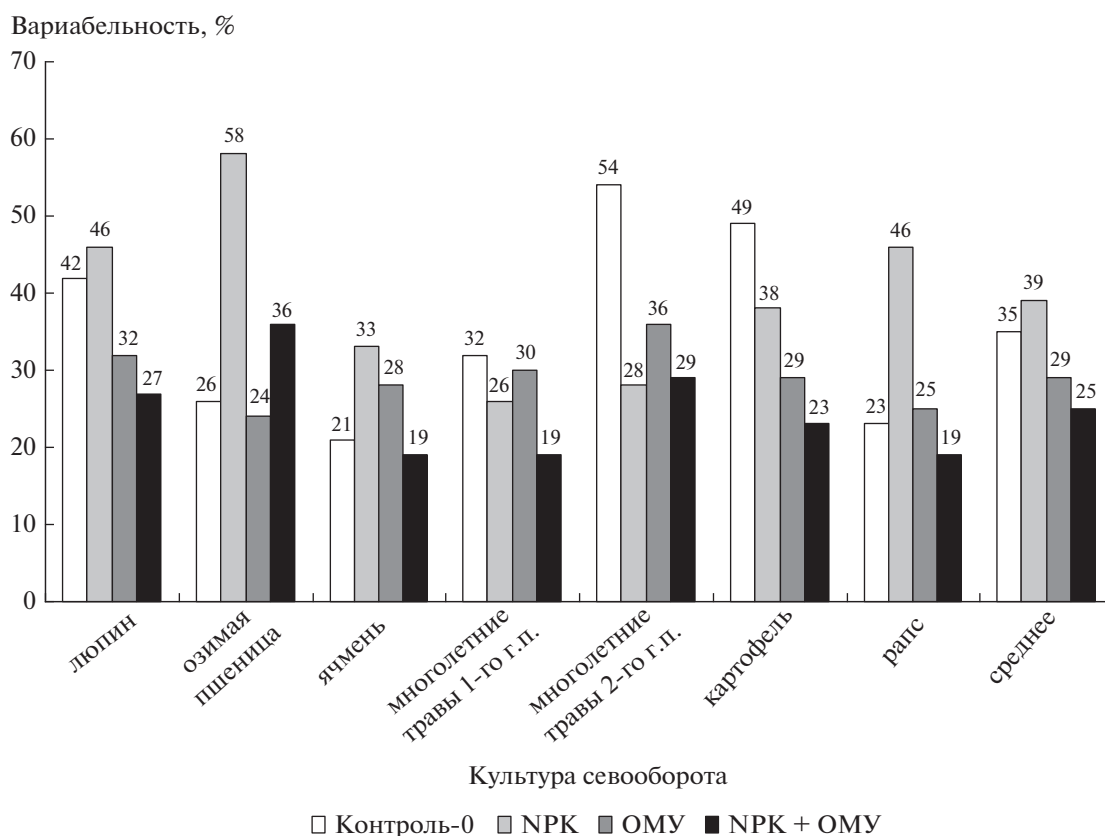


Рис. 1. Временная вариабельность (коэффициент вариации) продуктивности полевых культур.

лодых растений озимой пшеницы, ячменя и даже требовательного к элементу рапса. Характер и остроту их проявления определяли погодно-климатические условия (степень переувлажнения почвы и продолжительность волны холода). При этом негативный физиологический эффект напрямую зависел от дозы минерального (в первую очередь азотного) удобрения. Обычно негативные последствия преодолевались молодыми посевами через 10–15 сут после наступления устойчиво теплой погоды, но полностью компенсировать возникающие таким образом издержки для продукционного процесса было уже невозможно. Прямым результатом этого стало не только снижение окупаемости удобрений в отдельные годы, но и резкое (в 2 раза) повышение с 21–26 до 33–58% временной вариабельности продуктивности этих культур под действием минеральной системы удобрения (рис. 1).

Агрономическая эффективность ОМУ в целом зависела от величины его доз, биологических особенностей сельскохозяйственных растений и погодных условий. Урожайность и озимой пшеницы, и ячменя, и картофеля закономерно увеличивалась по мере повышения доз ОМУ с 3–4 до 7–10 т/га, хо-

тя при этом окупаемость 1 кг NPK снижалась. Средние для изученных доз прибавки урожайности зерновых культур составили 89, картофеля – 77% (вероятно, сказывалась более высокая отзывчивость пшеницы и ячменя на раскисление почвы). Сочетание ОМУ с полным минеральным удобрением обеспечивало как значительное повышение урожайности (до 5.2–6.4 т зерна и 60.5 т клубней картофеля на 1 га), так и увеличение оплаты 1 кг NPK зерновыми культурами с, 62 до 7.1 з.е., картофеля – с 7.7 до 11 з.е.

С учетом относительной обедненности ОМУ калием легирование его калийным удобрением было эффективным и в посадках картофеля, и в посевах зерновых: в расчете на 1 кг K_2O в составе K_2SO_4 было получено 20 и 9 з.е. соответственно. Исключение составил вариант, в котором высокие дозы ОМУ вносили на фоне повышенных доз минеральных удобрений.

Существенное влияние на агрономическую эффективность ОМУ оказывали погодные условия. Обычно в неблагоприятные по метеословиям годы относительные прибавки урожайности от этого удобрения оставались достаточно высокими, но значительно меньшими по абсолютной

Таблица 3. Агрономическая эффективность ОМУ за ротацию севооборота (средние 3-х закладок опыта)

Доза ОМУ за ротацию	Продуктивность севооборота, з.е./м ²	Вариабельность продуктивности, %	Прибавка продуктивности						Оплата 1 кг NPK, з.е.		
			от всех удобрений		от ОМУ		от K ₂ O		всех удоб- рений	ОМУ	K ₂ O
			з.е./м ²	%	з.е./м ²	%	з.е./м ²	%			
Без минеральных удобрений (фактор А)											
0	2.51	12	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ОМУ 11 т/га	3.41	9	0.90	36	0.90	36	—	—	7.9	7.9	—
ОМУ 19 т/га	3.92	7	1.41	56	1.41	56	—	—	7.2	7.2	—
ОМУ 27 т/га	4.20	8	1.69	67	1.69	67	—	—	6.1	6.1	—
ОМУ 11 т/га + K110	3.52	5	1.01	40	1.01	40	0.115	5	8.1	8.1	10.5
ОМУ 19 т/га + K190	4.11	4	1.60	64	1.60	64	0.184	7	7.4	7.4	9.7
ОМУ 27 т/га + K270	4.33	6	1.82	72	1.82	72	0.124	5	6.0	6.0	4.6
N300P200K200 за ротацию севооборота (фон 1) (фактор А)											
0	3.26	8	0.75	30	—	—	—	—	10.7	—	—
ОМУ 11 т/га	4.17	2	1.67	66	0.91	28	—	—	9.1	8.1	—
ОМУ 19 т/га	4.69	6	2.18	87	1.43	44	—	—	8.2	7.3	—
ОМУ 27 т/га	5.11	3	2.60	103	1.85	57	—	—	7.5	6.6	—
ОМУ 11 т/га + K110	4.50	2	1.99	79	1.24	38	0.326	10	10.2	10.0	29.6
ОМУ 19 т/га + K190	5.08	5	2.57	103	1.82	56	0.392	12	9.0	8.5	20.6
ОМУ 27 т/га + K270	5.37	4	2.86	114	2.11	65	0.264	8	7.6	6.9	9.8
N400P300K300 за ротацию севооборота (фон 2) (фактор А)											
0	3.78	8	1.28	51	—	—	—	—	12.8	—	—
ОМУ 11 т/га	4.82	6	2.31	92	1.04	27	—	—	10.8	9.1	—
ОМУ 19 т/га	5.20	2	2.70	107	1.42	38	—	—	9.1	7.3	—
ОМУ 27 т/га	5.68	2	3.17	126	1.89	50	—	—	8.4	6.8	—
ОМУ 11 т/га + K110	5.18	5	2.67	106	1.40	37	0.361	10	11.9	11.2	32.8
ОМУ 19 т/га + K190	5.49	4	2.98	119	1.71	45	0.288	8	9.5	8.0	15.2
ОМУ 27 т/га + K270	5.69	3	3.18	127	1.9	50	0.015	0.4	7.9	6.3	0.6
HCP ₀₅ фактор А			0.20								
фактор Б			0.30								
взаимодействие АБ			0.49								

величине. Соответственно снижалась и окупаемость единицы действующего вещества. При этом степень благоприятности погодных условий определялась во многом биологическими особенностями культуры. Например, весна и лето 2012 г., характеризовавшиеся чередованием продолжительных периодов засухи и обильных осадков, оказались крайне неблагоприятными для ячменя (на 1 кг NPK в составе ОМУ было получено всего от 1.4 до 5.5 з.е.), но вполне благополучными для картофеля (оплата 1 кг NPK — от 6.2 до 14.7 з.е.).

В отличие от минеральных удобрений, дестабилизирующих в почвенно-климатических усло-

виях опыта продуктивность требовательных к почвенной реакции культур, ОМУ снижало вариабельность в среднем в 1.2 раза, в сочетании с минеральными удобрениями — в 1.4 раза (рис. 1).

Поскольку в севообороте ОМУ вносили через 1–2 года, то агрономическая эффективность его в последствии в посевах многолетних трав, ярового рапса и даже малотребовательного однолетнего люпина была также существенной. В результате это обеспечило повышение продуктивности севооборота при внесении ОМУ в чистом виде на 36–72%, при сочетании с минеральными удобрениями — на 66–127% (табл. 3).

Как и урожайность первых культур, продуктивность севооборота стабильно возрастала по мере увеличения доз ОМУ, хотя оплата 1 кг NPK при этом снижалась с 7.9–9.1 (доза 11 т/га) до 7.2–7.3 (доза 19 т/га) и до 6.1–6.8 з.е. (доза 27 т/га). При совместном применении ОМУ с минеральными удобрениями оплата 1 кг NPK повышалась в среднем с 7.1 до 7.5 з.е.

Следует отметить, что применительно к продуктивности севооборота в целом ее временная вариабельность оказалась уже незначительной (коэффициент вариации в среднем в вариантах опыта составил 6%), в то время как по показателям урожайности отдельных культур в отдельных вариантах он доходил до 80%. Объясняется это и сглаживающим влиянием последствий удобрений (после лет ослабленного прямого действия, как правило, повышался эффект последствий) и неодинаковой реакцией разных культур на погодные условия. Это указывало на первостепенное значение севооборота в адаптации регионального земледелия к погодно-климатическим аномалиям. При этом положительный стабилизирующий характер имело действие минеральной системы удобрения, нового органо-минерального удобрения и их сочетания (коэффициент вариации продуктивности севооборота по годам снизился в 1.5, 1.7 и 3 раза соответственно).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение в полевом севообороте на деградированной дерново-подзолистой почве нового ОМУ в разовых дозах от 3 до 10 т/га (от 11 до 27 т/га за ротацию) сопровождалось улучшением большинства изученных агрохимических свойств почвы. Особенно существенные позитивные изменения достигались использованием средних и высоких доз ОМУ: повышение pH_{KCl} относительно исходного показателя на 0.89 ед., содержания обменных оснований — на 1.77 смоль(экв)/кг, гумуса — на 0.27%, подвижного фосфора — на 94 мг/кг, подвижного калия — на 39 мг/кг.

Произошедшее под влиянием удобрения улучшение свойств и режимов почвы обеспечило высокую эффективность ОМУ в прямом действии (увеличение урожайности картофеля и зерновых культур на 77–89%) и последствии. В результате продуктивность полевого севооборота возросла в среднем на 53% (с 2.51 до 3.84 з.е./м²), а при сочетании с минеральными удобрениями — на 102%, достигнув продуктивности 5.08 з.е./м². При этом вариабельность продуктивности культур и севооборота по годам сократилась в среднем в 1.2–1.4 и 1.7–3.0 раза соответственно. При использовании

малых и средних доз эффективным было легирование ОМУ K_2SO_4 из расчета 10 кг K_2O /т ОМУ.

Есть основание прогнозировать повышение агроэкологической эффективности применения ОМУ на обедненных фосфатами почвах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шафран С.А.* Динамика применения удобрений и плодородие почв // *Агрохимия*. 2004. № 1. С. 18–24.
2. *Ефимов В.Н., Иванов А.И.* Деграция хорошо окультуренных дерново-подзолистых почв // *Докл. РАСХН*. 2001. № 6. С. 21–23.
3. *Шафран С.А.* Динамика плодородия почв Нечерноземной зоны и резервы // *Агрохимия*. 2016. № 8. С. 3–10.
4. *Архипов М.В.* Оценка биопотенциала производства продовольствия в Северо-Западном регионе России. СПб.—Пушкин, 2016. 136 с.
5. *Иванов А.И., Воробьев В.А., Иванова Ж.А.* Современные деградационные процессы в хорошо окультуренных дерново-подзолистых почвах // *Пробл. агрохим. и экол.* 2015. № 3. С. 15–19.
6. *Иванов А.И.* Некоторые закономерности изменения кислотно-основного состояния дерново-подзолистых легкосуглинистых почв при сельскохозяйственном использовании // *Агрохимия*. 2000. № 10. С. 28–33.
7. *Иванов А.И., Иванов И.А., Воробьев В.А., Лямцева Е.Г.* Изменение калийного состояния хорошо окультуренной дерново-подзолистой почвы при применении калий-дефицитной системы удобрения // *Агрохимия*. 2009. № 4. С. 21–26.
8. *Воробьев В.А.* Агроэкологические аспекты природно-антропогенной трансформации калийного состояния дерново-подзолистых почв Северо-Запада России: Дис. ... д-ра с.-х. наук. Великие Луки, 2016. 272 с.
9. *Иванов А.И., Вязовский А.А., Конашенков А.А., Петров И.И., Воробьев В.А.* Актуальные вопросы известкования кислых почв Нечерноземья // *Агрохим. вестн.* 2019. № 6. С. 3–9.
10. *Мерзлая Г.Е., Лысенко В.П.* Ресурсы птицефабрик для производства органических удобрений // *Агрохим. вестн.* 2005. № 3. С. 21–23.
11. *Брюханов А.Ю.* Методы проектирования и критерии оценки технологий утилизации навоза, помета, обеспечивающие экологическую безопасность: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. СПб.: СПбГАУ, 2017. 49 с.
12. ГОСТ 53765-2009 “Помет птицы. Сырье для производства органических удобрений. Технические условия”.
13. *Сычев В.Г.* Экология применения органических удобрений. М.: ВНИИА, 2017. 336 с.
14. Производство, изучение и применение удобрений на основе птичьего помета / Под ред. А.И. Иванова, В.В. Лапы. СПб.: АФИ, 2018. 317 с.
15. *Фрейдкин И.А.* Агроэкологическая оценка эффективности применения нового органо-минерально-

- го удобрения в условиях Северо-Запада РФ: Дис. ... канд. с.-х. наук. СПб.: АФИ, 2017. 144 с.
16. *Иванов А.И., Иванова Ж.А., Фрейдкин И.А., Соколов И.В.* Изменение агрохимических свойств деградированной дерново-подзолистой почвы при внесении нового органо-минерального удобрения // *Агрохимия*. 2019. № 3. С. 30–36.
 17. *Фрид А.С.* Зонально-провинциальные нормативы изменений агрохимических, физико-химических и физических показателей основных пахотных почв европейской территории России при антропогенных воздействиях. Метод. рекоменд. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2010. 176 с.
 18. *Попов П.Д., Жуков А.И., Лукин С.М., Мосалева В.В.* Расчет баланса гумуса и потребности в органических удобрениях: Метод. рекоменд. Владимир, 1986. 17 с.
 19. *Иванов А.И., Ильющенко В.В.* Фосфатный режим хорошо окультуренных дерново-подзолистых почв Северо-Запада России и его трансформация в современных условиях // *Докл. РАСХН*. 2000. № 2. С. 23–25.
 20. *Сычев В.Г.* Возможности совершенствования градиции содержания доступного калия // *Агрохим. вестн.* 2000. № 5. С. 30–34.
 21. *Никитина Л.В., Володарская И.В.* Динамика обменного калия и его минимальные уровни в агроценозах на дерново-подзолистых почвах // *Агрохимия*. 2007. № 2. С. 14–18.

Agroecological Evaluation of Organic-Mineral Fertilizer for One Rotation of a Field Crop Rotation in Degraded Sod-Podzolics Soil

A. I. Ivanov^{a, #} and Zh. A. Ivanova^a

^a *Agrophysical Research Institute, Grazhdansky prosp. 14, St. Petersburg 195220, Russia*

[#] *E-mail: office@agrophis.ru*

In a long-term field experiment (2012–2018), the influence of a new organo-mineral fertilizer (OMF) in average annual doses from 1.6 to 3.9 t/ha on the agrochemical properties of degraded cultivated sod-podzolic soil and the productivity of a 7-field crop rotation was studied. The most significant positive changes occurred with the acid-base and phosphate state of the soil. With the introduction of OMF 1 t/ha, the increase in indicators was: pH_{KCl} – on 0.041 units, S – on 0.068 cmol(eq)/kg, V – 1.2%, $\text{P}_2\text{O}_{5\text{mobile}}$ – 4 mg/kg. Against the background of medium and high doses of OMF, the content of humus (by 0.27%) and mobile potassium (by 39 mg/kg) increased. The improvement of soil properties and regimes resulted in an increase in the productivity of field crop rotation by an average of 53% (from 2.51 to 3.84 f.u./m²), and when combined with full mineral fertilizer – by 102%, reaching 5.08 f.u./m². The variability of crop productivity and crop rotation over the years decreased by an average of 1.2–1.4 and 1.7–3.0 times, respectively. When using small and medium doses, the doping of OMF with potassium (K_2SO_4) at the rate of 10 kg K_2O /t was effective.

Key words: degraded sod-podzolic soil, agrochemical properties, crop rotation, productivity, organo-mineral fertilizer (OMF), dose, balance, fertilizer efficiency.

УДК 58.085:634.739.2:634.738:634.737

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ПИТАТЕЛЬНЫХ СРЕД И РЕГУЛЯТОРОВ РОСТА ПРИ КЛОНАЛЬНОМ МИКРОРАЗМНОЖЕНИИ НЕКОТОРЫХ ХОЗЯЙСТВЕННО ЦЕННЫХ ПРЕДСТАВИТЕЛЕЙ РОДА *Rubus* L.¹

© 2021 г. Д. Н. Зонтиков¹, *, С. А. Зонтикова¹, К. В. Малахова¹¹ Костромской государственный университет 156005 Кострома, ул. Дзержинского, 17, Россия

*E-mail: zontikovd@mail.ru

Поступила в редакцию 09.12.2020 г.

После доработки 30.12.2020 г.

Принята к публикации 11.03.2021 г.

Представители рода *Rubus* L.: малина обыкновенная (*Rubus idaeus* L.), ежевика складчатая (*Rubus fruticosus* L.), морошка приземистая (*Rubus chamaemorus* L.) и княженика арктическая (*Rubus arcticus* L.) — ценные ягодные культуры, активно возделываемые в промышленных масштабах. Несмотря на существующие методы клонального размножения для представителей этого рода, из-за влияния генотипических особенностей и изменений в генотипе в процессе селекции, актуальна работа по оптимизации методики размножения. Целью работы были подбор питательной среды и регуляторов роста для размножения различных сортов *R. idaeus*, *R. fruticosus*, *R. arcticus*, *R. chamaemorus* в культуре *in vitro*. На этапе введения в культуру *in vitro* исследовали вид питательной среды, подходящий для отобранных сортов и форм, регуляторы роста при этом были подобраны по литературным источникам, предпочтение отдавали наиболее часто используемым. Для изучения влияния регуляторов роста на активацию пазушных меристем на этапе введения в культуру использовали питательную среду *MS* с добавлением мезоинозита в концентрации 100 мг/л, глицина — 2 мг/л, тиамина — 0.5 мг/л, пиридоксина — 0.5 мг/л, сахарозы — 20 г/л, агара — 5.0 г/л, применяли регуляторы роста — 6-бензил-аминопурин (БА) 0.50 мг/л и индолилмасляную кислоту (ИВА) 0.05 мг/л совместно с БА 0.75 мг/л, во всех вариантах использовали гибберелловую кислоту (GA₃) 0.1 мг/л при pH 3.8–5.8 в зависимости от вида растения. Были получены следующие результаты: в лучшем варианте, содержащем БА, ИВА, GA₃ в концентрации 2.0, 0.20, 0.1 мг/л, для *R. idaeus* L. (сорт Амира), рост почек отмечали уже на 14-е ± 2 сут, количество почек достигало 3.2 ± 0.3. Для *R. chamaemorus* (сорт Ньюбу) лучший вариант питательной среды содержал БА, ИВА, GA₃ в концентрациях 2.0, 0.20, 0.1 мг/л соответственно, рост почек отмечали на 23-и ± 2 сут, количество почек достигало 2.9 ± 0.4; для *R. arcticus* (сорт Астра) лучшим вариантом была среда с БА 0.5 мг/л + ИВА 0.05 мг/л, рост почек отмечали на 16-е ± 2 сут, количество новых почек достигало 4.1 ± 0.3; у *R. fruticosus* L. (сорт Каракка блэк) лучшие результаты были отмечены на среде с концентрацией БА 1.0 мг/л + ИВА 0.1 мг/л, рост почек начался на 18-е ± 2 сут, количество почек составило 2.5 ± 0.2/эксплант.

Ключевые слова: клональное микро размножение, питательные среды, *Rubus idaeus* L., *Rubus fruticosus* L., *Rubus chamaemorus* L., *Rubus arcticus* L.

DOI: 10.31857/S0002188121060144

ВВЕДЕНИЕ

Род *Rubus* L. включает в себя значительное количество видов, ягоды которых используются человеком в пищу, при помощи селекции получены сорта для возделывания в культуре. Наибольшее распространение получили сорта на основе 2-х видов — это малина обыкновенная (*Rubus idaeus* L.) и ежевика складчатая (*Rubus fruticosus* L.). Однако в последнее время активно используются для селекции и для плантационного выращивания

ния сорта, полученные от таких видов как морошка приземистая *Rubus chamaemorus* L., княженика арктическая *Rubus arcticus* L. [1–5].

Работ, в которых исследовали особенности клонального микро размножения этих видов и сортов, полученных на их основе (*R. idaeus* и *R. Fruticosus*), довольно много: можно выделить основополагающие схожие составляющие метода, например, использование в качестве макро- и микроэлементной составляющей питательной среды Мурасиге—Скуга (*MS*). Однако остается еще много вопросов. Это обусловлено прежде всего обилием

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект номер 20-016-00134 А).

Таблица 1. Опубликованные результаты по клональному микроразмножению *R. idaeus*, *R. fruticosus*, *R. arcticus*, *R. chamaemorus* в культуре *in vitro*

Вид	Источ- ник	Предлагаемая для использования питательная среда, регуляторы роста и др. в целях								
		размножения					укоренения			
		мг/л								
		среда	BA	IBA	GA ₃	LAA	среда	IBA	IAA	NAA
<i>Rubus idaeus</i>	[11]	MS	2.0	0.5	0.1	—	MS	2.0	0.5	—
	[12]	MS	2.0	—	—	—	1/2MS	0.5	—	—
	[13]	MS	3.0	0.1	—	25—50	MS	0.5	—	—
<i>Rubus chamaemorus</i>	[14]	MS	0.5—1.5	0.1	—	—	MS	0.2	—	—
	[9]	MS	0.5—1.5	0.1	0.1	—	MS	0.1	—	—
<i>Rubus arcticus</i>	[10]	MS	0.5	—	—	—	1/2MS	—	—	0.1
	[15]	MS	1.5	0.25	—	—	—	—	—	—
<i>Rubus fruticosus</i>	[16]	MS	2.0	—	0.1—1.0	—	MS	2.0	—	—
	[17]	MS	0.7	—	—	—	MS	1.0	—	—
	[17]	MS	1.0	0.1	0.1	—	MS	—	—	—

Примечание. BA — 6-бензиламинопурин, IBA — индолилмасляная кислота, IAA — индолилуксусная кислота, NAA — нафтилуксусная кислота, LAA — L-аскорбиновая кислота, GA₃ — гибберелловая кислота.

генотипов, вовлеченных в селекционный процесс [6–8], что приводит к различным проявлениям морфогенетического потенциала этих генотипов в культуре *in vitro*. Для видов, которые относительно недавно стали использовать в растениеводстве, методы клонального микроразмножения разработаны для некоторых сортов, но не применимы для остальных (*R. chamaemorus*) [9], либо разработаны, но не учитывают специфику их применения в производственном процессе (*R. arcticus*) [10].

К настоящему времени существует большое количество описаний методов, используемых для клонального микроразмножения представителей рода *Rubus* (табл. 1). В качестве основных составляющих при размножении в культуре *in vitro* можно назвать использование питательной среды Мурасиге–Скуга (по прописи 1962 г. или модифицированных), а также использование в качестве регулятора роста 6-бензиламинопурина (BA) в разных концентрациях. Также нужно отметить использование для укоренения индолилмасляную кислоту (IBA), α-нафтилуксусную кислоту (NAA) и при необходимости получить удлиненные побеги — гибберелловую кислоту (GA₃).

Несмотря на относительно большое количество информации по размножению представителей рода *Rubus*, остается много проблемных вопросов эффективности введения в культуру, состава питательных сред и применения регуляторов роста, активности ионов водорода в питательной среде. Новые сорта и виды, перспективные для планта-

ционного выращивания, требуют оптимизации состава питательных сред, а также разработки технологии клонального микроразмножения для новых в использовании видов. Исходя из этого, цель работы — подбор питательной среды и регуляторов роста, оптимальных для размножения различных сортов *R. idaeus*, *R. fruticosus*, *R. arcticus*, *R. chamaemorus* в культуре *in vitro*.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для работы были отобраны следующие сорта: *Rubus idaeus* L. (Амира), *Rubus chamaemorus* L. (Нюбу), *Rubus arcticus* L. (Астра), *Rubus fruticosus* L. (Каракка блэк). С целью снижения уровня контаминации донорные растения культивировали в лабораторных условиях и по мере необходимости использовали в работе. В качестве донорных эксплантов выступали метамеры побега.

Метамеры длиной 5 мм с почкой в чашке Петри переносили в ламинарный бокс и стерилизовали в 70%-ном водном растворе этанола в течение 1 мин, после этого метамеры помещали на 15 мин в 5%-ный водный раствор гипохлорита натрия и промывали в 3-х сосудах со стерильной водой объемами не менее 100 мл. После стерилизации скальпелем отсекали лишние ткани побега, оставляя только узел с почкой, который сажали на питательные среды.

На этапе введения в культуру *in vitro* исследовали вид питательной среды, подходящий для отобранных сортов и форм, регуляторы роста при

этом были подобраны по литературным источникам, предпочтение отдавали наиболее часто используемым. Для изучения влияния регуляторов роста на активацию пазушных меристем на этапе введения в культуру использовали питательную среду MS [19] с добавлением мезоинозита в концентрации 100 мг/л, глицина — 2 мг/л, тиамина — 0.5 мг/л, пиридоксина — 0.5 мг/л, сахарозы — 20 г/л, агара — 5.0 г/л.

В опыте по влиянию регуляторов роста использовали концентрации в соотношении цитокинины : ауксины = 10 : 1. Выбор количества и сочетания регуляторов роста проводили, основываясь на рекомендациях разных авторов по культивированию тканей: 6-бензиламинопурин (БА) — от 0.50 до 2.5 мг/л и индолилмасляная кислота (ИВА) — от 0.05 до 0.25 мг/л; во всех вариантах использовали гибберелловая кислота (GA_3) в концентрации 0.1 мг/л. Величину pH питательной среды доводили до 3.8–5.8 в зависимости от вида растения. В опыте в каждом варианте закладывали по 10 эксплантов для каждого клона в трехкратной повторности.

Для изучения влияния состава питательных сред использовали питательную среду MS [19], в качестве контроля концентрация макроэлементного состава варьировала от 100 до 75 и 50%. Микроэлементы и витамины оставались в полном объеме.

Культивирование растительных тканей и растений-регенерантов на этапе введения в культуру *in vitro*, роста и развития побегов проводили в стеклянных культуральных сосудах объемом 10 мл. На этапе роста и размножения растений-регенерантов использовали культуральные сосуды объемом 100–500 мл. Культивирование растений-регенерантов проводили при освещении 1500 лк и периоде 16 ч (день)/8 ч (ночь) при температуре $\leq 25^\circ\text{C}$.

Каждый вариант опыта по влиянию регуляторов роста и концентрации макроэлементов в питательной среде на морфогенез объектов исследования выполнен в трехкратной повторности. Экспериментальные данные представлены в виде средних арифметических (M) с указанием ошибки среднего ($\pm SEM$). Расчет доверительного интервала на основании t -распределения Стьюдента при уровне значимости 0.05 проводили с использованием статистического пакета программы Microsoft Excel 2010.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При оценке влияния регуляторов роста на активность морфогенеза в момент введения в культуру *in vitro* в качестве основных показателей, по

которым проводили анализ, были использованы следующие: количество образовавшихся почек на одном экспланте, срок геммогенеза, учет появления витрифицированных побегов. В опыте по влиянию регуляторов роста на морфогенез, было установлено, что для *R. idaeus* (сорт Амира) и *R. chamaemorus* (сорт Ньюбу) лучшим вариантом было применение БА — от 0.5 до 2.5 мг/л и ИВА — от 0.05 до 0.25 мг/л и 0.1 мг GA_3 . Рост новых почек начинался через 14 ± 2 сут после введения в культуру *in vitro*, при этом количество растущих почек достигало 3.2 ± 0.3 шт./эксплант у *R. idaeus* (сорт Амира). На среде с большей концентрацией регуляторов роста отмечали большее количество почек, но развивающиеся из них побеги были витрифицированы. Таким образом, полученные данные относительно концентрации БА на этапе размножения *R. idaeus* (сорт Амира) согласовались с результатами, приведенными в работах [11, 12]. Нами было подобрано оптимальное содержание ауксина ИВА (0.2 мг/л), что позволило снизить количество витрифицированных микропобегов данного сорта до минимума. Срок геммогенеза и количество растущих почек на экспланте у *R. chamaemorus* (сорт Ньюбу) составляло 23 ± 2 сут и 2.9 ± 0.4 почек/эксплант соответственно; в варианте с большей концентрацией регуляторов роста отмечали гибель $>65\%$ заложенных эксплантов. В отношении данного вида выявили необходимость больших концентраций регуляторов роста, чем это было описано в работах [9, 14], до 2.0 мг БА/л и 0.2 мг ИВА/л. Для *R. arcticus* (сорт Астра) лучшим вариантом было применение 0.5 мг БА/л и 0.05 мг ИВА/л, рост почек отмечали на $16\text{-е} \pm 2$ сут, количество новых почек достигало 4.1 ± 0.3 шт./эксплант; в вариантах с концентрацией регуляторов роста >2.0 и 2.5 мг БА/л отмечена гибель эксплантов. Данный вид более чувствительный к концентрациям регуляторов роста, его оптимум был ограничен минимальными концентрациями БА и ИВА, использованными в настоящем исследовании. При концентрациях цитокининов и ауксинов, рекомендованных в работе [15], у сорта Астра наблюдали токсическое воздействие регуляторов роста на почки экспланта, выразившееся в угнетении их ростовых процессов, а также витрификации и гибели микропобегов. Для *R. fruticosus* (сорт Каракка блэк) лучшие результаты были отмечены на среде с концентрацией БА 1.0 мг/л и ИВА 0.1 мг/л, рост почек начался на $18\text{-е} \pm 2$ сут, количество почек составило 2.5 ± 0.2 шт./эксплант (табл. 2). Полученные результаты определили оптимальное содержание регуляторов роста, использованных при микроразмножении

Таблица 2. Влияние регуляторов роста 6-бензиламинопурина и индолилмасляной кислоты на морфогенез *R. idaeus* (сорт Амира), *R. chamaemorus* (сорт Ньюбу), *R. arcticus* (сорт Астра), *R. fruticosus* (сорт Каракка блэк)

Регуляторы роста, концентрация, мг/л	Виды (сорта) растений	Начало роста почек, сут, $M \pm SEM$	Количество почек, шт./эксплант, $M \pm SEM$	Витрификация, +/-
0.50 BA, 0.05 IBA, 0.1 GA ₃	<i>R. idaeus</i> (сорт Амира)	28 ± 2	1.1 ± 0.1	—
1.0 BA, 0.10 IBA, 0.1 GA ₃		25 ± 3	1.2 ± 0.2	—
1.5 BA, 0.15 IBA, 0.1 GA ₃		24 ± 2	1.4 ± 0.2	—
2.0 BA, 0.20 IBA, 0.1 GA ₃ *		14 ± 2	3.2 ± 0.3	—
2.5 BA, 0.25 IBA, 0.1 GA ₃		14 ± 2	3.4 ± 0.3	+
0.50 BA, 0.05 IBA, 0.1 GA ₃	<i>R. chamaemorus</i> (сорт Ньюбу)	54 ± 3	1.0 ± 0.1	—
1.0 BA, 0.10 IBA, 0.1 GA ₃		50 ± 2	1.3 ± 0.2	—
1.5 BA, 0.15 IBA, 0.1 GA ₃		39 ± 2	1.5 ± 0.2	—
2.0 BA, 0.20 IBA, 0.1 GA ₃ *		23 ± 2	2.9 ± 0.4	—
2.5 BA, 0.25 IBA, 0.1 GA ₃		—	—	+
0.50 BA, 0.05 IBA, 0.1 GA ₃ *	<i>R. arcticus</i> (сорт Астра)	16 ± 2	4.1 ± 0.3	—
1.0 BA, 0.10 IBA, 0.1 GA ₃		15 ± 3	2.9 ± 0.2	+
1.5 BA, 0.15 IBA, 0.1 GA ₃		15 ± 4	1.3 ± 0.5	+
2.0 BA, 0.20 IBA, 0.1 GA ₃		—	—	+
2.5 BA, 0.25 IBA, 0.1 GA ₃		—	—	+
0.50 BA, 0.05 IBA, 0.1 GA ₃	<i>R. fruticosus</i> (сорт Каракка блэк)	34 ± 2	1.2 ± 0.2	—
1.0 BA, 0.10 IBA, 0.1 GA ₃ *		18 ± 2	2.5 ± 0.2	—
1.5 BA, 0.15 IBA, 0.1 GA ₃		18 ± 2	2.0 ± 0.5	—
2.0 BA, 0.20 IBA, 0.1 GA ₃		19 ± 3	1.9 ± 0.4	—
2.5 BA, 0.25 IBA, 0.1 GA ₃		—	—	+

Примечание. Питательная среда *MS*, сахара 20 г/л, pH 3.8 (*R. chamaemorus*), 5.6–5.9 (остальные виды); прочерк — гибель эксплантов. *Варианты, имеющие достоверные существенные различия на 5%-ном уровне значимости по *t*-критерию Стьюдента. То же в табл. 3.

R. fruticosus (сорт Каракка блэк), что согласовалось с данными работы [17].

Сравнение результатов настоящего исследования по клональному микроразмножению представителей рода *Rubus* L. с литературными данными показало вариативность требований видов к концентрациям регуляторов роста: BA — от 2.0 до 3.0 мг/л у *R. idaeus*, от 0.5 до 2.0 мг/л у *R. chamaemorus*, от 0.5 до 1.5 мг/л у *R. arcticus*, от 0.7 до 2.0 мг/л у *R. fruticosus*; IBA — от 0.1 до 0.5 мг/л у *R. idaeus*, от 0.1 до 0.2 мг/л у *R. chamaemorus*, от 0.05 до 0.25 мг/л у *R. arcticus*, что могло быть обусловлено сортовыми особенностями объектов.

В опыте по влиянию концентрации макроэлементов на рост и развитие растений-регенерантов основными параметрами оценки были количество новых метамеров у *R. arcticus* (Астра) и *R. fruticosus* (Каракка блэк); количество образовавшихся новых розеточных побегов у *R. idaeus* (Амира),

R. chamaemorus (Ньюбу) (рис. 1). Также оценивали время до начала роста после пересадки. Выявлено, что лучшие показатели ростовых характеристик *R. fruticosus* (Каракка блэк) и *R. idaeus* (Амира) были на питательной среде с полным составом макроэлементов, вместе с тем *R. chamaemorus* (сорт Ньюбу) формировала хорошие розеточные побеги и на среде с 50% от полного состава *MS*, а *R. arcticus* (сорт Астра) лучше реагировала на среду с 75% от полного состава *MS* (табл. 3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, установлено, что при клональном микроразмножении *R. idaeus* L. сорта Амира при использовании регуляторов роста BA, IBA, GA₃ в концентрации 2.0, 0.20, 0.1 мг/л соответственно рост почек отмечали на 14-е ± 2 сут, их количество достигало 3.2 ± 0.3 шт./эксплант. При размножении *R. chamaemorus* (сорт Ньюбу)

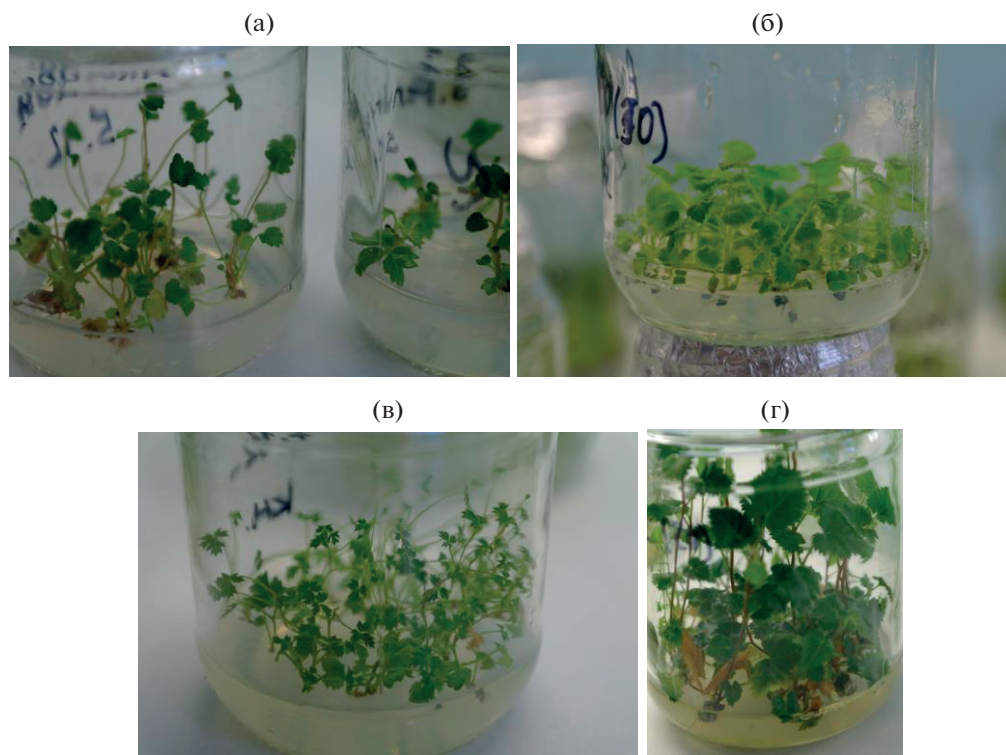


Рис. 1. Клональное микроразмножение в культуре *in vitro*: (а) — *R. chamaemorus* (сорт Ньюбу), (б) — *R. idaeus* (сорт Амира), (в) — *R. arcticus* (сорт Астра), (г) — *R. fruticosus* (сорт Каракка блэк).

при использовании ВА, ИВА, GA_3 в концентрации 2.0, 0.20, 0.1 мг/л соответственно рост почек отмечали на 23-и ± 2 сут, при этом их количество достигало 2.9 ± 0.4 шт./эксплант. При размножении *R. arcticus* (сорт Астра) лучше результаты были в

варианте с регуляторами роста ВА 0.5 мг/л и ИВА 0.05 мг/л, рост почек отмечали на 16-е ± 2 сут, количество новых почек достигало 4.1 ± 0.3 шт./эксплант. При размножении *R. fruticosus* L (сорт Каракка блэк) лучшие результаты были отмечены на

Таблица 3. Влияние концентрации макроэлементов в питательной среде *MS* на морфогенез *R. idaeus* (сорт Амира), *R. chamaemorus* (сорт Ньюбу), *R. arcticus* (сорт Астра), *R. fruticosus* (сорт Каракка блэк)

Концентрация макроэлементов, %	Виды (сорта) растений	Начало роста побегов, сутки, $M \pm SEM$	Количество метамеров/розеток на эксплант, через 30 сут, $M \pm SEM$
100*	<i>R. idaeus</i> (сорт Амира)	20 ± 2	5 ± 1
75		39 ± 2	3 ± 1
50		45 ± 1	1 ± 1
100	<i>R. chamaemorus</i> (сорт Ньюбу)	35 ± 1	3 ± 1
75		30 ± 1	4 ± 1
50*		23 ± 1	4 ± 1
100	<i>R. arcticus</i> (сорт Астра)	22 ± 1	3 ± 1
75*		20 ± 1	5 ± 1
50		24 ± 1	3 ± 1
100*	<i>R. fruticosus</i> (сорт Каракка блэк)	21 ± 1	8 ± 1
75		32 ± 2	2 ± 1
50		40 ± 1	2 ± 1

Примечание. Питательная среда *MS*, сахара 20 г/л, pH 5.6–5.9 — *R. idaeus* (сорт Амира), *R. arcticus* (сорт Астра), *R. fruticosus* (сорт Каракка блэк), pH 3.8 — *R. chamaemorus* (сорт Ньюбу).

питательной среде с концентрацией ВА 1.0 мг/л и ИВА 0.1 мг/л, рост почек начался на $18\text{-е} \pm 2$ сут, количество почек составило 2.5 ± 0.2 шт./эксплант.

Выполненные исследования по клональному микроразмножению этих селекционных образцов рода *Rubus* L. можно использовать для получения высококачественного посадочного материала данных культур при создании ягодных плантаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Strik B., Clark J., Finn C., Banados M. Worldwide blackberry production // Hort. Technol. 2007. V. 17 (2). P. 205–213. DOI 17. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.17.2.205>
2. Karp K., Starast M. The Arctic bramble (*Rubus arcticus* L.) cultivated in Estonia // Problems of rational utilization and reproduction of berry plants in boreal forests on the eve of the XXI century. Proceedings of the International Conference. Belarus, Gomel. 1997. P. 158–160.
3. Molina-Bravo R., Worthington M., Fernandez G. Advances and challenges in raspberry and blackberry breeding // Achieving sustainable cultivation of temperate zone tree fruits and berries. 2019. V. 2. P. 363–396. <https://doi.org/10.19103/AS.2018.0040.27>
4. Wolanin M., Wolanin M., Oklejewicz K. Occurrence of brambles (*Rubus* L.) in young forest plantations on the Kolbuszowa Plateau // Forest Res. Paper. 2017. V. 78 (2). P. 179–186. DOI 78. <https://doi.org/10.1515/frp-2017-0020>
5. Nilsen G. Cloudberries – The Northern gold // Inter. J. Fruit Sci. 2006. V. 5 (2). P. 45–60. https://doi.org/10.1300/J492v05n02_06
6. Clark L.V., Jasieniuk M. Spontaneous hybrids between native and exotic *Rubus* in the Western United States produce offspring both by apomixis and by sexual recombination // Heredity (Edinb). 2012. V. 109 (5). P. 320–328. <https://doi.org/10.1038/hdy.2012.45>
7. Hanping D., Siwen L., Du X. Botanical traits and cold hardiness of interspecific hybrids between European and Chinese raspberries // Acta Horticulturae. 2016. V. 1133. P. 61–66. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1133.10>
8. Lawrence A., Eriksson T., Eriksen B., Campbell Ch. Hybridization and gene flow between distantly related species of *Rubus* (Rosaceae): Evidence from nuclear ribosomal DNA internal transcribed spacer region sequences // Systemat. Bot. 2001. V. 26. № 4. P. 769–778. DOI , www.jstor.org/stable/3093858 <https://doi.org/10.1043/0363-6445-26.4.769>
9. Martinussen I., Nilsen G., Svenson L., Junttila O., Rapp K. In vitro propagation of cloudberry (*Rubus chamaemorus*) // Plant Cell Tissue Organ Cult. 2004. V. 78. P. 43–49. <https://doi.org/10.1023/B:TI-CU.0000020392.85854.28>
10. Zontikov D., Zontikova S., Sergeev R., Shurgin A. In vitro propagation of *Rubus chamaemorus* L. and *Rubus arcticus* L. // Fat Embolism Syndrome. 2014. P. 397–403.
11. Dziedzic E., Jagła J. Micropropagation of *Rubus* and *Ribes* spp. // Methods in molecular biology. N.J.: Clifton, 2013. V. 11013. P. 149–160. https://doi.org/10.1007/978-1-62703-074-8_11
12. Stoevska T., Trifonova A., Karadocheva D. Micropropagation of raspberries (*Rubus idaeus*) // Biotechnol. Biotechnologic. Equip. 1995. V. 9. № 2–3. P. 27–30. <https://doi.org/10.1080/13102818.1995.10818837>
13. Isac V., Aurel P. Chapter I – protocols for in vitro micropropagation of strawberry, raspberry, blackberry, black currant, blueberry and lingonberry // A Guide to some in vitro techniques – small fruit. 2009. P. 1–4-24.
14. Thiem B. Micropropagation of cloudberry (*Rubus chamaemorus* L.) by initiation of axillary shoots // Acta Societat. Bot. Polon. 2001. V. 70. P. 11–16. <https://doi.org/10.5586/asbp.2001.002>
15. Kokko H., Kärenlampi S. Transformation of arctic bramble (*Rubus arcticus* L.) by *Agrobacterium tumefaciens* // Plant Cell Report. 1998. V. 17. P. 822–826. <https://doi.org/10.1007/s002990050491>
16. Azam J., Hamidoghli Y. Micropropagation of thornless trailing blackberry (*Rubus* sp.) by axillary bud explants // Austral. J. Crop Sci. 2009. V. 3. P. 191–194.
17. Fira A., Clapa D., Catita P. Micropropagation of blackberry thornless cultivars // Sci. Paper. R.I.F.G. Pitesti. 2009. V. 25. P. 213–221.
18. Sedlak J., Paprstein F. Micropropagation of blackberry genotypes // Acta Horticulturae. 2016. V. 1133. P. 487–490. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1133.75>
19. Murashige T.A. Revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures // Physiol. Plant. 1962. V. 15. P. 473–497.

Influence of the Composition of Nutrient Media and Growth Regulators during Clonal Micropropagation of Some Economically Valuable Representatives of the Genus *Rubus* L.

D. N. Zontikov^{a, #}, S. A. Zontikova^a, and K. V. Malahova^a

^a Kostroma State University, ul. Dzerzhinskogo 17, Kostroma 156005, Russia

[#]E-mail: zontikovdn@mail.ru

Representatives of the genus *Rubus* L.: common raspberries (*Rubus idaeus* L.), folded blackberries (*Rubus fruticosus* L.), squat cloudberrys (*Rubus chamaemorus* L.) and Arctic knyazhenika (*Rubus arcticus* L.) are valuable berry crops that are actively cultivated on an industrial scale. Despite the existing methods of clonal re-

production for representatives of this genus, due to the influence of genotypic features and changes in the genotype in the selection process, the work on optimizing the breeding method is relevant. The aim of the work was the selection of a nutrient medium and growth regulators for the propagation of various varieties of *R. idaeus*, *R. fruticosus*, *R. arcticus*, *R. chamaemorus* in culture in vitro. At the stage of introduction to the culture in vitro, the type of nutrient medium suitable for the selected varieties and forms was studied, the growth regulators were selected according to the literature sources, preference was given to the most commonly used ones. To study the effect of growth regulators on the activation of axillary meristems at the stage of introduction into culture, the MS culture medium was used with the addition of mesoinositol at a concentration of 100 mg/l, glycine – 2 mg/l, thiamine – 0.5 mg/l, pyridoxine – 0.5 mg/l, sucrose – 20 g/l, agar – 5.0 g/l, growth regulators – 6-benzylaminopurine (BA) 0.50 mg/l and indolylbutyric acid (IBA) 0.05 mg/l together with BA 0.75 mg/l, gibberellic acid (GA₃) 0.1 mg/l at pH 3.8–5.8 was used in all variants, depending on the plant species. The following results were obtained: in the best variant containing BA, IBA, GA₃ at a concentration of 2.0, 0.20, 0.1 mg/l, for *R. idaeus* L. (Amir variety), kidney growth was noted already on the 14th ± 2 days, the number of kidneys reached 3.2 ± 0.3. For *R. chamaemorus* (Nyubu variety), the best variant of the nutrient medium contained BA, IBA, GA₃ at concentrations of 2.0, 0.20, 0.1 mg/l, respectively, kidney growth was noted on the 23rd and ± 2 days, the number of kidneys reached 2.9 ± 0.4; for *R. arcticus* (variety Astra) the best option was a medium with BA 0.5 mg/l + IBA 0.05 mg/l, kidney growth was noted on the 16th ± 2 days, the number of new kidneys reached 4.1 ± 0.3; in *R. fruticosus* L. (variety Karakka black), the best results were noted on a medium with a concentration of BA 1.0 mg/l + IBA 0.1 mg/l, kidney growth began on the 18th ± 2 days, the number of kidneys was 2.5 ± 0.2/explant.

Key words: clonal micropropagation, nutrient media, *Rubus idaeus* L., *Rubus fruticosus* L., *Rubus chamaemorus* L., *Rubus arcticus* L.

УДК 632.727:632.95.025.8:632.951

ВРЕДНОСТЬ САРАНЧОВЫХ СОХРАНЯЕТСЯ БЛАГОДАРЯ СФОРМИРОВАННОЙ РЕЗИСТЕНТНОСТИ В ИХ ПОПУЛЯЦИЯХ К ИНСЕКТИЦИДАМ

© 2021 г. А. Ю. Олейников¹, В. Г. Коваленков¹, О. В. Кузнецова^{1, *}¹ Филиал «Россельхозцентр» по Ставропольскому краю
355042 Ставрополь, 3-й Юго-Западный проезд, 12а, Россия

*E-mail: skstazr@mail.ru

Поступила в редакцию 16.12.2020 г.

После доработки 24.01.2021 г.

Принята к публикации 11.03.2021 г.

Показано, что в посевах каждой из возделываемых сельскохозяйственных культур сформировался комплекс доминантных видов вредителей. Опираясь на исследования ВИЗР и ВНИИБЗР, краевой Россельхозцентр ежегодно выстраивает прогноз возможного их развития и определяет тактику контроля. В качестве эффективной меры с антирезистентной направленностью признана многовариантная интегрированная система, включающая не только химические, но и биологические средства защиты растений. Фактически в крае научно обоснован и практически освоен биоценотический подход в агротехнологиях выращивания урожая возделываемых культур. Массовое, зачастую непредсказуемое расселение саранчовых с охватом не только посевных площадей, но и неосвоенных территорий не укладывается в его содержание и требования, но в то же время обязывает к более углубленному всеохватному мониторингу, который характеризуется повышенной трудоемкостью и оперативной организацией химического контроля. Описаны особенности развития, формирования видовых ареалов и численности стадных саранчовых — итальянского пруса, мароккской и перелетной азиатской саранчи и закономерности формирования резистентности в их популяциях к применяемым инсектицидам.

Ключевые слова: стадные виды саранчовых, развитие и расселение, химический контроль, резистентность, Ставропольский край.

DOI: 10.31857/S0002188121060090

ВВЕДЕНИЕ

Ставропольский край по почвенно-климатическим условиям благоприятен для возделывания более 40 сельскохозяйственных культур. Среди них такие редкие культуры, как лен масличный, горчица, кориандр и даже хлопчатник, но доминируют зерновые колосовые. По данным экспертно-аналитического центра агробизнеса, ежегодные посевы озимой пшеницы достигают 1784.4 тыс. га, что составляет 58.5% от пахотных земель Ставропольского края. Фактически край является одним из основных регионов производства товарного зерна пшеницы в России.

Исследования ВИЗР и ВНИИБЗР показали, что в посевах каждой из культур к началу XXI века сформировался комплекс вредителей, состоящий из нескольких доминантных видов. На озимой пшенице этот комплекс представлен клопом вредной черепашки (*Eurigaster integriceps* Put.), пшеничным трипсом (*Haplothrips tritici* Kurd.), обыкно-

венным и черным хлебными пилильщиками (*Cephus pygmaeus* L., *Trachelus tabidus* F.). На сое, кукурузе, томате, подсолнечнике развивается хлопковая совка (*Helicoverpa armigera* Hbn.), на картофеле — колорадский жук (*Leptinotarsa decemlineata* Sav.), в плодовом саду — яблонная плодожорка (*Cydia pomonella* L.). Многие годы подряд прослеживается увеличение численности, вредности и расширение их видовых ареалов. Главной причиной этого является формирование резистентности в популяциях вредных членистоногих к длительно применяемым химическим средствам борьбы. За период с 2002 по 2012 г. у клопа вредной черепашки резистентность к препаратам на основе дельтаметрина возросла с 78.0–101 до 164–205, лямбда-циперметрина — с 74.0–92.0 до 131–184; у пшеничного трипса — к дельтаметрину — с 52.0–76.2 до 134–166 и зета-циперметрину — с 62.5–124 до 84.2–188. На таком фоне неиз-

бежны снижение их эффективности и потери урожая.

Краевая фитосанитарная служба, исходя из формируемой структуры посевных площадей, ежегодно выстраивает прогноз возможного развития вредителей и обосновывает систему их контроля. Применительно к каждому из вредителей подбирают эффективные препараты, предусматривается система их чередования как мера предупреждения развития резистентности. И что особенно важно — для защиты возделываемых культур в крае не ограничиваются применением одного химического метода, а выстраивают интегрированную многовариантную систему, включающую изученные ресурсы природных энтомофагов и энтопатогенов, обитающих в агроценозах. Она реально осуществляется путем их предварительной наработки в биолaborаториях с последующим расселением на полях или применением биопрепаратов, действующим компонентом которых являются живые микроорганизмы. В этом случае формируется биоценотическое равновесие как основа биологизированной защиты растений, призванной снизить химическую нагрузку на агроэкосистемы. В современном понимании это — система мер, приемов и методов регулирования взаимодействием растений-продуцентов и консументов всех порядков в агробиоценозах. При этом предусматривается не простое истребление отдельных биотрофов, а долговременное сдерживание комплекса вредных организмов на безопасном уровне, т.е. меньше экономического порога вредоносности с конечной целью фитосанитарной оптимизации агроэкосистем [1](4).

Проследившая накопление в зерновых агроценозах наездников из родов *Trissolcus* и *Telenomus* (преобладают *Trissolcus grandis* Thm. и *Telenomus chioropus* Thm.) и оценивая их регулирующую роль (на уровне 76–88%), уже более 20 лет отмечают применение химических обработок против вредной черепашки на площади 32–40 тыс. га в Предгорном р-не Ставрополя. Примечательно, что на этом фоне произошла реверсия показателей резистентности вредителя до уровня природной чувствительности к инсектицидам. Фактически в крае научно обоснован и практически освоен биоценотический подход в агротехнологии выращивания урожая. Но его структура, организационное содержание не охватывают стремительно изменяющиеся очаги развития саранчовых. Для их контроля требуется более углубленный и трудоемкий мониторинг, причем не только в посевах сельхозкультур, но и на подступах к ним, т.е. на неосвоенных землях с дикой растительностью (поля, выведенные из культурообо-

рота, пастбища), где обычно выявляют первичные и вторичные очаги, требующие упреждающего контроля. Это дополнительная нагрузка на краевую фитосанитарную службу.

Ранее были описаны особенности формирования видовых ареалов и повышения численности стадных саранчовых после произошедшей вспышки мароккской саранчи (*Locustana migratoria* Thmb.) на Ставрополье в 2012 г. [2] (5). В настоящей работе представлены выявленные новые закономерности в развитии этих вредоносных видов.

ТЕРРИТОРИАЛЬНОЕ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ СТАДНЫХ ВИДОВ САРАНЧОВЫХ

Открытие Б.П. Уваровым [3](6) фазовой изменчивости у саранчовых позволило решить не только таксономические задачи, но и понять приспособительную природу одиночного и стадного состояния особи и популяции в целом у саранчовых. Г.Я. Бей-Биенко [4] (1), отмечая известное сходство сезонного полиморфизма у тлей с фазовой изменчивостью у саранчовых, подчеркивал, что последнее является результатом группового эффекта, возникающего вследствие роста плотности популяции. Следовательно, в основе возникновения фаз у вида лежит биотический фактор — взаимоотношение особей в популяции. У стадных видов наблюдают так называемую фазовую изменчивость, которая приводит к изменению внешнего облика и физиологических функций насекомого в зависимости от степени скученности. Эти особенности учитывали при проведении обследований, изучении возникающего биоразнообразия на полях и принятии решений о подборе средств борьбы и сроках проведения обработок [5] (3).

В 2020 г. при весенне-летних обследованиях на площади 959.57 тыс. га зарегистрировано отрождение личинок мароккской саранчи (*Locustana migratoria* Thmb.) 27 апреля, итальянского пруса (*Calliptanus italicus* L.) — 30 апреля и азиатской перелетной саранчи (*Locusta migratoria* L.) — 8 июня. Преобладание первого из стадных видов обнаружено в 16-ти районах края на площади 141 тыс. га со средней численностью 15.7 экз./м² и максимальной — 200 экз./м². Прус был выявлен в 9-ти районах на площади 14.638 тыс. га со средней численностью 22.3 экз./м² и максимальной — 130 экз./м². Азиатская перелетная саранча была отмечена лишь на 30 га в Изобильненском р-не с численностью 43 экз./м².

Чтобы получить достоверную информацию о происходящих более масштабных изменениях

Таблица 1. Распространение саранчовых в Южном федеральном и Северо-Кавказском федеральном округах в 2020 г.

Регион	Обследовано	Заселено	Средняя численность	Максимальная численность	Обработано, тыс. га
	тыс. га		экз./м ²		
ЮФО	2821.54	193.464		3000.0	149.0
Республика Адыгея	1.03	0.12	0.3	0.5	
Республика Калмыкия	912.94	80.29	86.0	420	80.09
Краснодарский край	948.78	34.81	13.3	3000	2.27
Республика Крым	31.52	0.657	5.8	200	0.635
Астраханская область	469.38	18.57	2.14	100	10.08
Волгоградская область	356.67	45.778	66.4	300	45.05
Ростовская область	101.21	13.24	12.67	42	10.88
СКФО	1549.4	295.06	87.34		284.54
Ставропольский край	959.57	155.6	15.7	200	143.29
Республика Дагестан	357.32	103.08	25.0	350	106.62
Республика Ингушетия	13.05	4.5	17.0	25.0	3.3
Карачаево-Черкесская республика	8.8				
Кабардино-Балкарская республика	61.02	8.02	2.9	10.0	0.376
Чеченская республика	89.44	20.66	19.74	300.0	30.83
Республика Северная Осетия-Алания	60.2	3.2	7.0	12	0.12

территориального распределения саранчовых, обосновать прогноз их возможной опасности для сельскохозяйственных культур, впервые прослежено формирование ареалов и их численности на площади 2821.54 тыс. га во всех регионах Южного федерального округа и на 1549.4 тыс. га — Северо-Кавказского (табл. 1). Из приведенных данных следует, что наибольший объем обработок против саранчовых проведен в Ставропольском крае. Из обследованных 959.57 тыс. га заселенными оказались 155.6 тыс. га. Как и в предыдущие годы, за ним следуют примыкающие к границе края площади Калмыкии и Дагестана, где саранчовые охватили соответственно 80.29 и 103.08 тыс. га с максимальной численностью 420 и 350 экз./м². За ними следуют Волгоградская обл. (45.8), Краснодарский край (34.81), Чеченская республика (20.66) и Астраханская обл. (18.57 экз./м²).

В Ставропольском крае обработки против мароккской саранчи проведены на 129.63 тыс. га, из которых на 10.98 тыс. га инсектициды были применены против имаго в наиболее заселенных районах — Левокумском и Нефтекумском. На этом фоне подтвердились ранее установленные причины возникновения чрезвычайных ситуаций.

Первая — сохранение и накопление саранчи в стадии имаго из-за невысокой смертности в результате сформировавшейся резистентности к длительно применяемым инсектицидам, вторая — пополнение местных популяций за счет миграции стай саранчи из соседних регионов. Об этом свидетельствовали площади возрастающего расселения саранчи в 2019 г. в Калмыкии на 48.4, в 2020 г. — на 80.29 тыс. га, в Дагестане соответственно — на 100.1 и на 103.08 тыс. га.

Всего защитные мероприятия против комплекса стадных саранчовых в Ставропольском крае проведены в 20-ти районах на площади 143.89 тыс. га. Из них против личинок обработано 131.21, имаго — 12.68 тыс. га. Оперативные данные филиала «Россельхозцентр» по Ставропольскому краю, полученные в 2020 г., выявили те же закономерности, что и в предыдущие 8 лет, т.е. начиная с 2012 г., обработки против имаго проводили регулярно на площади от 11.6 до 101.9 тыс. га (табл. 2). Соответственно различались показатели эффективности: 78–92 и 42–58%, что оставляло значительную часть популяций вполне жизнеспособными, формирующими опасность в последующие годы.

Таблица 2. Объемы выполненных мониторинга и противосаранчовых мероприятий в Ставропольском крае в 2012–2020 гг.

Год	Всего заселено	Всего обработано	
		против личинок	против имаго
	тыс. га		
2012	398.5	386.9	11.6
2013	139.53	125.65	1388
2014	162.59	110.51	52.08
2015	153.72	89.61	64.11
2016	268.81	115.9	152.91
2017	369.56	284.34	85.22
2018	323.49	220.52	101.9
2019	86.74	57.28	8.87
2020	143.89	131.21	12.68

Как указывали выше, в Левокумском и Нефтекумском р-нах выполнены наибольшие объемы обработок – соответственно 29.9 и 58.9 тыс. га. В остальных районах присутствие саранчовых характеризовалось рассеянным формированием отдельных очагов, которые были взяты под контроль. Например, в Георгиевском, Грачевском, Изобильненском, Ипатовском, Курском, Новоселицком, Петровском, Советском, Степновском, Труновском, Туркменском, Шпаковском р-нах заселенными оказались 0.01–2.83 тыс. га. Прослежено расселение саранчовых как в диких растительных формациях, так и в посевах сельскохозяйственных культур. При этом их численность быстро изменялась, охватывая новые площади. При мониторинге отметили стремительное увеличение заселения в Арзгирском р-не до 8.61, Благодарненском – 7.73 и Буденновском – 10.5 тыс. га.

Фактически повсеместно происходило территориальное перераспределение саранчовых, формирование стай, в которых смешаны не только стадные, но и нестадные виды. Например, с повышенной численностью (26 экз./м²) и расширенным ареалом проявилась кобылка крестовая (*Paracrypha microptera* F.-W.). Впервые за много лет потребовалось оперативно организовывать целевые обработки. При этом повышенное внимание уделили подбору препаратов и полевой оценке их эффективности, т.к. проблема резистентности продолжает оставаться актуальной. Об этом достаточно полно было сказано на состоявшемся IV съезде по защите растений в С.-Петербурге, 9–11 сентября 2020 г. Был представлен доклад о резистентности саранчовых к применяе-

мым инсектицидам [6]. Выявлено активное развитие множественной резистентности в популяциях азиатской перелетной саранчи. Впервые этот вид саранчовых был обнаружен в Буденновском р-не в 1999 г. Несмотря на интенсивные обработки, их эффективность была неудовлетворительной (до 31%), в связи с чем в 2015 г. вредитель заселял посевы уже в 25-ти районах. Результаты мониторинга, проведенного в 2013–2015 гг., выявили 61–141.2 × ПР (показатель резистентности) ко всем применяемым в крае пиретроидам, 120–123× – к органофосфатам сумитиону и дурсбану, 34× – представителю класса фенилпиразолов адонису. Помимо азиатской саранчи в 2018 г. было также выявлено развитие групповой резистентности к пиретроидам (134–210 × ПР) в популяциях другого вида – итальянского пруса. В этой связи антирезистентная направленность технологии борьбы с саранчовыми оставалась приоритетной. Химический метод – единственный в защите возделываемых культур от саранчовых. Поэтому и в 2020 г. продолжали испытание и подбор наиболее эффективных инсектицидов. Предпочтение отдали препарату на основе имидаклоприда – имидору, ВРК в норме расхода 0.075 л/га. Для повышения эффективности обработок не исключали применение смесевых комбинаций пиретроидных и фосфорорганических препаратов и выстраивание системы их чередования. Временной разрыв в контактах популяций вредителя с одним и тем же токсикантом в течение сезона способствовал торможению формирования резистентности к нему, а следовательно – повышению эффективности примененных средств защиты. Поэтому обработки регулярно сопровождали оценкой гибели объекта. При учетах количества личинок неизменно получали показатели эффективности, близкие к 92%.

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ЭНТОМОФАГА САРАНЧОВЫХ ШПАНКИ КРАСНОГОЛОВЫЙ

Проследивая динамику развития и распространения стадных саранчовых, обратили внимание на периодическое формирование массовых скоплений шпанки красноголовой (*Epicauta erythrocephala* Pall.). Ареал и численность ее увеличивались синхронно с возрастанием по годам количества саранчовых. Например, в 2010 и 2011 гг. увеличение площадей заселения итальянским прусом сопровождалось формированием многочисленных стай шпанки на сорной растительности с численностью 57–380 экз./м². Они стремительно перемещались, заселяя и поедая не только дикорастущие

растения, но и посевы возделываемых культур. Наши наблюдения показали, что вышедшие из куколок жуки в мае собирались в стаи на сорняках, предпочитая бобовые и маревые, а затем заселяли люцерну и другие посевы. После спаривания самки откладывали яйца в почву залежных участков, где, как правило, обитают и саранчовые. Отродившиеся личинки, так называемые триангулины, проникали в кубышки итальянского пруса и съедали его яйца. В процессе своего развития они несколько раз меняли стадии и здесь же в кубышках окукливались. Весной отрождались жуки, повторяющие весь цикл своего развития. В 2011 г. при обследовании зарегистрировали локально паразитирование в 132-х очагах пруса в 14-ти р-нах края со степенью поражения его яиц от 27 до 100%. Еще ранее, в 2005 г. на 100 га посева люцерны, заселенных итальянским прусом в ООО «Агро Смета» Георгиевского р-на, химическая обработка была отменена, т.к. шпанка уничтожила весь запас вредителя. В 2019 г. на фоне рассеянного заселения пастбищ прусом избирательно в районах на площади 0.6–1.12 тыс. га происходило скопление шпанки с численностью 88–417 экз./м² и последующее поражение 36–94% кубышек пруса. В результате из 18.34 тыс. га заселенной площади в крае обработки потребовались лишь на 4.9 тыс. га. 2020 г. не стал исключением. В 9-ти районах края, где было отмечено заселение прусом 14638 тыс. га, проявилось активное формирование многочисленных стай шпанки с численностью от 134 до 434 экз./м². На этом фоне отметили снижение плотности вредителя на 46–78%, но в то же время – способность шпанки наносить повреждения посевам сельскохозяйственных культур (свеклы, подсолнечника, сои, бахчевым, овощным). Жуки поедали листья, молодые стебли, бутоны, цветы. При обследованиях регистрировали повреждения от 12 до 73% посевов, что неизменно приводило к применению инсектицидов. За этим последовали снижение чувствительности к ним не только у пруса, но и шпанки. Выполненные лабораторные анализы собранных насекомых показали, что после применения препаратов на основе дельтаметрина выживало 89% шпанки, альфа-циперметрина – 42, зета-циперметрина – 79, фипронила – 70%. Таким образом, выявлена та же закономерность, что и у вредителей: интенсивное применение химических средств приводило к формированию резистентности в популяциях шпанки и уменьшению разрешающих возможностей инсектицидов.

Согласно обзору, выполненному «Россельхозцентром», нарастание численности шпанки по всей России увязывается с повышением численности саранчовых.

Шпанка стала проявляться повсеместно, включая Сибирский, Дальневосточный округа, Тыву и Бурятию. Полученные новые данные позволили сделать вывод о повсеместном формировании стойких популяций шпанки, вошедших в местные агроэкосистемы в качестве постоянного компонента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 2020 г. были продолжены масштабный мониторинг для выявления особенностей развития, расселения стадных видов саранчовых и участие в организации их химического контроля совместно со специалистами филиала «Россельхозцентр» по Ставропольскому краю и граничащих с ним республик Калмыкии и Дагестана.

Чтобы получить достоверную информацию о происходящих масштабных изменениях территориального распределения саранчовых, обосновать прогноз возможной опасности, впервые прослежено формирование ареалов и численности в 7-ми регионах Южного Федерального округа на 2821.54 тыс. га и в 7-ми регионах Северо-Кавказского округа – на 1549.4 тыс. га. Показано, что наиболее напряженная ситуация с саранчовыми сложилась в Ставропольском крае. Из обследованных 959.57 тыс. га саранчовыми охвачено 155.6 тыс. га. Как и в предыдущие годы за ним следуют примыкающие к границе края площади Калмыкии и Дагестана, где саранчовые охватили соответственно 80.29 и 103.08 тыс. га.

Подсчет сформированных в почве кубышек при осенних обследованиях позволил спрогнозировать возможный ареал саранчовых в 2021 г. на уровне 150 тыс. га. В новых фитосанитарных условиях рекомендовано проводить более углубленный мониторинг распространения саранчовых и их энтомофага шпанки красноглазой, выстраивать избирательную тактику как по срокам, подбору препаратов, так и масштабу их применения. Разработанная система контроля позволит уйти от шаблона тотальных обработок, а нарастающее распространение шпанки красноглазой открывает возможность снижения токсической нагрузки на агроэкосистемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлюшин В.А., Вилкова Н.А., Сухорученко Г.И., Нефедова Л.И., Фасулати С.Р. Фитосанитарная де-стабилизация агроэкосистем. СПб., 2013. 183 с.
2. Стамо П.Д., Коваленков В.Г., Кузнецова О.В., Никитенко Ю.В. Мароккская саранча снова на Ставрополье // Защита и карантин раст. 2013. № 2. С. 14–20.

3. Уваров Б.П. Об изучении саранчовых России // Изв. отдела прикл. энтомол. 1922. № 2. С. 19–86.
4. Бей-Биенко Г.Я. Общая энтомология. М., 1971. 479 с.
5. Коваленков В.Г., Кузнецова О.В., Тюрина Н.М. Особенности развития, расселения и химического контроля стадных видов саранчовых в Ставропольском крае // Агрохимия. 2016. № 8. С. 38–45.
6. Дридигер В.В., Кузнецова О.В., Коваленков В.Г. Территориальное перераспределение стадных видов саранчовых на Ставрополье // Защита и карантин раст. 2020. № 3. С. 7–9.

Harmfulness of Locusts Is Preserved Due to the Formed Resistance in Their Populations to Insecticides

A. Yu. Oleynikov^a, V. G. Kovalenkov^a, and O. V. Kuznetsova^{a, #}

^a Filial "Rosselkhoztsentr" in the Stavropol territory,
3rd South-West passage 12A, Stavropol 355042, Russia

[#] E-mail: skstazr@mail.ru

It is shown that a complex of dominant pest species has formed in the crops of each of the cultivated crops. Based on the research of the VIZR and VNIIBZR, the regional Rosselkhoznadzor annually builds a forecast of their possible development and determines the tactics of control. As an effective measure with an anti-resistance orientation, a multi-variant integrated system is recognized, including not only chemical, but also biological plant protection products. In fact, the region has scientifically justified and practically mastered the biocenotic approach in agricultural technologies for growing the crop of cultivated crops. The mass, often unpredictable settlement of locusts, covering not only cultivated areas, but also undeveloped territories, does not fit into its content and requirements, but at the same time requires more in-depth, all-encompassing monitoring, which is characterized by increased labor intensity and operational organization of chemical control. The features of the development, formation of species ranges and the number of herd locusts – Italian prus, Moroccan and migratory Asian locusts and the patterns of resistance formation in their populations to the insecticides used are described.

Key words: herd locust species, development and settlement, chemical control, resistance, Stavropol Territory.

УДК 632.122.2:631.95

КОНТРОЛЬ ОСТАТОЧНЫХ КОЛИЧЕСТВ ПЕСТИЦИДОВ В ОБЪЕКТАХ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

© 2021 г. А. А. Данилова

*Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН (СФНЦА РАН)
630501 Новосибирская обл., Новосибирский р-н, р.п. Краснообск, а/я 356, Россия*

E-mail: Danilova7alb@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.06.2020 г.

После доработки 17.07.2020 г.

Принята к публикации 10.12.2020 г.

Представлен обзор литературы по контролю за остаточными количествами пестицидов в объектах окружающей среды в мире и РФ. Показано, что мировое сообщество к решению проблемы в организационно-правовой сфере подходит с 3-х основных позиций: ограничение доступа к химическим средствам защиты растений (ХСЗР) непрофессиональных пользователей пестицидов, постоянное обучение профессиональных пользователей агрохимикатов, совершенствование законодательства по обороту пестицидов. В научной сфере идет разработка новых формул пестицидов с пониженной дозой применения и относительно коротким периодом жизни в среде, совершенствуются методы определения остаточных количеств (ОК) пестицидов. В обзоре дана информация о положении дел в РФ. Сделан вывод, что официальный контроль за оборотом пестицидов и их ОК в нашей стране крайне ограничен.

Ключевые слова: пестициды, химические средства защиты растений, остаточные количества в среде, контроль за оборотом пестицидов.

DOI: 10.31857/S0002188121030042

ВВЕДЕНИЕ

Общественный и научный резонанс, вызванный отнесением в 2015 г. “гербицида века” глифосата к категории “возможно канцерогенных” [1], еще раз подтвердил актуальность проблемы, связанной с безопасностью применения пестицидов. Осознавая вредность химических средств защиты растений (ХСЗР) для здоровья, мы не можем перестать их применять, поскольку они обеспечивают около половины урожая сельскохозяйственных культур в мире, поскольку обеспечить возрастающее население планеты продуктами питания и сырьем без применения пестицидов практически невозможно [2–4]. Решение проблемы заключается в поиске пестицидов, сочетающих эффективность против вредных организмов с относительно коротким периодом жизни в среде. Установлено, что даже при самой тщательной процедуре применения ХСЗР целевого организма достигает не более 1% препарата [2]. Остальная часть пестицида распределяется в объектах окружающей среды. Отсюда понятно, что контроль за загрязнением среды остаточными количествами (ОК) пестицидов становится одной из актуальных проблем современности.

Цель обзора — на основе анализа имеющейся в открытом доступе официальной информации по применению и остаточным количествам пестицидов в объектах окружающей среды сравнить состояние проблемы в Российской Федерации (РФ) и зарубежных странах.

РЕГУЛИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ КОЛИЧЕСТВ ПЕСТИЦИДОВ В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

По данным на 2017 г., в мире юридически регулируются ОК примерно 19400 пестицидов в почве, 5400 — в воде. ОК пестицидов регламентируются в 12 видах сельскохозяйственной продукции [5]. В обзоре [5] представлен анализ регламентов 102 стран мира, регулирующих ПДК (MRL) 2-х наиболее широко применяемых в мире гербицидов — глифосата и 2.4Д в воде и почве (табл. 1), размах колебания этих величин очень широк. Вероятно, это обстоятельство в какой-то мере отражает различный уровень загрязненности объектов среды в странах мира. Анализ частоты встречаемости различных уровней ПДК показал, что в 70% регламентов по 2.4Д превышает доказанный уровень безопасности препарата для здоровья

Таблица 1. Пределы ПДК (MRL) в почве и питьевой воде для 2.4Д и глифосата по результатам обзора регламентов в 102 странах мира [5]

Пестицид	А*	ПДК в почве, мг/кг		А*	ПДК в питьевой воде, мг/л	
		min	max		min	max
2.4Д	147	0.04 Молдова	12000 США шт. Орегон	180	0.0001 ЕС	30 Мексика
Глифосат	93	0.011 Молдова	36000 США шт. Техас	122	0.0001 ЕС	28 ВС США

*А — количество регламентов, принятых в мире.

людей. Для глифосата эта величина составляет $\approx 30\%$. Далее авторы рассчитали соответствие регламентированных доз гигиеническим нормам потребления этих пестицидов людьми за 1 сут. Оказалось, что от 50 (2.4Д) до 70% (глифосат) регламентов превышают гигиенически безопасные нормативы. Отсюда авторы сделали вывод, что законодательные нормативы многих стран не обеспечивают защиту здоровья своих граждан от воздействия этих веществ. Вероятно, высокий фоновый уровень загрязненности среды вынуждает законодателей поднимать уровень ПДК. При этом величина минимальных и максимальных ПДК отдельных пестицидов существенно различаются в разных странах, что еще раз свидетельствует о разном уровне загрязненности среды ОК пестицидов в регионах мира [5].

В этих условиях мировое сообщество предпринимает разносторонние меры для снижения уровня пестицидной нагрузки на объекты окружающей среды. Как показывает анализ литературы, комплекс этих мер можно условно подразделить на 3 группы: 1 — ограничение доступа к пестицидам непрофессиональных пользователей (НПП) — садоводов, домовладельцев, 2 — постоянные тренинги, обучающие профессиональных пользователей (фермеров) соблюдать регламенты применения ХСЗР, 3 — совершенствование законодательства по обороту пестицидов [6].

Подразделение пользователей пестицидов на профессиональных и непрофессиональных юридически закреплено в известной директиве Европарламента по безопасному применению пестицидов на территории ЕС от 21 октября 2009 г. [7]. Значимость НПП как фактора загрязнения среды связана с тем, что из-за большого их числа доля продаж пестицидов, приходящаяся на этот сегмент, может достигать 25%. По данным [6], например, в Бельгии за счет регулирования ассортимента и форм пестицидов, доступных для НПП, за 2005–2012 гг. удалось снизить пестицидную нагрузку на пользователей на 50, на водные организмы — на 20, на пчел — на 60%. Поэтому благодаря совместным усилиям правительства и

промышленности удастся решать важные экологические проблемы.

Как было отмечено в директиве ЕС [7], грамотное использование в профессиональной сфере является важнейшим пунктом безопасного применения пестицидов. Как показали опросы, в 2010 г. 71% европейских фермеров работали с пестицидами только на основе собственного опыта и не имели привычки читать сопроводительные рекомендации по применению препаратов [8]. Осознавая опасность такой тенденции, в ЕС на государственном уровне организуют постоянные тренинги профессиональных пользователей пестицидов с целью строгого соблюдения регламентов применения ХСЗР на основе обучающих программ, разрабатываемых совместно производителями, научными работниками с учетом поведенческих стереотипов практических пользователей.

На основе директивы 1107/2009 [7], Комиссия Европейского парламента по сельскому хозяйству и развитию сельских территорий (AGRI) совместно с комиссией по окружающей среде, общественному здравоохранению и безопасности пищевых продуктов (ENVI) осуществляют контроль за оборотом пестицидов в ЕС. Важной частью этой работы являются регуляция списка применяемых д.в. и устойчивая тенденция сокращения числа последних. Например, с мая 1993 по июнь 2019 г. AGRI отозвала 509 наименований д.в. [9]. Проводится работа по совершенствованию законодательства по обороту пестицидов. В частности, эксперты ЕС предлагают ограничить права разработчиков новых пестицидов в сертификации собственной продукции, передав эти полномочия независимым лабораториям [10]. Проблема эта чрезвычайно сложна из-за пересечения интересов производителей, продавцов и пользователей [11].

Одновременно с этими мероприятиями продолжают научные исследования по совершенствованию методов тестирования ОК пестицидов в объектах окружающей среды (рис. 1). В настоящее время можно выделить основные группы ме-

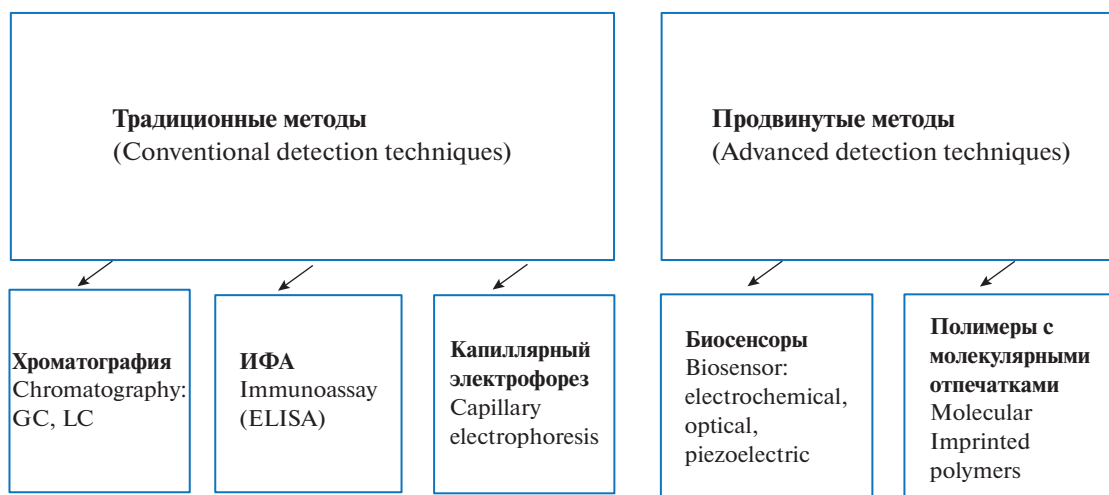


Рис. 1. Основные группы методов для определения остаточных количеств пестицидов в среде и продукции [12].

тодов определения: традиционные (различные виды хроматографии, иммуноферментный анализ (ИФА), капильный электрофорез); продвинутые (применение биосенсоров и полимеров с молекулярными отпечатками). Разработка и применение последних тесным образом связана с развитием наноматериалов [12].

Проводятся исследования по усовершенствованию технологий очистки объектов окружающей среды, загрязненных пестицидами (рис. 2). Представлена общая схема существующих в настоящее время способов решения этой проблемы в почве. Всю совокупность этих методов подразделяют на 3 группы: удаление соединения из почвы путем промывки различными реагентами, иммобилизация его при помощи внесения различных сорбентов и разложение пестицида в почве. Два первых подхода обычно используют только в условиях аварийных загрязнений, т.к. при их применении возникают дополнительные проблемы. Например, утилизация промывных жидкостей, или при последующем разложении сорбента в почве пестицид снова становится подвижным. При относительно низких дозах загрязнения, характерных для почв сельскохозяйственного назначения, применяют различные способы разложения загрязнителя на месте. Эти способы в свою очередь подразделяют на химические и биологические [13–15]. Среди химических способов в последние годы интенсивно изучают возможность использования наногранул, нанотрубок, нанокомпозитов. Пока основная проблема, возникающая на пути внедрения этих технологий, заключается в токсичности самих наноматериалов. Однако прогноз остается чрезвычайно оптимистичным [15].

Среди биологических способов детоксикации пестицидов в почве интенсивно развивается третье направление с использованием специализированных микроорганизмов (bioaugmentation). Отобраны из природной среды или выведены генно-инженерными способами микроорганизмы, достаточно эффективно разлагающие определенные группы пестицидов. Однако, согласно обзорной информации по данной теме [14], в настоящее время эти исследования все еще находятся на стадии лабораторных. Дело в том, что микроорганизмы, разлагающие пестицид в чистой культуре, в естественной почвенной среде во многих случаях не могут реализовать свой потенциал. Необходимо также отметить, что применение данного подхода чревато трудно предсказуемыми экологическими последствиями. А именно, остается проблемой прогноз поведения внесенного микроорганизма в объектах окружающей среды [16].

Из всего изложенного следует, пока наиболее доступным для условий реальных агротехнологий остается стимуляция собственной микробиоты почвы. Для этих целей применяют различные источники органического вещества. Понятно, что эти специальные меры не всегда экономически доступны для обычных хозяйств. В этом плане особый интерес представляет возможность использования собственных ресурсов агроценозов (поживных остатков) в повышении самоочищающей способности почвы. В частности, установлено, что для условий лесостепи Западной Сибири в зернопаровых севооборотах ежегодное оставление поживных остатков в количестве 5–6 т/га, что соответствует урожаю зерна 2.5–3.0 т/га, может повысить самоочищающую способность

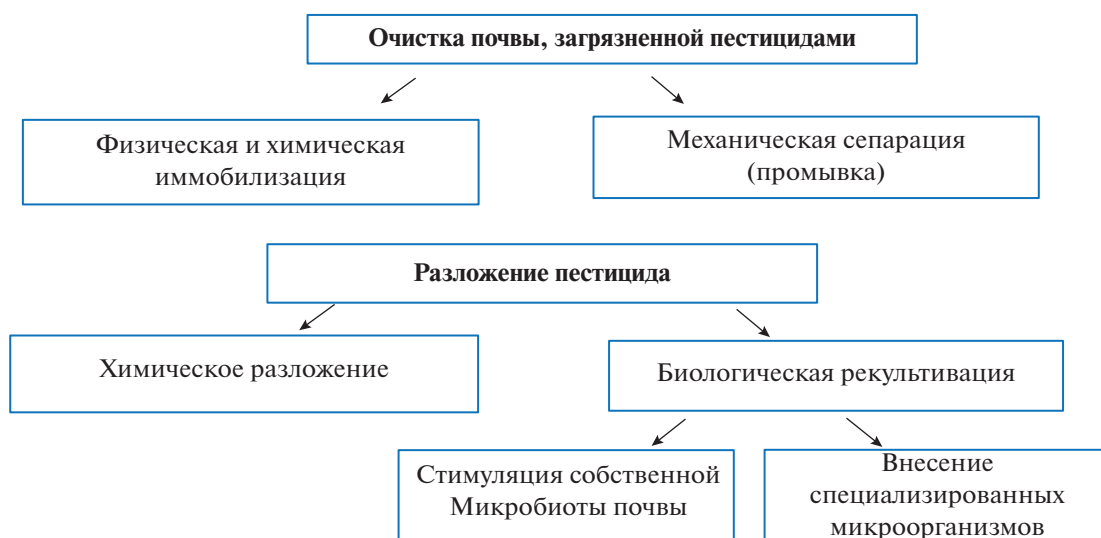


Рис. 2. Основные пути очищения почв, загрязненных остаточными количествами пестицидов по [13].

почвы до 2 раз в сравнении с вариантом, где растительные остатки удаляли с поля. Это мероприятие в условиях выщелоченного чернозема гарантировало полную детоксикацию метсульфурон метила за текущий вегетационный период, что обеспечивало безопасность следующих культур севооборота [17].

Таким образом, мировое сообщество, осознавая необходимость контроля за ОК пестицидов в окружающей среде, предпринимает комплексные меры для решения проблемы. Некоторый оптимизм вселяет опыт ЕС, который, как известно, является одним из крупнейших потребителей пестицидов в мире. При этом уровни регламентированных доз пестицидов в окружающей среде в странах ЕС остаются самыми низкими: т.е. эффективный контроль за ОК пестицидов в среде возможен.

СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ КОЛИЧЕСТВ ПЕСТИЦИДОВ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Применение пестицидов в РФ регламентируется 2-мя основными документами: федеральным законом от 19 июля 1997 г. № 109-ФЗ “О безопасном обращении с пестицидами и агрохимикатами” [18] и “Государственным каталогом пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации” [19]. Официальные сведения о состоянии загрязнения пестицидами среды в РФ опубликованы в ежегодных официальных изданиях [20–25].

По состоянию на 2016 г. в РФ используют ≈1200–1500 наименований пестицидов, полученных на основе 200 д.в. [20, 21]. В 2019 г. Россанэпиднадзор опубликовал официальный список ПДК пестицидов, разрешенных в РФ [26]. В регламент включили 603 наименования из всех групп ХСЗР. Величины ПДК, представленные в этом списке, видимо, основаны на величинах, изложенных в международной базе MRL [27], а не на фактических данных, полученных в РФ. В частности, ПДК глифосата в зерне в США составляет 30, в ЕС – 10 мг/кг, в РФ приняли уровень 20 мг/кг. В доступной литературе сведений об ОК глифосата в объектах окружающей среды в РФ не обнаружили.

ДИНАМИКА ПРИМЕНЕНИЯ ПЕСТИЦИДОВ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ РФ

Согласно данным (табл. 2), закупка и применение пестицидов к 2015 г. по сравнению с дореформенным периодом снизились примерно в 2.6 раза [28]. При этом стабильность тенденции к повышению пестицидной нагрузки на агроценоз в послереформенные годы очевидна. За период 2008–2018 гг. РФ по приросту объема продаж пестицидов занимает первое место в мире [9].

По усредненным показателям, уровень применения ХСЗР в РФ значительно уступает соответствующим показателям развитых стран мира (рис. 3) [29]. Отметим, что эта величина в последние годы практически не изменилась и по итогам 2018 г. составляет для препарата 0.557 кг/га пашни, для д.в – 0.166 кг/га [30], но соответствующие сведения из разных источников несколько разли-

Таблица 2. Динамика поставок и применения пестицидов в России, средние за год для препарата [28]

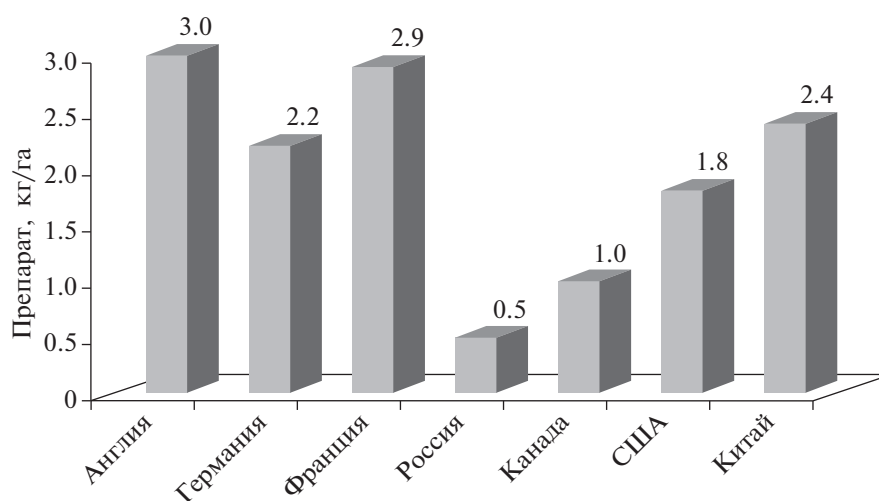
Показатель	1986–1990	1991–1995	1996–2000	2001–2005	2006–2010	2011–2015
Поставлено пестицидов, т	215566	51710	29625	34420	36260	84100
Внесено пестицидов, кг						
на 1 га пашни	1.62	0.40	0.24	0.29	0.31	0.72
на 1 га посевов	1.82	0.47	0.33	0.42	0.47	1.08

чаются. Например, по официальным данным, опубликованным в 2017 г. [20], средний уровень пестицидной нагрузки в агроценозах РФ существенно больше, чем указано в [29] (рис. 4). Вероятно, это связано со спецификой расчетов и полнотой информации, которыми владеют разные авторы. При этом уровень применения пестицидов сильно различается в зависимости от регионов РФ. Он, естественно, больше, где ведется интенсивное сельскохозяйственное производство (табл. 3): средняя пестицидная нагрузка в некоторых регионах РФ достаточно высока и не уступает мировым показателям. В зависимости от типа культуры пестицидная нагрузка на агроценоз может быть даже существенно больше. Например, в виноградниках Тамани средняя пестицидная нагрузка за 2010–2014 гг. составила 26 кг д.в./га/год. При этом в почве были обнаружены остатки 24 пестицидов в количествах, превышающих ПДК в 10 раз [31]. Кроме того, изменение ассортимента выращиваемых культур также может способствовать повышению уровня пестицидной нагрузки на агроценоз. Например, по официальным данным [20], отмечено резкое увеличение применения гербицидов в Республике Алтай: с 0.9 кг/га в 2015 г. до 3.0 кг/га в 2016 г. (по препарату), что бы-

ло связано с увеличением площади посевов рапса. Таким образом, несмотря на низкие показатели средних величин пестицидной нагрузки на почвы РФ, локальная нагрузка может быть достаточно высокой.

Уровень ПДК соответствующих пестицидов в объектах окружающей среды в РФ близок к минимальным показателям в мире. Однако это обстоятельство мало о чем говорит, т.к. систематического контроля ситуации в РФ практически не существует [20–25]. Из 200 наименований д.в., применяемых в РФ, официально контролируется 20 (табл. 4). Причина этого факта ясна: устаревшее оборудование не позволяет отслеживать ОК современных пестицидов. При этом риски загрязнения объектов окружающей среды РФ остаточными количествами пестицидов достаточно высоки и связаны со следующими моментами: с сохранением большой массы пестицидов, вышедших из употребления, интенсификацией производства в крупных агрохолдингах, сопровождающейся избыточным применением агрохимикатов, активный импорт препаратов [28].

Таким образом, судя по официальным документам, систематический официальный контроль за ОК пестицидов в настоящее время в РФ

**Рис. 3.** Средняя пестицидная нагрузка на почвы в странах мира [29].

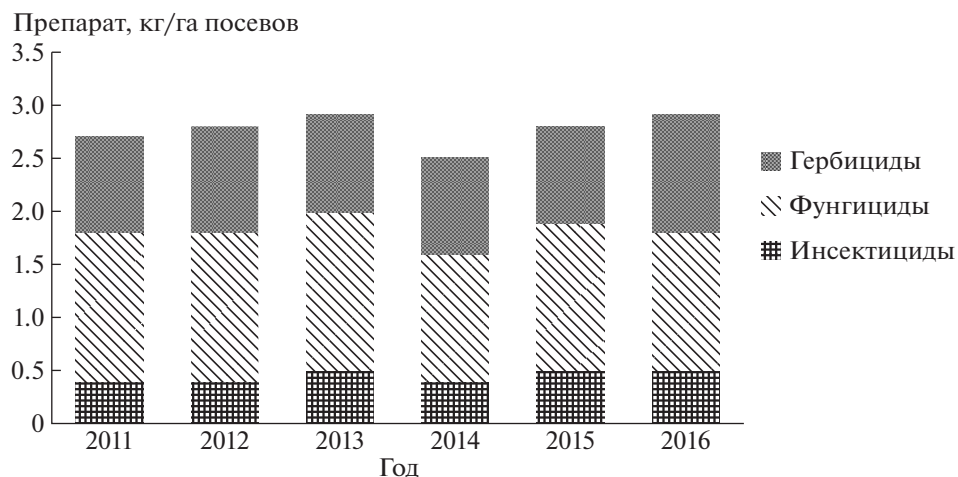


Рис. 4. Доза внесения пестицидов в открытом грунте в 2016 г. [20].

практически не существует. Известно, что Россельхознадзор в 2011 г. был лишен полномочий по контролю за оборотом пестицидов. При этом эта обязанность не была никому передана. В 2019 г. Минсельхоз подготовил документ, на основании которого эти полномочия снова возвращаются в Россельхознадзор [32].

В заключение, при первом приближении можно сравнить ситуацию в РФ с мерами по защите среды от загрязнения пестицидами, предпринимаемыми в мире. Во-первых, в РФ любой непрофессиональный пользователь может купить в свободной продаже широкий спектр ХСЗР и использовать его по собственному усмотрению. При этом ясно, что в этих условиях сложно обеспечить соблюдение регламентов применения препарата. Во-вторых, с обучением профессиональных пользователей сложилась весьма сложная ситуация. Если учесть, что в последние годы в сельскохозяйственных вузах сокращен выпуск специалистов по защите растений, то тех, кто может профессионально обучать сельскохозяйственных производителей, немного. В этом случае не берем в расчет многочисленных менедже-

ров по продаже ХСЗР, цели которых весьма далеки от соблюдения экологических норм. В третьих, как отмечено выше, анализ остаточных количеств пестицидов в объектах окружающей среды — процедура достаточно дорогостоящая и наукоемкая. Из-за недостатка финансовых средств аналитическое оборудование и материалы не обновляются, соответственно, невозможно контролировать ОК современных пестицидов.

Таким образом, создается впечатление, что в РФ проблемы накопления ОК пестицидов в объектах окружающей среды не существует (или пока не существует). Между тем известная проблема снижения урожайности культур севооборота после применения гербицидов группы сульфонилмочевин [33] позволяет предположить, что накопление ОК пестицидов в почвах агроценозов

Таблица 3. Средние нормы применения пестицидов в регионах РФ в 2015 г., по препарату [20]

Субъект Федерации	Норма пестицидов, кг/га
Астраханская обл.	6.5
Республика Дагестан	6.5
Ленинградская обл.	5.4
Волгоградская обл.	≈4
Приморский край	≈4
Хабаровский край	≈4

Таблица 4. Количество пестицидов, контролируемых в компонентах природной среды подразделениями Росгидромета в 2016 г. [21]

Отделение УГМС	Количество пестицидов
Башкирское	5
Верхне-Волжское	7
Западно-Сибирское	11
Обь-Иртышское	6
Приволжское	14
Приморское	6
Северо-Кавказское	14
Уральское	5
Центральное	5
Центрально-Черноземное	2
Всего 20 наименований пестицидов	

РФ все-таки происходит. Именно высокая фитотоксичность ОК сульфонилмочевин заставляет сельхозпроизводителей и ученых искать пути безопасного применения этих гербицидов. Беспокойства относительно ОК других пестицидов, не проявляющих подобную агрессивность, пока не наблюдается. Научная литература по проблемам применения пестицидов в нашей стране преимущественно посвящена поиску новых сочетаний, форм и их эффективности в борьбе с вредными организмами [34]. Актуальность подобных исследований не вызывает сомнений. Однако экологические проблемы, сопровождающие применение ХСЗР, на наш взгляд, не менее актуальны. Недостаточное количество исследований по ОК пестицидов в объектах окружающей среды в РФ имеет объективную причину, связанную с тем, что подобные исследования чрезвычайно сложны и требуют серьезных финансовых вложений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время обеспечение возрастающего населения земли продуктами сельскохозяйственного производства невозможно без применения химических средств защиты растений и продукции. В мире систематически применяют расширяющийся спектр пестицидов. В этих условиях контроль за оборотом пестицидов, регламентом их применения для предотвращения накопления остаточных количеств пестицидов в объектах окружающей среды становится глобальной проблемой современности.

На основе обзора публикаций показано, что мировое сообщество к решению данной проблемы в организационно-правовой сфере подходит с 3-х основных позиций: ограничение доступа к ХСЗР непрофессиональных пользователей пестицидов, постоянное обучение профессиональных пользователей агрохимикатов, совершенствование законодательства оборота пестицидов. В научной сфере идет разработка новых формул пестицидов с пониженной нормой применения и относительно коротким периодом жизни в среде, совершенствуются методы определения ОК пестицидов. В обзоре дана информация о положении дел в РФ. Сделан вывод, что официальный контроль за оборотом пестицидов и их ОК в нашей стране крайне ограничен.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *IARC Monograph on Glyphosate* (https://www.iarc.fr/en/.../iarcnews/.../glyphosate_IARC2016).
2. *Odukkathil G., Vasudevan N.* Toxicity and bioremediation of pesticides in agricultural soil // *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 2013. V. 12. P. 421–444.
3. *Tripathia V., Dubeya R.K., Edrisia S.A., Narainb K., Singhc H.B., Singhd N., Abhilasha P.C.* Towards the ecological profiling of a pesticide contaminated soil site for remediation and management // *Ecol. Engin.* 2014. V. 71. P. 318–325.
4. *Verma J.P., Jaiswal D.K.* Pesticide relevance and their microbial degradation: a-state-of-art // *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 2014. V. 13. P. 429–466.
5. *Li Z., Jennings A.* Worldwide regulations of standard values of pesticides for human health risk control: A Review // *Inter. J. Environ. Res. Public Health.* 2017. V. 14. P. 826.
<https://doi.org/10.3390/ijerph14070826>
6. *Fevery D., Houbraken M., Spanoghe P.* Pressure of non-professional use of pesticides on operators, aquatic organisms and bees in Belgium // *Sci. Total Environ.* 2016. V. 550. P. 514–521.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.123>
7. Directive 2009/128/EC, 2009b (Article 4) of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009. Regulation (EC) No 1107/2009 of the European Parliament and of the council of 21 October 2009 concerning the placing of plant protection products on the market and repealing Council Directives 79/117/EEC and 91/414/EEC <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:309:0001:0050:EN:PDF>
8. *Sacchetti G., Calliera M.* Link practical-oriented research and education: New training tools for a sustainable use of plant protection products // *Sci. Total Environ.* 2017. V. 579. P. 972–977.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.166>
9. *Захаренко В.А.* Использование пестицидов в аграрном секторе России в контексте развития глобальных рынков средств защиты растений // *Агрохимия.* 2020. № 3. С. 43–48.
<https://doi.org/10.31857/S000218812003014X>
10. *Storck V., Karpouzas D.G., Martin-Laurent F.* Towards a better pesticide policy for the European Union // *Sci. Total Environ.* 2017. V. 575. P. 1027–1033.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.167>
11. *Hamlyn O.* Shadow zones: transparency and pesticides regulation in the European Union // *Cambridge Yearbook of European Legal Studies.* 2019. V. 21. P. 243–272.
<https://doi.org/10.1017/cel.2019.15>
12. *Samsidar A., Siddiquee S., Shaarani S.Md.* A review of extraction, analytical and advanced methods for determination of pesticides in environment and foodstuffs // *Trends Food Sci. Technol.* 2018. V. 71. P. 188–190.
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.11.011>
13. *Morillo E., Villaverde J.* Advanced technologies for the remediation of pesticide-contaminated soils // *Sci. Total Environ.* 2017. V. 586. P. 576–597.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.020>
14. *Cyco M., Mrozik A., Piotrowska-Seget Z.* Bioaugmentation as a strategy for the remediation of pesticide-polluted soil: A review // *Chemosphere.* 2017. V. 172. P. 52–71.

15. *Rawtani D., Khatrri N., Tyagi S., Pandey G.* Nanotechnology-based recent approaches for sensing and remediation of pesticides // *J. Environ. Manag.* 2018. V. 206. P. 749–762.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.11.037>
16. *Ramakrishna W., Yadav R., Li K.* Plant growth promoting bacteria in agriculture: Two sides of a coin // *Appl. Soil Ecol.* 2019. V. 138. P. 10–18.
<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.02.019>
17. Данилова А.А. Биодинамика пахотной почвы при различном содержании органического вещества (на примере чернозема выщелоченного Приобья): Монография. Новосибирск: СФНЦ РАН, 2018. 156 с.
18. Федеральный закон от 19 июля 1997 г. № 109-ФЗ “О безопасном обращении с пестицидами и агрохимикатами” (с изменениями и дополнениями). <http://base.garant.ru/11900732/>
19. Государственный каталог пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации”. <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71833632/>
20. Состояние загрязнения пестицидами объектов окружающей среды Российской Федерации в 2015 г. Ежегодник. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2016. 72 с.
21. Состояние загрязнения пестицидами объектов окружающей среды Российской Федерации в 2016 г. Ежегодник. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2017. 80 с.
22. Состояние загрязнения пестицидами объектов окружающей среды Российской Федерации в 2017 г. Ежегодник. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2018. 72 с. <http://www.ecoindustry.ru/gosdoklad/view/458.html#>
23. Государственный доклад “О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2015 году”. М.: Минприроды РФ, НИА-Природа, 2016. 639 с.
24. Государственный доклад “О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2016 году”. М.: Минприроды РФ, НИА-Природа, 2017. 700 с.
25. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2018 год. М.: Росгидромет <http://www.meteorf.ru/>, ИГКЭ им. акад. Ю.А. Израэля, <http://downloads.igce.ru/publications/reviews/review2018.pdf>. <http://www.igce.ru/performance/publishing/reports/>
26. Гигиенические нормативы содержания пестицидов в объектах окружающей среды (перечень) ГН 1.2.3538-18 // Бюл. норматив. и метод. документов Россанэпиднадзора. 2019. Вып. 3 (77). С. 7–103.
27. BCGlobal Pesticide MRL Database. <https://www.bryantchristie.com/BCGlobal-Subscriptions/Pesticide-MRLs>
28. *Захаренко В.А.* Анализ рисков химического загрязнения, связанных с химизацией защитных мероприятий при интегрированном управлении фитосанитарным состоянием агроэкосистем // *Агрохимия*. 2017. № 9. С. 3–24.
29. *Михайликова В.В., Стребкова Н.С.* Использование средств защиты растений в Российской Федерации // *Агрохимия*. 2015. № 12. С. 56–59.
30. *Михайликова В.В., Стребкова Н.С., Пустовалова Е.А.* Действующие вещества — основа химической защиты растений // *Агрохимия*. 2020. № 5. С. 44–46. <https://doi.org/10.31857/S0002188120050105>
31. *Воробьева Т.Н.* Научное обоснование эколого-токсикологического мониторинга виноградников при интенсивной технологической нагрузке // *Плодоводство и виноградарство Юга России*. 2016. № 41 (05). С. 1–10. <http://journal.kubansad.ru/pdf/16/05/13.pdf>
32. Сайт Россельхознадзора <https://www.fsvps.ru/fsvps/news/30774.html>
33. *Чкаников Н.Д., Спиридонов Ю.Я., Халиков С.С., Музафаров А.М.* Пути снижения фитотоксичности остатков сульфонилмочевин в почве с помощью антидотов // *Агрохимия*. 2020. № 5. С. 86–96. <https://doi.org/10.31857/S0002188120050063>
34. *Соколов М.С., Спиридонов Ю.Я., Глинушкин А.П., Каракотов С.Д.* Стратегия фундаментально-прикладных исследований в сфере адаптивно-интегрированной защиты растений // *Агрохимия*. 2018. № 5. С. 3–12.

Control of Pesticide Residuals in the Environment

A. A. Danilova^{a, #}

^a Siberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies of the RAS
rented post-office box 356, Krasnoobsk, Novosibirsk region 630501, Russia

[#]E-mail: Danilova7alb@yandex.ru

Presented here is the review of literature on the monitoring of pesticide residuals in the environment in Russian Federation and abroad. To address the problem, the international community enforces three types of policies: limiting the access to pesticides for nonprofessional users, systemically training professional users of agricultural chemicals and upgrading legislation that regulates the circulation of pesticides on the market. Scholars around the world develop novel pesticides that require lower dosages and take less time to disintegrate in the environment. The methods of calculating pesticide residuals are being improved. The review outlines the current state of pesticide usage and regulations in the Russian Federation. It concludes that in the Russian Federation, the official monitoring of pesticide circulation is limited and studies of pesticide residuals in the environment are scarce.

Key words: pesticides, residual levels, environment.

УДК 631.41:546.15:546.16:631.445.4(571.13)

СОДЕРЖАНИЕ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЙОДА И ФТОРА В ПОЧВАХ ИШИМСКОЙ СТЕПИ¹

© 2021 г. Г. А. Конарбаева^{1, *}, Е. Н. Смоленцева¹, Ю. В. Кравцов²

¹ Институт почвоведения и агрохимии СО РАН
630090 Новосибирск, просп. Лаврентьева, 8/2, Россия

² Новосибирский государственный педагогический университет
630126 Новосибирск, ул. Виллюйская, 28, Россия

*E-mail: konarbaeva@issa.nsc.ru

Поступила в редакцию 13.08.2020 г.

После доработки 12.12.2020 г.

Принята к публикации 11.03.2021 г.

Изучены особенности содержания и закономерности распределения валовой и подвижных форм йода и фтора в почвах различных угодий (пашня, лесополоса, целина) Ишимской степи. Установлено, что валовое содержание йода и фтора в черноземе южном обычном и карбонатном и в лугово-черноземной выщелоченной почве находится примерно в том же диапазоне, что и в подобных почвах других территорий Западной Сибири. На различие в содержании галогенов в черноземах южных оказал влияние тип угодий, в качестве которых их используют. Наиболее значимая связь отмечена между содержанием галогенов и илистой фракцией почв.

Ключевые слова: черноземы, агроземы, Ишимская степь, галогены йод и фтор.

DOI: 10.31857/S0002188121060077

ВВЕДЕНИЕ

Биологическая значимость йода и фтора для нормального функционирования живых организмов очень важна и требует всестороннего изучения их содержания и распределения в различных объектах окружающей среды (почвах, водах и растительности) [1, 2]. Тем не менее природные объекты на огромной территории нашей страны в этом плане еще недостаточно изучены.

Установлено, что дефицит фтора снижает устойчивость зубной эмали, вследствие чего происходит разрушение зубов (кариес), а избыток его приводит к эндемическому флюорозу, поражению зубов и скелета, остеопорозу [1]. Йод входит в состав тироксина — гормона щитовидной железы, регулирующий скорость обмена веществ в живых организмах. Дефицит йода является причиной развития в организме человека эндемического зоба, сахарного диабета [3], избыток — йододермы [1]. У животных йодная недостаточность проявляется в замедлении их роста и развития [4].

Занимаясь детальным изучением галогенов в природных объектах Западной Сибири [5–7], ав-

торы сочли целесообразным продолжить эти исследования почв некоторых территорий Западной Сибири, не вошедших по разным причинам в более ранние исследования.

Объектами изучения послужили почвы Ишимской степи, которая находится на юге-востоке Омской обл. в южной части Ишим-Иртышского междуречья. Территория степи характеризуется плоским рельефом с абсолютной высотой поверхности 100–150 м н.у.м, осложненным неглубокими микропонижениями — ложбинами и замкнутыми западинами. В почвенном покрове преобладают черноземы южные обычные и карбонатные маломощные тяжелосуглинистые, в микропонижениях встречаются лугово-черноземные почвы [8].

При всей значимости данных о валовом содержании фтора и йода, позволяющих представить их распределение и накопление в почвенном профиле, следует отметить их главный недостаток — по валовому количеству галогенов сложно судить об экологической ситуации в агроценозах. По мнению Ильина [9], учет только валового содержания следует признать малопригодным при агрохимической и тем более при экологической оценке почв. Это связано с тем, что даже на загрязненных почвах в силу их буферных свойств и защитных

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания ИПА СО РАН.

Таблица 1. Характеристика объектов исследования

Разрез/угодые	Название почвы по классификации 1977 г.	Название почвы по классификации 2004 г.	Формула профиля по классификации 2004 г.
7-9Иш/пашня	Чернозем южный карбонатный засоленный	Агрозем темный дисперсно-карбонатный засоленный гипс-содержащий	PU'ca—PU"ca—BCAdc—Bca,cs—BCca—Cca
8-9Иш/пашня	Лугово-черноземная выщелоченная	Агрозем темный глинисто-иллювиальный квазиглееватый	PU'—PU"—BI—BCAdc—BCca—Cca
143-19Иш/лесополоса	Чернозем южный обычный	Чернозем дисперсно-карбонатный постагрозенный гипс-содержащий	AO—AU _{pa} —AU—BCAdc—Bca,cs—BCca—Cca
150-19Иш/целина	Чернозем южный обычный	Чернозем дисперсно-карбонатный гипс-содержащий	Ad—AU—BCAdc—Bca,cs—BCca—Cca

функций растений, можно получать чистую продукцию. В связи с этим важно иметь информацию о содержании и распределении подвижных форм фтора и йода, способных поступать в растения. Цель работы — исследование содержания и распределения йода и фтора в почвах Ишимской степи.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования были черноземы южные и лугово-черноземная почва, используемые как различные типы угодий (табл. 1). Название почв даны в соответствии с 2-мя классификациями 1977 г. [10] и 2004 г. с дополнениями [11]. В почвенных образцах, отобранных по генетическим горизонтам, определяли следующие показатели: содержание органического углерода (C_{org}) по методу Тюрина, содержание карбонатов — газоваolumетрическим методом, pH_{H_2O} — потенциометрическим методом. Анализ гранулометрического состава проводили по методу Качинского с пробоподготовкой пирофосфатом натрия. В этих же образцах валовое содержание фтора определяли спектрофотометрическим методом с ализаринкомплексом без предварительной отгонки фтора по методике [12], подвижную форму — по разработанной нами методике [13]. Валовое содержание йода определяли кинетическим роданидно-нитритным методом [14], кислоторастворимую форму йода — раствором 1 М HCl, солерастворимую — по методике [15] раствором 0.1 н. KCl. Статистическую обработку данных провели по [16].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

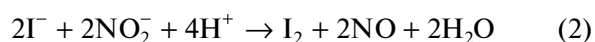
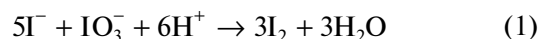
Физико-химическую характеристику данных почв рассматривали в контексте, необходимом

для изучения в них содержания и закономерностей распределения валового количества и подвижных форм фтора и йода, а также солерастворимой формы йода (табл. 2).

Существует ряд факторов, ответственных за аккумуляцию и миграцию данных галогенов в почвах. К ним относятся реакция почвенной среды, содержание органического вещества, гранулометрический состав, тип водного режима и химические свойства фтора и йода. Одинаковая направленность данных факторов положительно сказывается на аккумуляции фтора и йода, если же они имеют разнонаправленный характер, то это негативно влияет на аккумуляцию галогенов и доминирующим может стать процесс их миграции. Особенно это относится к йоду.

Реакция почвенной среды играет значительную роль, т.к. она свидетельствует о способностях почвы к накоплению или потере данных галогенов. Щелочные почвы обладают низкой способностью к фиксации фтора, в то время как в почвах с кислой реакцией отмечена более высокая поглощательная способность по отношению к фтору [17, 18].

Что касается йода, способного к улетучиванию, то в кислой среде возможны следующие реакции [19], в результате которых образуется свободный йод, в дальнейшем улетучивающийся:

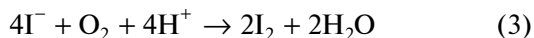


Следует отметить, что вероятность данных реакций в почвенных условиях невелика по ряду причин: концентрация йодат-анионов в условиях кислой реакции почвенной среды не может быть существенной, кроме этого и содержание нитрит-анионов также весьма незначительно в почве. Тем не менее, эти реакции вполне осуществимы.

Таблица 2. Физико-химические свойства изученных почв Ишимской степи

Горизонт	Образец, см	pH _{H₂O}	УЭП, мл см/см ³	С _{орг}	CaCO ₃	Ил	Физическая глина
				% от массы почвы			
Разр. 7-19Иш, агрозем темный дисперсно-карбонатный засоленный							
PU'ca	0–12	8.02	0.28	2.14	4.23	18.1	47.8
PU"ca	12–24	7.83	0.19	2.07	4.23	16.4	46.7
ABca	30–40	8.08	1.22	1.37	5.92	35.2	61.2
BCAdc	50–60	8.07	2.65	0.96	19.01	34.3	60.6
BCAdc	70–80	8.22	2.37	0.66	11.83	34.4	60.1
Bca,cs	110–120	8.06	3.42	1.08	10.14	31.3	55.8
BCca	140–150	8.00	3.09	0.40	9.30	32.7	56.8
Cca	160–170	7.87	3.12	0.46	7.61	н/о	Не определяли
Разр. 8-19Иш, агрозем темный глинисто-иллювиальный квазиглееватый							
PU'	0–14	6.47	0.11	3.70	2.54	18.0	49.0
PU"	14–24	6.51	0.21	3.27	2.54	20.5	51.0
BI	30–40	6.47	0.67	1.63	1.69	34.8	58.0
BI	60–70	7.22	0.11	0.62	1.69	37.5	54.0
BCAdc	80–90	8.36	0.33	0.30	8.46	36.4	55.0
BCAdc	100–110	8.39	0.51	0.31	12.69	37.2	57.0
BCca	130–140	8.43	0.57	0.15	17.77	35.7	59.0
Cca	170–180	8.47	0.68	0.13	10.03	36.6	56.0
Разр. 143-19Иш, чернозем дисперсно-карбонатный постагрогенный гипс-содержащий							
АО	0–5	7.02	0.24	3.31	2.09	21.4	48.2
AUpa	5–15	6.56	0.10	2.61	2.09	27.6	57.1
AUpa	15–25	6.32	0.65	2.23	2.09	25.7	55.4
AU	25–35	6.52	0.70	2.17	1.67	22.9	54.6
AB	38–48	7.11	0.12	1.20	2.10	31.9	61.9
BCAdc	65–75	7.92	0.18	0.96	15.10	40.5	69.3
BCAdc	85–95	8.15	0.20	0.28	14.68	43.5	67.3
Bca,cs	110–120	7.65	1.72	0.12	8.39	36.4	57.5
BCca	130–140	7.68	1.48	0.24	7.13	27.6	39.6
Разр. 150-19Иш, чернозем дисперсно-карбонатный гипс-содержащий							
AUd	0–3	6.61	Не определяли	3.91	2.09	13.0	34.9
AU	3–8	6.48		3.48	2.50	16.9	40.2
AU	8–18	6.80		3.42	2.50	14.8	37.6
AB	22–32	7.94		1.50	1.67	26.2	43.1
BCAdc	40–50	8.27		0.71	11.68	29.4	48.8
BCAdc	60–70	8.48		0.39	12.52	33.8	53.8
Bca,cs	80–90	8.99		0.24	11.68	32.8	49.8
BCca	108–118	8.82		0.17	11.27	37.6	55.2
Cca	130–140	8.85		0.20	10.85	35.7	53.2

Под действием солнечного света и кислой среды происходит окисление йода кислородом воздуха и потери его с поверхности почв:



В то же время реакции, проходящие в условиях щелочной почвенной среды с участием анионов йода, прямо или косвенно приводят к образованию наиболее устойчивых его анионов (I^- и IO_3^-).

Особенности реакции среды изученных почв обусловлены элювиально-иллювиальным характером распределения в их профиле карбоната кальция с образованием карбонатно-аккумулятивного горизонта (ВСА) в средней части профиля. Например, чернозем южный карбонатный (7–19Иш) характеризуется слабощелочной и щелочной реакцией среды по всему профилю в связи карбонатностью всех горизонтов. Остальные почвы имеют в верхней части профиля бескарбонатную зону со слабокислой и нейтральной реакцией среды. Наиболее низкие величины $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ отмечены в гумусовом горизонте почвы под лесополосой. Максимальная мощность бескарбонатной зоны (80 см) зафиксирована в лугово-черноземной выщелоченной почве (8–19Иш), что обусловлено более глубоким выщелачиванием карбонатов под влиянием дополнительного поверхностного увлажнения.

Естественный барьер, создаваемый карбонатами на пути миграции ионов фтора и йода, предполагает фиксацию последних благодаря процессам окклюзии, сорбции и реакциям обмена (5, 20, 21). В изученных почвах Ишимской степи вертикальное распределение валовой формы йода имеет сходный характер с распределением карбонатов.

Содержание гумуса и его гуматно-фульватный состав является важным показателем прежде всего для йода. О приоритетности вхождения йода в состав органического вещества свидетельствует ряд исследований [22, 23]. Однако стоит отметить, что согласно исследованиям Schnitzer [24], повышенное содержание кислорода в фульвокислотах (40–50%) в сравнении с гуминовыми кислотами (32–38%) может, по нашему мнению, оказывать негативное влияние на химическое взаимодействие этих кислот с йодид-анионом из-за возможного электростатического отталкивания между отрицательно заряженными анионами O_2^- и I^- . Распределение органического вещества в изученных почвенных профилях закономерно снижается от верхних горизонтов к нижним.

Для фтора содержание гумуса менее значимо, поэтому не случайно, что концентрация фтора

увеличивается вниз по профилю почвы из-за роста содержания фракций физической глины и ила. Одна из причин слабого накопления фтора в верхних горизонтах — его нисходящая миграция вследствие слабой сорбирующей способности органического вещества к фтору [25]. Еще одна причина — малочисленность возможных реакций между органическим веществом и фтором по причине того, что прямое фторирование углеводов является очень сильным экзотермическим процессом, а потому оно возможно лишь в строго определенных условиях [26]. Следовательно, вероятность взаимодействия органических компонентов гумуса непосредственно с фтором весьма ограничена. Наблюдаемое увеличение содержания фтора вниз по профилю почвы связано с его поглощением глинистыми минералами и полуторными оксидами минерального субстрата, осаждением на геохимических барьерах, основным из которых является кальциевый барьер.

Почвообразующими породами исследованных почв являются субэвразальные лессовидные отложения. Гранулометрический состав почв представлен в основном тяжелыми пылевато-иловатыми суглинками и легкими глинами. Содержание физической глины в черноземах южных карбонатных довольно существенно — от 40 до 60%, в лугово-черноземной выщелоченной и черноземе южном оно варьирует от 40 до 70%. Содержание илистой фракции только до глубины ≈ 20 см составляет 13–21%, ниже по профилю — уже 26–43%. Таким образом, гранулометрический состав почв должен благоприятствовать накоплению в них фтора и йода, особенно с глубины 40 см. Достаточно давно экспериментально установлено, что более активная аккумуляция фтора и йода происходит в более тонких почвенных фракциях [22, 27].

Что касается водного режима изученных почв, необходимо отметить, что черноземы Ишимской степи и их агрогенные аналоги имеют непромывной тип водного режима, при котором вся инфильтрующаяся в почву влага атмосферных осадков возвращается в атмосферу. Это обусловлено как высокой испаряемостью (климатический фактор), так и слабой водопроницаемостью почвенно-грунтовой толщи, имеющей тяжелосуглинистый и легкоглинистый состав (литологический фактор) [28]. Вследствие этого для почв изученной территории характерно неглубокое промачивание и активный водообмен только в верхних горизонтах, что определяет высокую интенсивность микробиологических процессов именно в верхней части профиля и приводит к формированию слабого гумусового горизонта [28]. Все вышесказанное относится, прежде всего, к разрезам

7-19Иш и 150-19Иш, расположенным на микроповышениях. Две другие почвы имеют дополнительное поверхностное увлажнение. Лугово-черноземная выщелоченная (разр. 8-19Иш) расположена в микроложбине, где накапливаются снеготалые воды. Чернозем южный под лесополосой (разр. 143-19Иш) получает дополнительную влагу в зимне-весенний период благодаря снегозадержанию.

Дополнительное поверхностное увлажнение влияет на уровень грунтовых вод [28]. Например, полученные в 2019 г. данные бурения показали следующее: на начало июля уровень грунтовых вод в разр. 7-19Иш составил 350 см, в разр. 8-19Иш — 260 см, в разр. 143-19Иш — 300 см. Под целинным черноземом (разр. 150-1Иш) до глубины 500 см грунтовые воды не обнаружены.

Различия в физико-химических свойствах фтора и йода имеют также немаловажное значение. Фтор устойчив в виде аниона F^- , а йод не только в виде аниона I^- , но и виде йодат-аниона IO_3^- , в котором он распространен в щелочных почвах. Окислительная активность фтора в элементном состоянии больше, чем у йода, что в совокупности с реакцией среды может играть определенную роль в процессах их распределения по профилю почв. Подвижность анионов или скорость миграции йода больше ($7.97 \times 10 \text{ м}^2/\text{с}/\text{В}$), чем у фтора ($5.74 \times 10 \text{ м}^2/\text{с}/\text{В}$) [29]. Так как подвижность ионов с повышением концентрации растворов уменьшается [30], то подобное явление может влиять на скорость перемещения галогенов в почвенных растворах, соответственно и на скорость их миграции в почвах. Кроме этого, число молекул воды в первичной гидратной оболочке этих галогенов разное — 4 молекулы H_2O у фтора и одна молекула H_2O — у йода. Увеличение размера иона, естественно, замедляет скорость его движения.

Теперь конкретно рассмотрим ситуацию с галогенами в изученных почвах. Определяя валовое количество любого элемента, получаем информацию о нем только в статическом плане, а с агрохимической и экологической точек зрения важнее контролировать в почвенном профиле содержание и изменение подвижных форм галогенов, наиболее доступных растениям. Это позволит предварительно оценить масштабы поступления галогенов в растения, что немаловажно с позиций сельского хозяйства и здоровья человека и животных.

Распределение органического углерода в почвенном профиле аналогично было тому, что уже ранее наблюдали в почвах этого типа [5]. Содержание физической глины и илистой фракции в изученных разрезах несколько различались. Распределение илистой фракции таково, что макси-

мальные показатели отмечены в горизонте ВСА чернозема под лесополосой, в этих же горизонтах и горизонте АВ в черноземе южном карбонатном на пашне. В лугово-черноземной выщелоченной почве максимум отмечен в горизонтах ВСА и Сса. В разрезе разр. 150-1Иш максимальное количество ила отмечено в горизонтах ВСса и Сса. Объяснить это можно различием в насыщенности карбонатами.

Результаты анализа содержания йода однозначно свидетельствовали о дефиците валового содержания йода, содержание кислоторастворимой и солерастворимой форм йода показало, что концентрация первой формы заметно больше (рис. 1), что было вполне ожидаемым. Действие раствора кислоты на почвенные образцы является более сильным, чем действие 0.1 н. раствора KCl. Однако в реальных условиях на почву кислые растворы типа 0.1 н. HCl обычно не действуют. Поэтому мы считаем, что использование раствора KCl для извлечения солерастворимого йода не только более целесообразно, но и позволяет избежать ощутимого влияния экстрагента на почву, а также может служить свидетельством доступности солерастворимого йода растениям в присутствии в почве ряда низкомолекулярных органических кислот [15].

Коэффициенты корреляции между параметрами ил—валовой йод, ил—кислоторастворимый йод и ил—солерастворимый йод в разрезах 7—19, 8—19 и 143—19 также свидетельствовали о наличии их значительной связи. Ситуация в разрезе 150—19 не вписывалась в общую картину, только величина содержания кислоторастворимой формы йода коррелировала с величиной содержания ила, в то время как валовой йод и его солерастворимая форма показали положительную связь с содержанием органического углерода в сравнении с остальными разрезами, в которых данная корреляция была отрицательной.

Содержание валового фтора и подвижной его формы приведены на рис. 2. Более высокие концентрации подвижного фтора, найденные в лугово-черноземной почве (разр. 8—19) и черноземе южном карбонатном (разр. 7—19), скорее всего, были связаны с внесением фосфорных удобрений, в составе которых всегда присутствует фтор.

Расчет коэффициентов корреляции между параметрами ил—валовой фтор, ил—подвижный фтор показал, что между этими параметрами существует значимая связь, в то время как между величинами $C_{\text{орг}}$ и содержанием фтора выявлена связь отрицательная (табл. 3).

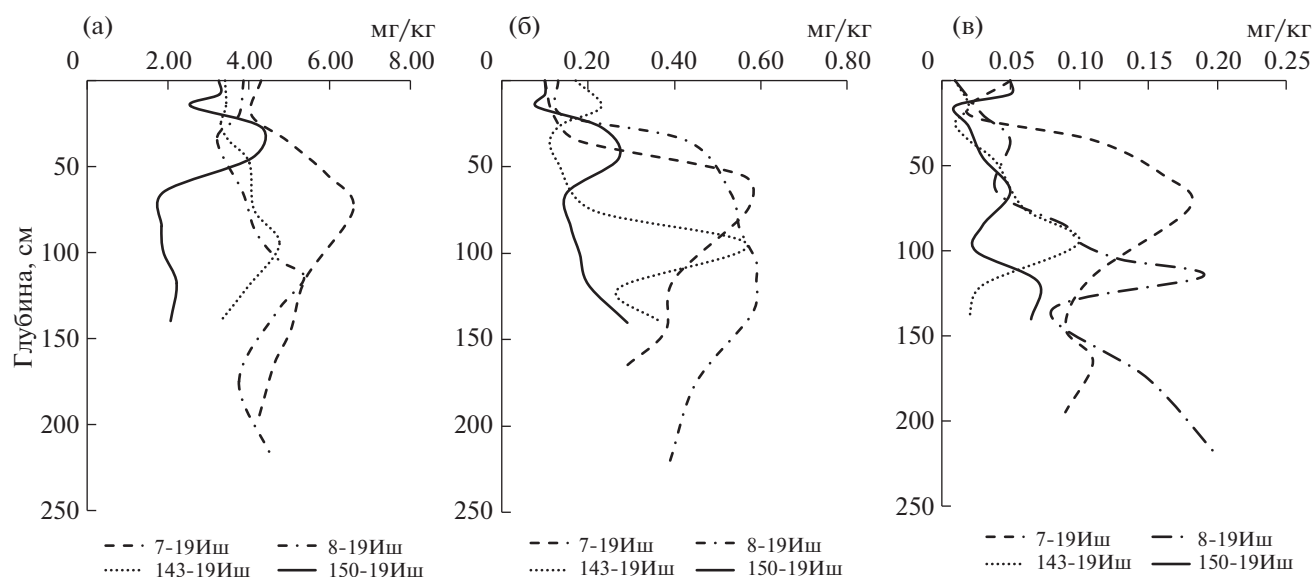


Рис. 1. Содержание валового йода (а), его кислоторастворимой (б) и солерастворимой (в) форм в почвах Ишимской степи.

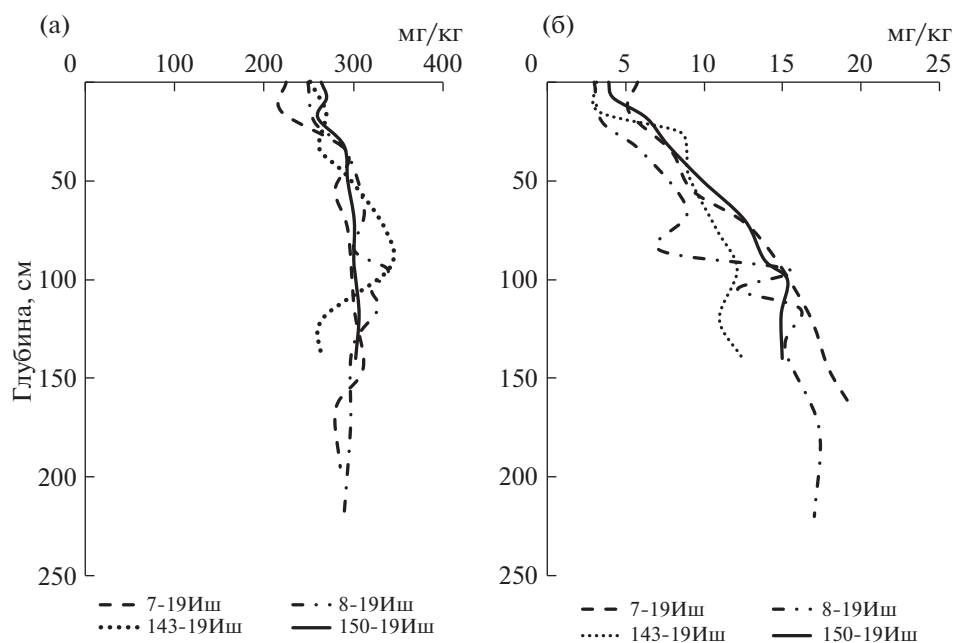


Рис. 2. Содержание валового фтора (а) и его подвижной формы (б) в почвах Ишимской степи.

По литературным данным, допустимым уровнем валового содержания фтора в почвах принято считать 500, критическим — 500–1000, недопустимым — >1000 мг/кг [31]. Основываясь на этих данных, можно утверждать, что валовое содержание фтора в изученных почвах несколько меньше допустимого уровня, что вполне приемлемо. Содержание подвижной формы фтора входит в диапазон концентраций (6–20 мг/кг), найденных в различных типах почв.

Согласно градациям Ковальского [3], валовое содержание йода в почвах до 5.0 — недостаточное, 5.0–40 — нормальное и >40 мг/кг — избыточное. Следовательно, почвы Ишимской степи испытывают дефицит йода, что характерно для большинства зональных почв Западной Сибири. Содержание кислоторастворимой формы йода варьирует в пределах 0.1–0.57, солерастворимой — в пределах 0.01–0.17 мг/кг.

Таблица 3. Коэффициенты корреляции между содержанием ила, органического углерода и галогенов

Показатель	Разрез	Йод			Фтор	
		валовой	кислотно-растворимый	соле-растворимый	валовой	подвижный
Ил, %	7-19Иш	0.65	0.69	0.85	0.94	0.58
	8-19Иш	0.33	0.92	0.60	0.86	0.74
	143-19Иш	0.90	0.63	0.89	0.87	0.63
	150-19Иш	–0.49	0.72	–0.02	0.99	0.96
C _{орг} , %	7-19Иш	–0.37	–0.60	–0.61	–0.83	–0.87
	8-19Иш	–0.45	–0.91	–0.69	–0.83	–0.84
	143-19Иш	–0.59	–0.67	–0.58	–0.49	–0.91
	150-19Иш	0.43	–0.74	0.07	–0.98	–0.94

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на содержание галогенов в изученных почвах немаловажное влияние оказывал тип угодья (пашня, лесополоса или целина). В изученных почвах установлены сходства и различия по содержанию и вертикальному распределению валового йода. Максимальное его содержание зафиксировано в черноземе южном карбонатном (агроземе темном дисперсно-карбонатном), минимальное было отмечено в целинном черноземе южном обычном (черноземе дисперсно-карбонатном). Все пахотные почвы имели сходный характер распределения валового йода по профилю, целинная почва заметно отличалась от них по глубине расположения максимума аккумуляции галогена. В отношении фтора еще раз подтверждена значимая связь между его содержанием и количеством илистой фракции.

Отсутствие корреляции между величинами содержания C_{орг} и йода в отличие от сильной связи между содержанием гумуса и йода, которую отмечали практически все исследователи, связано, по нашему мнению, с тем, что в основу ГВ входят ароматические и гетероциклические кольца бензола, фенола, нафталина и другие кольца, а также ароматические амины, спирты, водород которых легко замещается на йод. В чистом виде углерод не взаимодействует с йодом, потому корреляцию не выявляют.

Также показано, что изученные почвы Ишимской степи характеризуются дефицитом йода. По содержанию валового и подвижного фтора дефицита не отмечено.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авцын А.П., Жаворонков А.А., Риш М.А. Микроэлементы человека М.: Медицина, 1991. 495 с.
2. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 438 с.
3. Ковальский В.В. Биологическая роль йода // Биологическая роль йода. Научн. тр. ВАСХНИЛ. М.: Колос, 1972. С. 3–32.
4. Мальгин М.А. Проявление йодной недостаточности на Алтае. Горно-Алтайск, 1988. 55 с.
5. Конарбаева Г.А. Галогены в природных объектах юга Западной Сибири: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Новосибирск: СО РАН, 2008. 33 с.
6. Конарбаева Г.А., Смоленцев Б.А. Пространственно-генетические особенности распределения йода в почвах Западной Сибири // Агрохимия. 2018. № 7. С. 94–105.
7. Конарбаева Г.А., Якименко В.Н. Изменение содержания галогенов в системе почва–растение в условиях агроценозов // Вестн. ТГУ. Сер. Биол. 2014. № 3. С. 23–35.
8. Сеньков А.А. Галогенез степных почв. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. 152 с.
9. Ильин В.Б. Тяжелые металлы и неметаллы в системе почва–растение. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. 220 с.
10. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 221 с.
11. Полевой определитель почв. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
12. Миллер А.Д., Капитонова Г.А. Метод определения фтора с ализаринкомплексом в горных породах и минералах без предварительной отгонки // Методы анализа редкометалльных минералов, руд и горных пород. М., 1971. Вып. 2. С. 80–89.
13. Конарбаева Г.А., Парфенов А.И. Способ фотометрического определения фтора. А. с. № 1670600, приоритет от 4.05.1987 г.
14. Проскуракова Г.Ф., Никитина О.Н. Ускоренный вариант кинетического роданидного–нитритного метода определения микроколичеств йода в биологических объектах // Агрохимия. 1976. № 7. С. 140–143.
15. Конарбаева Г.А., Ермолов Ю.В. К вопросу о целесообразности извлечения йода из почв нейтральным

- солевым раствором // *Агрохимия*. 2005. № 4. С. 67–72.
16. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
 17. Bower C.A., Hatcher J.T. Adsorption of fluoride by soils and minerals // *Soil Sci.* 1967. V. 103. № 3. P. 151–154.
 18. Дубровина И.В., Корнблум Э.А. Природа поглощения почвами фтора из удобрений и мелиорантов // *Почвоведение*. 1984. № 9. С. 23–34.
 19. Уильямс У.Дж. Определение анионов. М.: Химия, 1982. 622 с.
 20. Конарбаева Г.А. Валовое содержание и распределение йода в профиле некоторых почв Западной Сибири // *Агрохимия*. 2003. № 8. С. 74–81.
 21. Розен Б.Я. Геохимия брома и йода. М.: Недра, 1970. 132 с.
 22. Кашин В.К. Биогеохимия, фитофизиология, агрохимия йода. Л.: Наука, ЛО, 1987. 260 с.
 23. Yamada Hidekazu, Kiriya Totsuya, Onagawa Yuji. Speciation of iodine in soils // *Soil Sci. Plant Nutr.* 1999. V. 45. № 3. P. 563–568.
 24. Schnitzer M. Recent findings of the characterization of substances extracted from soils from widely differing climatic zones // *Soil organic matter studies. Proc. Symp. of Braunschweig 6–10 September, 1976. Vienna, 1977. P. 117–132.*
 25. Omuetti J.A.J., Jones R.L. Fluorine distribution with depth in relation to profile development in Illinois // *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 1980. V. 44. № 2. P. 247–249.
 26. Карпер П. Курс органической химии. Л.: Госхимиздат, 1960. 1216 с.
 27. Виноградов А.П. Геохимия редких и рассеянных химических элементов. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 234 с.
 28. Кравцов Ю.В. Черноземы Ишимской степи. Новосибирск: НГПУ, 2004. 213 с.
 29. Чанг Р. Физическая химия с приложениями к биологическим системам. М.: Мир, 1980. 662 с.
 30. Некрасов Б.В. Основы общей химии. М.: Химия, 1973. Т. 1. 656 с.
 31. Гапонюк Э.И., Кузнецова М.В. Влияние фтористого натрия на свойства почвы и развитие некоторых сельскохозяйственных культур // *Гигиена и санитария*. 1984. № 6. С. 77–79.

Content and Distribution of Iodine and Fluorine in the Soils of the Ishim Steppe

G. A. Konarbaeva^{a,*}, E. N. Smolentseva^a, and Yu. V. Kravtsov^b

^a *Institute of Soil Science and Agrochemistry of Siberian branch of RAS prosp. Lavrentieva 8/2, Novosibirsk 630090, Russia*

^b *Novosibirsk State Pedagogical university, ul. Vilyuiskaya 28, Novosibirsk 630126, Russia*

^{*} *E-mail: konarbaeva@issa.nsc.ru*

The features of the content and distribution patterns of the gross and mobile forms of iodine and fluorine in the soils of various lands of the Ishim steppe (arable land, forest belt, virgin land) are studied. It is established that the total content of iodine and fluorine in the southern ordinary and carbonate chernozem and in the meadow-chernozem leached soil is approximately in the same range as in similar soils of other territories of Western Siberia. The difference in the content of halogens in the southern chernozems was influenced by the type of land in which they are used. The most significant relationship was observed between the halogen content and the silt fraction of soils.

Key words: chernozems, agrozems, Ishim steppe, halides, iodine and fluorine.

УДК 631.466.3:631.98:633.16

ВЛИЯНИЕ ЦИАНОБАКТЕРИЙ И ЛИГНОГУМАТА НА РОСТ И БИОХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАСТЕНИЙ ЯЧМЕНЯ¹

© 2021 г. Е. В. Коваль^{1,*}, С. Ю. Огородникова^{1,2}

¹ Государственный аграрный университет Северного Зауралья
625003 Тюмень, ул. Республики, 7, Россия

² Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН
167982 Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28, Россия

*E-mail: undina2-10@yandex.ru

Поступила в редакцию 27.04.2020 г.

После доработки 29.09.2020 г.

Принята к публикации 10.12.2020 г.

Изучено влияние препарата лигногумат (ЛГ) на цианобактерии (ЦБ) рода *Nostoc* и природные биопленки с доминированием ЦБ, а также их совместное действие на биохимические показатели и рост растений ячменя. Установлено, что биопленки и ЦБ *Nostoc muscorum* более устойчивы к действию ЛГ. Высокая чувствительность к ЛГ характерна для ЦБ *N. linckia* и *N. paludosum*, что проявилось в активации процессов перекисного окисления липидов в клетках и снижении содержания хлорофилла *a*. Предпосевная обработка семян ЦБ *N. muscorum* усиливала защитные свойства ЛГ: отмечали снижение интенсивности процессов перекисного окисления липидов в листьях, накопление антоцианов и каротиноидов. Фитостимулирующее действие ЦБ *N. muscorum* и ЛГ проявилось в увеличении линейных размеров побегов и корней растений ячменя.

Ключевые слова: лигногумат, цианобактерии, ячмень, пластидные пигменты, малоновый диальдегид, антоцианы.

DOI: 10.31857/S0002188121030108

ВВЕДЕНИЕ

Для повышения устойчивости растений, улучшения их свойств и жизнеспособности используют множество гуминовых препаратов [1, 2]. В настоящее время доступны препараты, которые снижают токсическое действие поллютантов [3–6]. Лигногумат (ЛГ) – это гуминовый препарат с высоким содержанием солей гуминовых кислот, состоит на 60% из гуминовых кислот и на 40% из фульвокислот, обогащен биофильными элементами, в том числе серой и такими микроэлементами как Fe, Cu, Mn, Mo, Zn, Se, B, Co. Препарат применяют в растениеводстве, в качестве биологически активных кормовых добавок в животноводстве, в восстановлении почв, а также в биотехнологиях при производстве меристемных культур [7]. Известно, что привнесение лигногумата увеличивает урожайность сельскохозяйственных

культур и улучшает качество продукции [8], усиливает иммунитет растений, а также снимает стресс после внекорневых обработок пестицидами и сложными смесями [9]. Однако при увеличении концентрации >1% препарат проявляет свойства ингибитора [4]. Действующие вещества препарата имеют достаточно сложную структуру, которая позволяет связывать токсиканты, переводя их в малоподвижную форму [10].

В современном растениеводстве используют биопрепараты на основе цианобактерий (ЦБ). Ряд ЦБ проявляют функции, схожие с действием препарата лигногумат. Они могут оказывать не только ростстимулирующее действие, но и антибиотическое, способны улучшать состояние растений в условиях сильного загрязнения [11, 12]. Благодаря своим уникальным свойствам и чувствительности к ряду токсикантов, ЦБ используют в целях биотестирования.

Действие препарата лигногумат и цианобактерий на растения можно оценить по ответным реакциям растений ячменя, в частности, по изменению интенсивности процессов перекисного окисления липидов (ПОЛ) и содержанию пла-

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания Института биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН по теме “Оценка и прогноз отсроченного техногенного воздействия на природные и трансформированные экосистемы подзоны южной тайги” № гос. регистрации АААА-А17-117121990125-5.

стидных пигментов. Содержание пигментов — это чувствительный показатель функционального состояния растений. Факторы разной природы (засуха, чрезмерная инсоляция, поллютанты, насекомые и т.п.) вызывают изменения в пигментном комплексе растений.

Повышенная активация процессов ПОЛ в стрессовых условиях приводит к окислительной деградации макромолекул, инактивации ферментов, нарушению функции мембран митохондрий и хлоропластов и, как следствие, снижению содержания пластидных пигментов [13–15]. В ответ на рост концентрации свободных радикалов в клетке происходит запуск антиоксидантной системы растений. К клеточным антиоксидантам относятся пигменты каротиноиды и антоцианы. Антиоксиданты выполняют защитные функции в клетке, подавляя в растительных тканях окислительные процессы.

Цианобактерии обладают доказанными свойствами улучшать среду обитания растений и образовывать с ними симбиозы, что положительно влияет на жизнедеятельность растений. Например, обработка семян горчицы *N. linckia* приводила к усилению фиторемедиационных способностей растения, ЦБ также обладают устойчивостью к нефтепродуктам и метилфосфонатам [16, 17]. Штамм *N. paludosum* способен восстанавливать супрессивность химически и микологически загрязненных почв [18]. Почвы, инокулированные *N. muscorum*, проявляют большую устойчивость к деградации во время смачивания и физического разрушения [19]. Эта особенность может помочь предотвратить эрозию почвы, а также способствует повышению вероятности прорастания семян в почвах, содержащих *N. muscorum* [19, 20]. Выбор ячменя в качестве объекта исследования был обусловлен его высокой хозяйственной ценностью как для пищевой промышленности, так и для сельского хозяйства [21]. Цель работы — изучение влияния цианобактерий и лигногумата на рост и биохимические показатели растений ячменя.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования служили альгологически чистые культуры цианобактерий *N. linckia* (Roth.) Born and Flah. № 271, *N. paludosum* Kütz. № 18, *N. muscorum* Ag. № 13, природные биопленки с доминированием *N. commune*, а также ячмень двурядный сорта Новичок (*Hordeum distichum* L.).

Видовой и количественный состав альго-цианобактериальной микрофлоры определяли путем прямого микроскопирования в сочетании с

методами чашечных и водных культур [22]. Видовой состав БП включал следующие виды: *N. commune*, *N. punctiforme*, *Phormidium autumnale*, *Ph. molle*, *Ph. uncinatum*, *Leotolyngbya fragilis*, *L. foveolarum*, *Chlorella mirabilis*, *L. nostocorum*, *Borzilla trilocularis*. Доля ЦБ *N. commune* в данной биопленке составила 81.6%, прочие 18.4% пришлось на другие гетероцистные и безгетероцистные ЦБ и зеленые водоросли [23]. Биопленки были собраны вдоль обочины железной дороги на песчано-гравийной насыпи.

Титр клеток ЦБ и БП определяли с использованием камеры Горяева [24]. Цианобактерии для экспериментов выбирали по возрасту и титру клеток в фазе экспоненциального роста. Возраст БП исчислялся с момента внесения сухой пленки в питательную среду Громова. Возраст ЦБ и БП составил 5 нед. Титр: *N. linckia* — 1.7×10^7 кл./мл, *N. paludosum* — 1.2×10^7 кл./мл, *N. muscorum* — 2.7×10^7 кл./мл, природных биопленок с доминированием *N. commune* — 2.4×10^7 кл./мл.

Культуры цианобактерий и биопленок пересаживали на питательные растворы с соблюдением норм стерильности. Культивировали биопленки и цианобактерии на среде Громова № 6 без азота в течение 5 нед в люминостате при постоянной температуре 25°C и 12-часовом освещении 3000 лк.

Были проведены 2 серии опытов. В первой серии опытов проводили оценку влияния ЛГ на ЦБ и природные БП с доминированием *N. commune*. Для этого культуры микроорганизмов (2 мл) выдерживали в пробирках на растворе ЛГ (3 мл) в концентрации 1 г/л в течение 24 ч, после чего в клетках определяли содержание хлорофилла *a* и интенсивность процессов перекисного окисления липидов.

Во 2-й серии опытов семена ячменя в количестве 40 шт. проращивали на увлажненной дистиллированной водой фильтровальной бумаге в чашках Петри в присутствии ЦБ *N. muscorum* (по 2 мл суспензии на чашку Петри) и без них. Семена проращивали 4 сут в климатостате при постоянной температуре 20°C. Затем проростки пересаживали в водную среду, в качестве которой использовали питательный раствор Кнопа (контроль) и в раствор лигногумата (1 г/л), приготовленный на растворе Кнопа. Дальнейшее проращивание проходило в климатостате при температуре 25°C и 12-часовом освещении 3000 лк.

В фазе 2-х листьев оценивали влияние обработки растений ЦБ, ЛГ и их совместного действия на функциональный статус растений ячменя по биохимическим показателям (интенсивность процессов перекисного окисления липидов

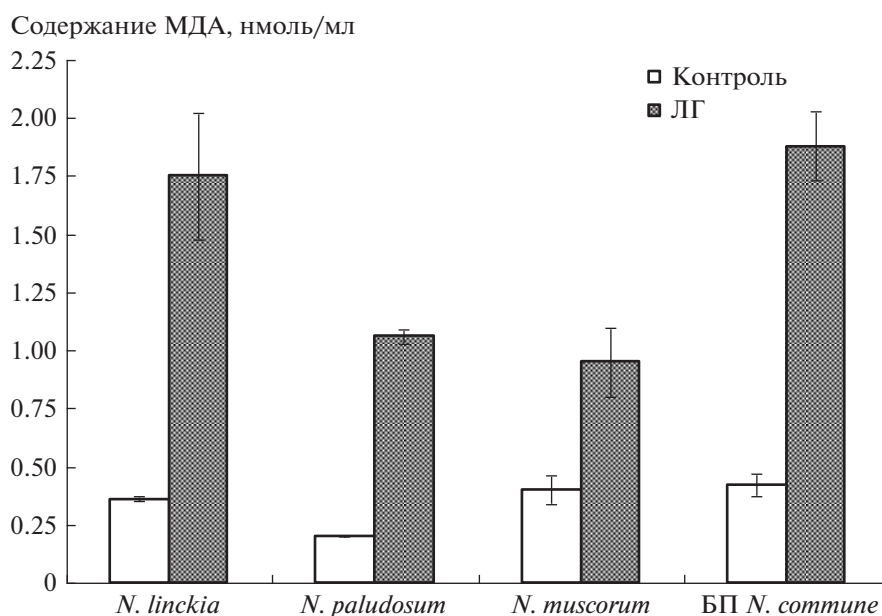


Рис. 1. Влияние лигногумата на активность перекисного окисления липидов в клетках цианобактерий и природных биопленок с доминированием *N. commune*.

(ПОЛ), содержание пластидных пигментов и антоцианов) и линейному росту.

Для изучения влияния ЦБ, ЛГ и их совместного действия на ростовые процессы отбирали по 30 растений каждого варианта, разделяли по органам, измеряли длину корней и побегов.

Интенсивность ПОЛ анализировали по цветной реакции тиобарбитуровой кислоты с малоновым диальдегидом (МДА), который образуется в процессе ПОЛ [25]. Определяли накопление МДА в культуре ЦБ (нмоль/мл) и в листьях и корнях ячменя (нмоль/г сырой массы).

Экстракцию и количественное определение антоцианов проводили согласно методике [26]. Содержание фотосинтетических пигментов в листьях ячменя определяли фотометрическим методом на спектрофотометре “Specol 1300” (Analytik Jena, Германия) в ацетоновой вытяжке (при длинах волн 662 и 644 нм — хлорофиллы *a* и *b* соответственно [27]. Определение каротиноидов проводили при 470 нм [28]. Содержание хлорофилла *a* в культуре ЦБ оценивали спектрофотометрическим методом при длинах волн 665 и 750 нм [29].

Все эксперименты были выполнены в трехкратной повторности. Полученные данные обрабатывали с использованием стандартных статистических методов [30]. В таблицах приведены средние арифметические величины и стандартное отклонение. Достоверность различий между 2-мя средними оценивали с использованием *t*-критерия Стьюдента.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Лигногумат относится к препаратам 4-го класса опасности и не оказывает токсическое, мутагенное и канцерогенное действие на растения и здоровье человека. Однако при превышении концентрации >1% препарат проявляет свойства ингибитора. Действие различных концентраций на растения хорошо изучено, но влияние ЛГ на ЦБ и прочие микроорганизмы изучено слабо. Именно поэтому была выбрана концентрация ЛГ (1 г/л), которая рекомендована производителем для использования и ее наиболее часто применяют, т.к. она не способна оказывать токсическое влияние на растения.

В первой серии опытов было установлено, что ЛГ (1 г/л) вызывал рост интенсивности процессов ПОЛ в клетках ЦБ. Во всех вариантах эксперимента, как в альгологически чистых культурах ЦБ, так и природных БП, отмечали возрастание уровня МДА — основного продукта реакций ПОЛ (рис. 1). Накопление МДА является одним из симптомов развития окислительных процессов в клетках [31]. Наибольшее содержание МДА отмечали в варианте с использованием ЦБ *N. linckia* и БП, где интенсивность процессов ПОЛ была более чем в 4 раза больше по сравнению с контролем.

В вариантах с действием ЛГ на *N. linckia* и *N. paludosum* активация ПОЛ сопровождалась значительным снижением количества хлорофилла *a* в клетках (рис. 2). Уменьшение содержания хлорофилла *a* может быть следствием активации

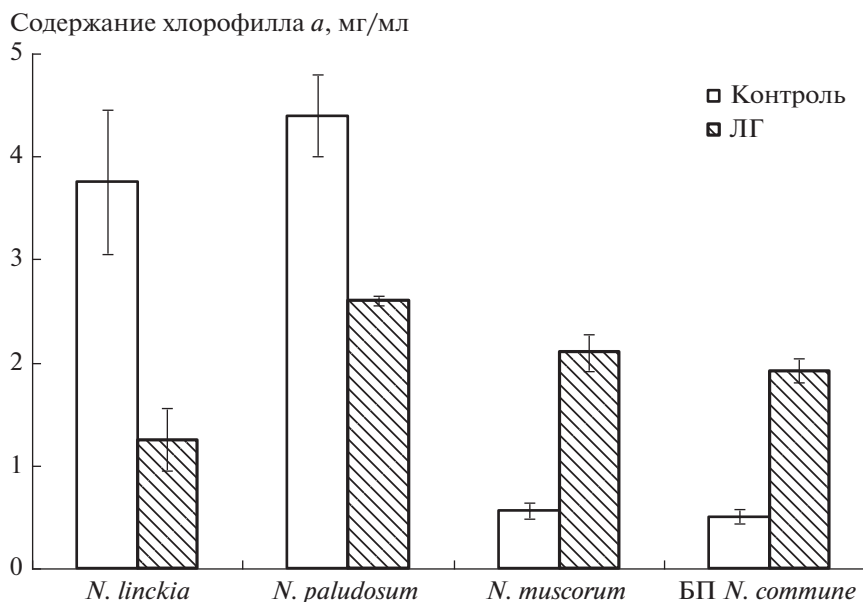


Рис. 2. Влияние лигногумата на содержание хлорофилла *a* в клетках цианобактерий и природных биопленок с доминированием *N. commune*.

окислительных процессов, в ходе которых происходила деградация молекул хлорофилла, а также инактивация ферментов биосинтеза пигментов. Цианобактерия *N. muscorum* и природные БП были более устойчивы к действию ЛГ. Под влиянием ЛГ содержание зеленого пигмента в клетках ЦБ возрастало более чем в 3 раза по сравнению с контролем.

В стрессовых условиях изменение интенсивности процессов ПОЛ может свидетельствовать как о патологических состояниях, так и о процессах адаптации [32]. Устойчивость к факторам внешней среды БП обеспечивается их поликомпонентностью: фототрофные и сапротрофные микроорганизмы и их бактерии-спутники [33, 34]. Ранее была показана устойчивость ЦБ *N. muscorum* к действию фосфорорганического ксенобиотика – метилфосфоновой кислоты [35]. Вероятно, при высокой интенсивности процессов ПОЛ разрушению хлорофилла *a* препятствовала эффективная работа антиоксидантной системы в клетках ЦБ, которая включает множество активных веществ. Известно, что высокую устойчивость ЦБ к действию стрессовых факторов обеспечивает содержание токоферола и фенольных соединений [36], каротиноидов [37], антиоксидантов аскорбат-глутатионового цикла [38], флавоноидов [39]. В случае БП и ЦБ *N. muscorum* повышенное накопление МДА могло свидетельствовать о процессах адаптации.

На основании ответных реакций ЦБ можно сделать вывод о высокой чувствительности ЦБ *N. linckia* и *N. paludosum* к действию ЛГ. Биопленки с доминированием *N. commune* и ЦБ *N. muscorum*, напротив, отличались повышенной устойчивостью к гуминовому препарату.

Для исследования эффектов ЦБ и ЛГ на жизнедеятельность растений ячменя была выбрана ЦБ *N. muscorum*, как наиболее устойчивая к действию ЛГ. Во 2-й серии опытов семена ячменя инокулировали при проращивании ЦБ и переносили в питательный раствор, содержащий лигногумат.

Известно, что лигногумат (0.2, 0.5 и 1 г/л) не оказывает влияние на всхожесть и энергию прорастания семян ячменя [40]. Предварительная инокуляция семян ячменя ЦБ *N. muscorum* вызвала повышение их жизнеспособности [35].

Установлено, что ЦБ *N. muscorum* вызывала активацию процессов ПОЛ в листьях ячменя (рис. 3а). В вариантах с действием ЛГ, напротив, уровень МДА в листьях был меньше на 20% по сравнению с контролем.

По сравнению с надземной частью, корни реагировали на ЛГ и ЦБ *N. muscorum* иначе (рис. 3б). Обработка семян ЦБ *N. muscorum* приводила к снижению интенсивности процессов ПОЛ в корнях (на 49% меньше контроля). При действии ЛГ также отмечали незначительное снижение МДА в корнях. Однако совместное действие на растения ЦБ и ЛГ вызывало активацию процессов ПОЛ в

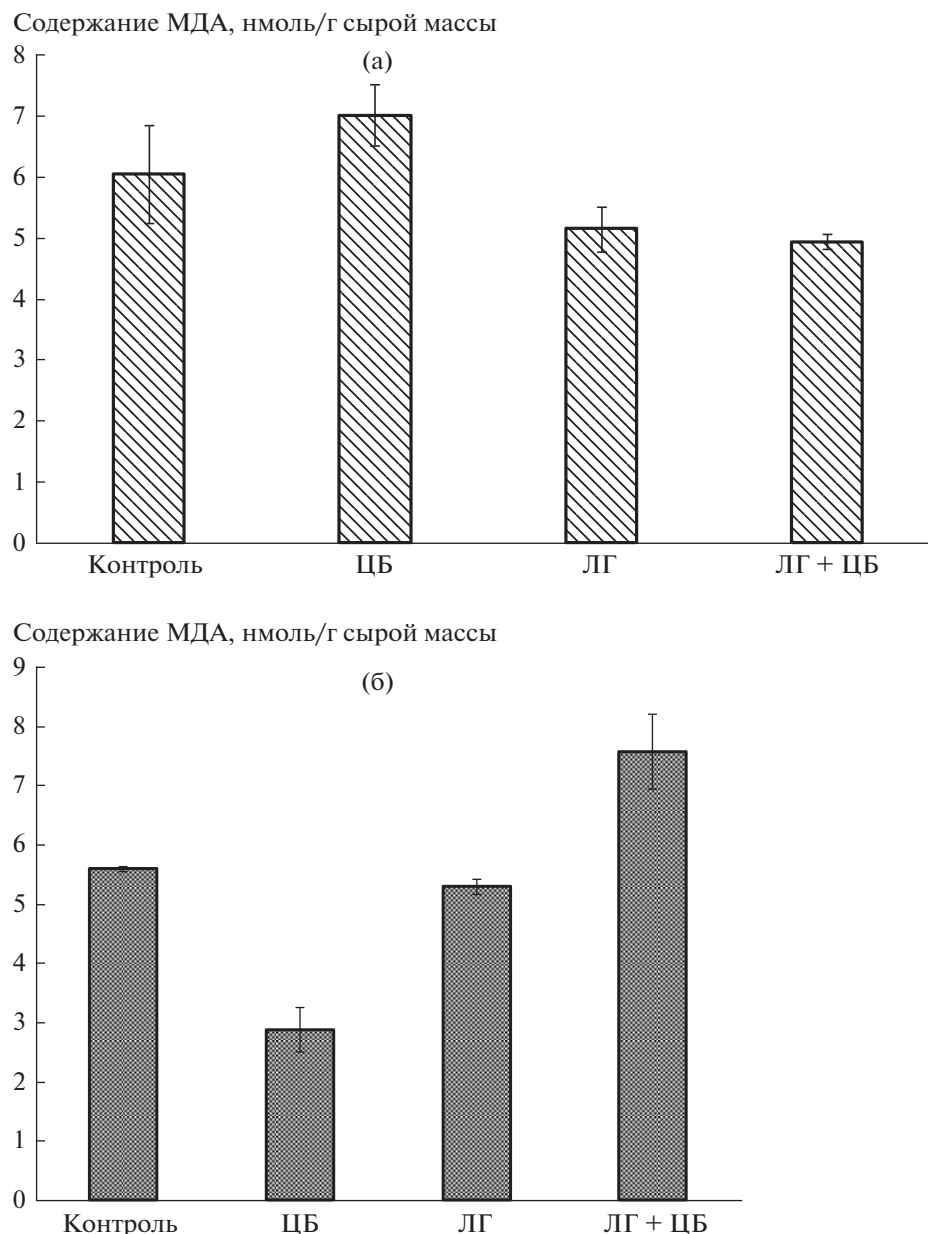


Рис. 3. Влияние препарата лигногумат и цианобактерии *N. muscorum* на активность перекисного окисления липидов: (а) – в листьях, (б) – корнях растений ячменя.

корнях. Это могло быть связано с комплексным действием на корни ЛГ, ЦБ и экзометаболических ЦБ и направлено на адаптацию растений к условиям произрастания.

Развитие окислительных процессов в клетках листьев ячменя оценивали по накоплению веществ с антиоксидантными свойствами – каротиноидов и антоцианов. В листьях растений, которые перед посадкой были обработаны *N. muscorum*, содержание каротиноидов было близко к контролю, но уровень антоцианов значительно возрастал (табл. 1). Ранее было показано, что ЦБ

вызывали активацию процессов ПОЛ в листьях растений этого варианта. По-видимому, *N. muscorum* индуцировала развитие окислительных процессов в клетках листьев ячменя, которые способствовали адаптации к действию ЦБ. Результатом эффективной работы антиоксидантной системы являлся уровень хлорофиллов в листьях. В варианте с инокуляцией семян ЦБ содержание хлорофиллов было больше, чем в контроле.

В опытах с действием на растения ЛГ и ЛГ с ЦБ *N. muscorum* также отмечали накопление в ли-

Таблица 1. Влияние лигногумата и цианобактерии *N. muscorum* на содержание пигментов в листьях ячменя

Вариант	Содержание пластидных пигментов, мг/г сухой массы			Содержание антоцианов, %
	хлорофилл		каротиноиды	
	<i>a</i>	<i>б</i>		
Контроль	6.65 ± 0.14	2.51 ± 0.50	1.60 ± 0.03	0.0390 ± 0.0029
ЦБ	7.05 ± 0.38	2.80 ± 0.19	1.49 ± 0.07	0.0540 ± 0.0034*
ЛГ	6.81 ± 0.52	2.86 ± 0.40	1.84 ± 0.13	0.0770 ± 0.0092*
ЛГ + ЦБ	6.67 ± 0.32	2.78 ± 0.05	1.73 ± 0.16	0.0580 ± 0.0082*

*Различия достоверны при $p < 0.05$.

стях антиоксидантов — антоцианов и каротиноидов, при этом интенсивность процессов ПОЛ была снижена по сравнению с контролем. В присутствии ЛГ в листьях ячменя содержание хлорофиллов было больше по сравнению с контрольными растениями.

Интегральным процессом, который отражает степень приспособления растений к условиям обитания, является рост. Предпосевная инокуляция семян ЦБ *N. muscorum*, как и ЛГ, стимулировала процессы линейного роста органов ячменя (рис. 4). В большей степени ростактивирующее действие на растения ячменя проявилось в варианте с совместным действием ЛГ и ЦБ *N. muscorum*. В большей степени происходила стимуляция роста корней по сравнению с надземными органами.

ВЫВОДЫ

1. На основании изучения интенсивности процессов перекисного окисления липидов (ПОЛ) и накопления хлорофилла *a* в клетках цианобактерий (ЦБ) установлено, что лигногумат (ЛГ) в концентрации 1 г/л оказывал неоднозначное действие на ЦБ. Для ряда культур ЛГ в исследованной концентрации выступал в качестве стресс-фактора.

2. Высокая чувствительность к ЛГ, которая проявилась в многократном росте интенсивности процессов ПОЛ в клетках и существенном снижении уровня хлорофилла *a*, отмечена у ЦБ *N. linckia* и *N. paludosum*. ЦБ *N. muscorum* и природные биопленки с доминированием ЦБ *N. commune* были наиболее устойчивы к действию гуминового препарата ЛГ.

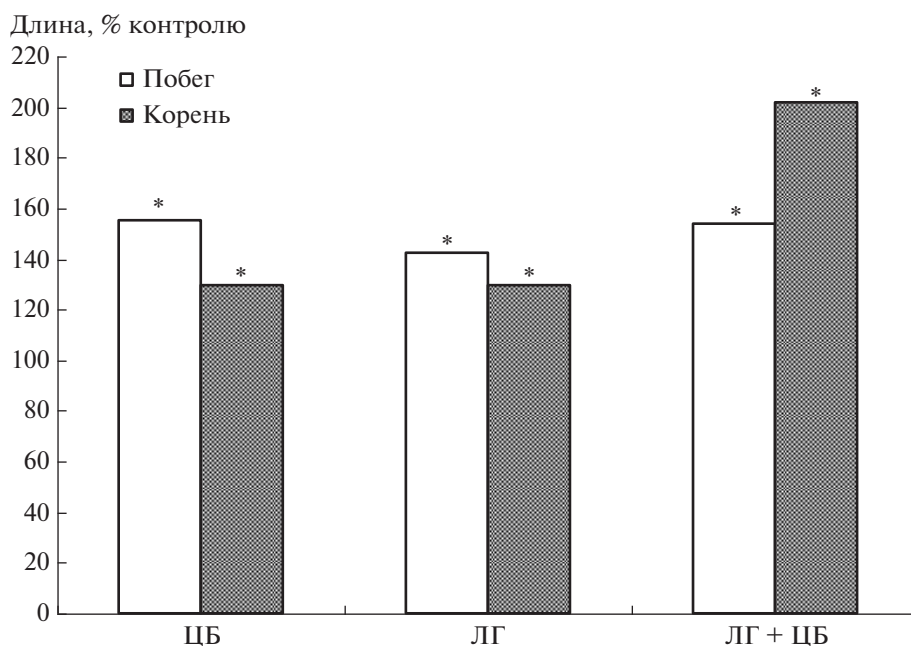


Рис. 4. Влияние лигногумата и цианобактерии *N. muscorum* на линейный рост растений ячменя, *различия достоверны при $p < 0.05$.

3. Предпосевная обработка семян ЦБ *N. muscorum* оказывала фитостимулирующее действие на опытные растения. В листьях растений ячменя, выращенных с использованием ЦБ в присутствии ЛГ, отмечено снижение интенсивности процессов ПОЛ. В корнях ячменя при совместном действии ЛГ и ЦБ, напротив происходило накопление МДА. Выявлена стимуляция ростовых процессов в проростках опытных растений. Цианобактериальная инокуляция семян *N. muscorum* и использование ЛГ способствовала росту корней и побегов ячменя. Установленная закономерность может быть использована для разработки биопрепарата для повышения устойчивости растений.

Выражаем благодарность доктору биологических наук, профессору Л.В. Кондаковой за предоставленные для исследования природные биопленки с доминированием цианобактерий и определение их видового состава.

Благодарим музей фототрофных микроорганизмов кафедры ботаники, физиологии растений и микробиологии им. Э.А. Штиной ВятГСХА (г. Киров) за опытные культуры цианобактерий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yakimenko O., Izosimov A. Structure and properties of humates from coalified materials, peat and sapropel // Humic substances in ecosystems. Slovakia, Soporna, 2009. P. 43–45.
2. Неверова О.А., Егорова И.Н., Жеребцов С.И., Исмаилов З.Р. Влияние гуминовых препаратов на процесс прорастания и активность амилалитических ферментов семян *Sinaps alba* L. // Вестн. Алтай-ГАУ. 2013. № 6 (104). С. 43–46.
3. Дагуров А.В., Стом Д.И., Вятчина О.Ф., Балаян А.Э., Кушнарев Д.Ф. О механизме антидотного действия гуматов по отношению к нефтепродуктам // Бюл. ВСНЦ СО РАМН. 2005. № 6. С. 143–145.
4. Коновалов А.С. Оценка детоксикации гуматами растворов соли мышьяка методами биотестирования // Acta Biomed. Sci. 2013. № 2 (1). С. 115–119.
5. Антонова О.И., Зубченко Е.Б., Скокова О.В. Эффективность использования гуматов при загрязнении почв тяжелыми металлами // Вестн. Алтай-ГАУ. 2003. № 2. С. 21–26.
6. Таран Д.О., Саксонов М.Н., Плеханов С.Е. Токсическое действие ароматических соединений на гидробионты и его ослабление гуминовыми веществами // Вестн. ИрГСХА. 2012. № 50. С. 87–94.
7. Лигногумат: общая информация, методика и результат применения. Рекоменд. для агрономов. СПб., 2011. 48 с.
8. Перминова И.В., Жилин Д.М. Гуминовые вещества в контексте зеленой химии // Зеленая химия в России / Под. ред. Лунина В.В. Сб. научн. ст. М.: Изд-во МГУ, 2004. С. 146–162.
9. Стифеев А.И., Шамин Д.В., Казначеев А.М. Эффективность гуминовых препаратов на посевах яровых зерновых культур // Вестн. КурскГСХА. 2008. № 3. С. 12–14.
10. Исхаков Х.А. Гуминовые комплексы // Вестн. КузГТУ. 2010. № 6. С. 126–129.
11. Трефилова Л.В. Использование цианобактерий в агробиотехнологии: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Саратов: ИБФРМ РАН, 2008. 26 с.
12. Домрачева Л.И. Биологическая защита сеянцев от болезней в питомниках // Леса Кировской области / Под ред. Видякина А.И., Ашихминой Т.Я., Новоселовой С.Д. Киров: ОАО "Кировская областная типография", 2008. С. 292–299.
13. Veronesi C., Rickaner M., Fournier J., Pouenat M.-L., Esquerre-Tugaye M.-T. Lipoxygenase gene expression in the Tobacco-*Phytophthora parasitica nicotianae* interaction // Plant Physiol. 1996. V. 112. P. 997–1004.
14. Владимиров Ю.А. Биологические мембраны и незапланированная смерть клетки // Сорос. образ. журн. 1999. Т. 6. № 9. С. 2–9.
15. Владимиров Ю.А. Свободные радикалы в биологических системах // Сорос. образ. журн. 1999. Т. 6. № 12. С. 13–19.
16. Горностаева Е.А., Фокина А.И., Лантев Д.С. Влияние ионов меди (II) на биофлуоресценцию почвенных цианобактерий // Мат-лы Всерос. конф. "Адаптационные реакции живых систем на стрессорные воздействия". Киров, 2012. С. 114–120.
17. Коваль Е.В., Огородникова С.Ю. Влияние цианобактерии *Nostoc linckia* на показатели жизнедеятельности растений ячменя, выращенных в модельных опытах в присутствии метилфосфоновой кислоты // Агрохимия. 2014. № 12. С. 65–70.
18. Домрачева Л.И., Кондакова Л.В., Ашихмина Т.Я. Применение тетразольно-топографического метода определения гидрогеназной активности цианобактерий в загрязненных средах // Теор. и прикл. экол. 2008. № 2. С. 23–28.
19. Rogers S.L., Burns R.G. Changes in aggregate stability, nutrient status, indigenous microbial populations, and seedling emergence, following inoculation of soil with *Nostoc muscorum* // Biol. Fertil. Soil. 1994. V. 18. № 3. P. 209–215.
20. Cameron R.E. Communities of soil algae occurring in the sonoran desert in Arizona // J. Arizona Acad. Sci. 1960. V. 1. № 3. P. 85–88.
21. Губанов И.А. *Hordeum vulgare* L. — ячмень обыкновенный // Иллюстрированный определитель растений Средней России в 3 т. М.: Тов-во науч. изд. КМК, Ин-т технолог. исслед., 2002. 259 с.
22. Голлербах М.М., Штина Э.А. Почвенные водоросли. Л.: Наука, 1969. 228 с.
23. Горностаева Е.А., Фокина А.И., Кондакова Л.В., Огородникова С.Ю., Домрачева Л.И., Лантев Д.С., Сластикова Е.М. Потенциал природных биопленок *Nostoc commune* как сорбентов тяжелых металлов в водной среде // Вода: химия и экология. 2013. С. 93–101.
24. Нетрусов А.И. Практикум по микробиологии: учеб. пособие для студ. высш. уч. завед. М.: Издат. дом "Академия", 2005. 608 с.

25. Лукаткин А.С. Холодовое повреждение теплолюбивых растений и окислительный стресс. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2002. 208 с.
26. Муравьева Д.А., Бубенчикова В.Н., Беликов В.В. Спектрофотометрическое определение суммы антоцианов в цветках василька синего // Фармация. 1987. № 5. С. 28–29.
27. Шлык А.А. Определение хлорофиллов и каротиноидов в экстрактах зеленых листьев // Биохимические методы в физиологии растений / Под ред. Павлиновой О.А. М.: Наука, 1971. С. 154–170.
28. Маслова Т.Г., Попова И.А., Попова О.Ф. Критическая оценка спектрофотометрического метода количественного определения каротиноидов // Физиология растений. 1986. Т. 39. Вып. 6. С. 615–619.
29. Aminot A., Rey F. Standard procedure for the determination of chlorophyll a by spectroscopic methods. Denmark, Copenhagen: ICES Tech-niques in Marine Environmental Sciences, 2000. 25 p.
30. Лакин Г. Ф. Биометрия. М.: Высш. шк., 1973. 343 с.
31. Blokhina O., Virolainen E., Fagerstedt K.V. Antioxidants, oxidative damage and oxygen deprivation stress: a review // Annal. Bot. 2003. V. 91. P. 179–194.
32. Лелевич В.В. Биологическая химия. Гродно: ГрГМУ, 2009. 275 с.
33. Домрачева Л.И., Кондакова Л.В., Пегушина О.А., Фокина А.И. Биопленки *Nostoc commune* – особая микробная сфера // Теор. и прикл. экол. 2007. № 1. С. 15–20.
34. Панкратова Е.М., Трефилова Л.В., Зяблых Р.Ю., Устюжанин И.А. Цианобактерия *Nostoc paludosum* Kutz как основа для создания агрономически полезных микробных ассоциаций на примере бактерий рода *Rhizobium* // Микробиология. 2008. Т. 77. № 2. С. 266–272.
35. Коваль Е.В., Огородникова С.Ю. Влияние цианобактерии *Nostoc muscorum* на устойчивость растений ячменя к действию метилфосфоновой кислоты // Теор. и прикл. экол. 2014. № 2. С. 61–66.
36. Storme J.Y., Golubic S., Wilmotte A. Raman characterization of the UV-protective pigment gloeocapsin and its role in the survival of Cyanobacteria // Astrobiology. 2015. V. 10. P. 843–857.
37. Schagerl M., Muller B. Acclimation of chlorophyll a and carotenoid levels to different irradiances in four freshwater // J. Plant Physiol. 2006. V. 163. P. 709–716.
38. Latifi A., Ruiz M., Zhang Ch.-C. Oxidative stress in cyanobacteria // FEMS Microbiol. Rev. 2009. V. 33. P. 258–278.
39. Singh D.P., Prabha R., Meena K.K. Induced accumulation of polyphenolics and flavonoids in cyanobacteria under salt stress protects organisms through enhanced antioxidant activity // Am. J. Plant Sci. 2014. V. 5. P. 726–735.
40. Огородникова С.Ю. Эффекты лигноумата на фитотоксичность фосфорсодержащих соединений (модельные опыты) // Вестн. НижневартговскГУ. 2020. № 1. С. 60–68.

Investigation Of The Influence Of Cyanobacteria And Lignohumate On The Life Of Barley Plants

E. V. Koval^{a,*} and S. Yu. Ogorodnikova^{a,b}

^a Northern Trans-Ural State Agricultural University
ul. Respublicy 7, Tyumen 625003, Russia

^b Institute of Biology of the Komi Scientific Center, Ural Branch of the RAS
Kommunisticheskaya ul. 28, Syktyvkar 167982, Russia

^{*}E-mail: undina2-10@yandex.ru

It was studied the humic preparation Lignohumate (LH) effect on cyanobacteria (CB) and natural biofilms with a predominance of CB, as well as their combined effect on the barley plants vital activity. It was found that biofilms and *N. muscorum* are more resistant to the action of LH. High sensitivity to LH is characteristic of *N. linckia* and *N. paludosum*, which was manifested in the activation of lipid peroxidation processes in cells and a decrease in the level of chlorophyll a. Pre-sowing seed treatment of *N. muscorum* enhanced the protective properties of LH: a decrease in the intensity of LPO processes in the leaves and the accumulation of anthocyanins and carotenoids were noted. The phytostimulating effect of *N. muscorum* CB and LH was manifested in an increase in the growth of shoots and roots of barley.

Key words: Lignohumate, cyanobacteria, barley, plastid pigments, growth stimulants, malondialdehyde, anthocyanins.

УДК 631.811.3:631.582:631.559:633.31

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ФИТОМАССЫ РАЗЛИЧНЫХ ПРЕДШЕСТВЕННИКОВ И СОДЕРЖАНИЯ В НЕЙ КАЛИЯ НА УРОЖАЙНОСТЬ ЛЮЦЕРНЫ

© 2021 г. Е. Н. Пакина^{1,*}, Г. Н. Гасанов², Т. А. Асварова²

¹ Российский университет дружбы народов
117198 Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6, Россия

² Прикаспийский институт биологических ресурсов Дагестанского федерального исследовательского центра РАН
367000 Махачкала, ул. М. Гаджиева, 45, Россия

*E-mail: pakina_en@pfur.ru

Поступила в редакцию 18.05.2020 г.

После доработки 29.10.2020 г.

Принята к публикации 11.03.2021 г.

Исследованы объемы накопления предшественниками общей и оставляемой в почве после уборки урожая фитомассы, концентрация и запасы калия в них и влияние перечисленных факторов на урожайность люцерны, выращиваемой на сено. Установлено, что недостатком пропашных предшественников является ухудшение качества подготовки почвы к посеву, снижение полевой всхожести семян и увеличение засоренности посевов люцерны в год посева в первом укосе. Это является следствием сохранения на поверхности почвы послеуборочных остатков растений. Лучшим предшественником люцерны был естественный фитоценоз, формируемый пожнивом после уборки урожая озимой пшеницы и используемый на зеленое удобрение. Он накапливал в почве дополнительно зеленой массы 5.5 т/га, содержащей 52.7 кг K₂O/га, концентрация элемента в сухой фитомассе составляла 1.33%, в пожнивных остатках — 0.85, в корневых остатках — 0.72%. При запашке этой массы на зеленое удобрение урожайность сена люцерны по сравнению с контролем повышалась на 19.1%, при использовании фитомассы на корм скоту — на 7.9%, по сравнению с предшественниками кукурузой на зерно и подсолнечником на семена — соответственно на 30.1 и 36.7%.

Ключевые слова: люцерна, предшественники, запасы фитомассы, пожвные остатки, корневые остатки, агрофизические свойства, содержание калия, запасы калия, урожайность.

DOI: 10.31857/S0002188121060107

ВВЕДЕНИЕ

В земледельческой практике сельскохозяйственных предприятий Западного Прикаспия люцерну в севооборотах размещают только после поздно убираемых предшественников: кукурузы на зерно и подсолнечника на семена. Объясняется это тем, что лучшими предшественниками ведущей зерновой культуры — озимой пшеницы являются те, которые рано освобождают поля. В структуре посевных площадей региона озимая пшеница занимает более 60%. Ее размещение после указанных выше поздно убираемых предшественников сопряжено с неудовлетворительным качеством обработки почвы и резким снижением урожайности озимой пшеницы. Поэтому на долю яровых культур, таких как люцерна, достаются поздно убираемые предшественники: кукуруза на зерно, подсолнечник, корнеплоды. Такой принцип размещения культур в полевых севооборотах счита-

ется оправданным, поскольку люцерна, как и другие яровые культуры (кроме подсолнечника), после указанных предшественников практически не снижает урожайность [1]. Исследования по подбору предшественников люцерны в рассматриваемых условиях ранее не проводили.

Но имеются сведения о том, что в районах орошаемого земледелия юга нашей страны посев люцерны можно проводить в самые разные сроки — от ранней весны до осени. Чаще всего рассматривают 3 срока посева: весенний, поукосный и поживной [2–4]. Если при весеннем посеве целесообразность ее размещения после поздно убираемых предшественников сомнений не вызывает, то в поукосном посеве ее предшественниками могут быть озимые промежуточные культуры (мятликовые и бобово-мятликовые кормовые смеси), а при поживном — озимые зерновые. С учетом этого необходимость исследования предшественников

люцерны становится очевидным. В зоне проведения настоящего исследования сравнивали продуктивность звеньев севооборота с августовским и мартовским сроками посева люцерны, размещаемой после озимой пшеницы и пожнивной кукурузы на силос. Более продуктивным оказалось звено, в котором люцерну размещали после пожливной кукурузы на силос, а посев проводили рано весной [5, 6].

В условиях ухудшившегося, начиная с 1980-х гг. прошлого века, финансового и материально-технического положения сельскохозяйственные предприятия орошаемых районов не только не могут получить 2-й урожай с одной и той же площади за счет пожнивных культур, но и полностью использовать имеющуюся пашню. Исследования, проведенные в этом же регионе [4, 5], показали, что альтернативой пожнивным сеянным культурам является предоставление возможности сорно-полевой растительности (естественному фитоценозу) функционировать во второй половине лета [7–9]. Достигается это за счет полива, который проводят на 2-е–3-и сут после уборки озимой пшеницы, полученный урожай естественного фитоценоза (16–19 т зеленой массы/га), можно использовать на корм животным или на зеленое удобрение. Это позволяет пополнить запасы органической массы и питательных элементов в почве. Однако в этих исследованиях остались не разработанными вопросы об эффективности естественного фитоценоза по сравнению с другими предшественниками люцерны и химического состава надземной и подземной массы.

Цель работы — выявление эффективности наиболее часто используемых пропашных предшественников люцерны и поживного естественного фитоценоза, используемого на корм и сидерацию, определение накопления калия в различных блоках растительного вещества.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В полевом опыте на лугово-каштановой тяжелосуглинистой почве опытного участка в КФХ “Бикеша” в Тарумовском р-не Республики Дагестан изучали следующие предшественники люцерны, варианты: 1 — озимая пшеница (контроль), 2, 3 — естественный фитоценоз на зеленое удобрение и зеленый корм поживно после уборки озимой пшеницы, 4 — кукуруза на зерно, 5 — подсолнечник на семена. Исследована динамика агрофизических свойств почвы: плотность, пористость, структурно-агрегатный состав, содержание водопрочных агрегатов [10]. Учитывали также суммарную и не отчужденную из почвы при

уборке урожая предшественников растительную массу [11], содержание химических элементов в разных блоках растительного вещества и в почве [12, 13], учитывали засоренность посевов люцерны [11]. Площадь учетной делянки — 100 м², повторность четырехкратная. При статистической обработке биометрических данных учитывали отклонение от среднего, стандартное отклонение (*S*) и коэффициент вариации (*V*), данные урожайности обрабатывали методом дисперсионного анализа [14].

Фитомассу сорно-полевой растительности на зеленое удобрение и на корм убирали в 2 срока: в конце августа и во 2-й декаде октября (соответственно 1-й и 2-й укосы). Обработку почвы после уборки предшественников в вариантах 1, 4 и 5 проводили по полупаровой системе, которая заключалась в лущении стерни, вспашке на глубину 30–32 см, выравнивании предпосевным выравнивателем, поливе во 2-й декаде сентября. Под вспашку вносили Р_{сг}40, при посеве с семенами — Р_{сг}10, под предпосевное боронование — N_{аа}30, в подкормку в начале весенней вегетации — N_{аа}30. Калийные удобрения не вносили, они не рекомендованы в рассмотренных условиях, учитывая достаточное количество обменной формы калия в почвах. Предпосевную обработку проводили зубковыми боровами БЗСТ-1, посев люцерны — зернотравяной сеялкой СЗТ-3,6 в первой декаде марта. В вариантах 2 и 3 освободившееся после озимой пшеницы поле на 2-е–3-и сут поливали водой 1000 м³/га. В остальном технология выращивания люцерны соответствовала рекомендации для этой зоны.

В опыте использовали следующие сорта культур: озимая пшеница — Гром, подсолнечник — ВНИИМК-100, кукуруза — гибрид РОСС-299, люцерна — Кизлярская синегибридная.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Предшественники люцерны по-разному влияли на агрофизические свойства почвы. Озимая пшеница и естественный фитоценоз, сформированный в поживной период, не оказывали отрицательного влияния на плотность, пористость почвы, ее структуру и содержание водопрочных агрегатов, показатели которых в обрабатываемом слое мало менялись: соответственно 1.22–1.23 г/см³, 53.0–53.4%, 56.1–56.2% и 34.2–34.9%. Воздействие 2-х других предшественников — кукурузы и подсолнечника — можно рассматривать как неблагоприятное для качественной обработки почвы под следующую культуру. Плотность почвы в слое 0–30 см после

уборки этих культур была выше, чем в среднем после 3-х предшественников озимой пшеницы, на 12.2%, пористость — на 5.9% содержание наиболее ценных структурных агрегатов (0.25–10.0 мм) — на 17.4%, водопрочных агрегатов — на 8.4%.

Судя по этим показателям, пропашные культуры следует рассматривать как худшие из предшественников, поскольку при подготовке почвы к посеву после них не может быть достигнута ее качественная разделка, что может привести к существенному снижению полевой всхожести семян, густоты посева и его засоренности [1]. Но это положение, справедливое в отношении озимых культур, не оправдывается применительно к яровым, поскольку в результате промерзания зимой и оттаивания весной почва приобретает состояние, выровненное по влажности, плотности и структурному состоянию. Поэтому посев люцерны проводили после двукратного боронования зубowymi боровами. Степень крошения почвы после непропашных предшественников соответствовала отличному (97–98%), после пропашных — хорошему (92–94%) состоянию, и по этой причине предпосевная культивация зяби не потребовалась.

Однако пропашным предшественникам оказался присущ один существенный недостаток: сохранение на поверхности почвы определенного количества послеуборочных остатков в виде нижних частей стеблей с корнями. Их насчитывалось 3–4 экз./м², длиной 12–15 см, несмотря на то что часть из них была собрана при предпосевной обработке почвы. Сошники сеялки при встрече с ними делали просевы, оставляя незасеянными 10–12% площади поля. Это приводило к снижению полевой всхожести семян люцерны до 35.3–36.2%, в то время как после 3-х остальных предшественников (озимой пшеницы и естественного фитоценоза) она составила 59.7–61.0%. Свободную часть площади занимали сорные травы, увеличивая засоренность фитомассы в первом укосе до 62–65 стеблей/м², в то время как в вариантах 1–3 их было меньше в 4.1–4.3 раза.

Недостатком пропашных предшественников люцерны было также то, что они оставляли в почве минимальное количество биомассы, уступающее контролю на 16.3 и 18.8%. Но и в контроле были получены не лучшие показатели биомассы оставленных в почве пожнивных и корневых остатков. Наибольшее количество их, превышающие контроль в 2.4 раза, накапливалось в варианте с пожновым фитоценозом на зеленое удобрение после озимой пшеницы, вторую позицию занимал тот же фитоценоз на корм скоту — его

биомасса была больше на 94.6% по сравнению с контролем. Соответственно увеличивались и запасы К₂О в почве: в 2.4 раза и на 76.3% по сравнению с контролем (табл. 1).

Однако после пропашных предшественников запасы оставляемой в почве растительной массы не соответствовали содержанию К₂О в них. В растительных остатках кукурузы их содержалось больше на 21.6%, чем в контроле, подсолнечника — на 30.6%. Это единственное положительное качество пропашных предшественников люцерны по сравнению с ее посевами после озимой пшеницы. Объясняется оно более высокой концентрацией калия в фитомассе кукурузы и подсолнечника (табл. 2). Например, в листостебельной массе кукурузы и подсолнечника концентрация К₂О превышала такой же показатель в соломе озимой пшеницы на 32.8 и 50.8%, в пожновых остатках — соответственно на 31.6 и 56.4, в корневых остатках — на 10.5 и 33.0% соответственно.

При уборке предшественников наблюдали незначительные отклонения в содержании обменного калия в слое 0–30 см почвы: 307 мг — после пропашных, 320 мг/100 г — после озимой пшеницы. В фазе ветвления люцерны содержание обменного калия увеличилось в среднем во всех вариантах на 10.5% (349 мг против 316 мг/100 г в контроле), после естественного фитоценоза на зеленый корм увеличилось по отношению к контролю на 8.7%, в вариантах с пропашными предшественниками оно снизилось на 2.0%. В период проведения 1-го укоса содержание обменного калия в вариантах 2 и 3 увеличилось соответственно до 9.4 и 4.6%, что возможно было вызвано разложением запаханной фитомассы, в том числе и пожновно-корневых остатков, которых в указанных вариантах было больше, чем после остальных предшественников. Эти данные лишь косвенно свидетельствовали об улучшении калийного режима почвы в вариантах, где предшественником люцерны был естественный фитоценоз на зеленое удобрение или на зеленый корм. Более объективную оценку можно дать при учете накопления предшественниками биомассы, в том числе не отчуждаемой из почвы.

Предшественники люцерны, обеспечившие высокую полевую всхожесть семян и снижение засоренности посевов, способствовали достижению более высокой продуктивности люцерны (табл. 3). В первый год ее использования в вариантах естественного фитоценоза на зеленое удобрение и корм скоту, а также после озимой пшеницы получены близкие показатели числа растений люцерны на единице площади (в среднем 323 экз./м²),

Таблица 1. Накопление надземной и подземной биомассы предшественниками озимой пшеницы и запасы питательных элементов в ней (2012–2014 гг.)

Предшественник, № варианта*	Основная культура					Пожнивный естественный фитоценоз				Всего накоп-лено	В том числе не отчуждаемой из почвы	
	зерно	солома, листосте-бельная масса, сено	остатки фитомассы		всего	зеленая масса	остатки		всего		т/га	% к контролю
			пожнив-ные	корне-вые			поукос-ные	корне-вые				
Накопление фитомассы, т/га												
1	3.15	2.21	0.86	3.18	9.40	0.0	0.0	0.0	0.0	9.40	4.04	100
2	3.20	2.24	0.85	3.02	9.31	1.88	0.68	3.19	5.75	15.1	9.62	238
3	3.17	2.19	0.86	3.12	9.34	1.87	0.66	3.22	5.75	15.1	7.86	195
4	5.67	11.2	0.82	2.56	20.2	0.0	0.0	0.0	0.0	20.2	3.38	83.7
5	2.25	5.46	0.80	2.48	12.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.0	3.28	81.2
Запасы K ₂ O, кг/га												
1	35.3	26.5	9.46	28.3	99.6	0	0	0	0	99.6	37.8	100
2	38.4	27.6	8.58	28.1	103	25.0	5.78	23.0	53.8	156	90.4	240
3	38.0	23.0	8.60	29.5	99.2	24.7	5.85	21.6	52.1	151	65.6	174
4	64.1	181	10.9	27.1	283	0	0	0	0	283	38.1	101
5	43.9	107	12.6	30.0	194	0	0	0	0	194	42.7	113

*Варианты: 1 — озимая пшеница (3 года бессменного посева) — контроль, 2 — озимая пшеница 2-х лет бессменного посева + естественный фитоценоз на зеленое удобрение, 3 — озимая пшеница 2-х лет бессменного посева + естественный фитоценоз на корм, 4 — кукуруза на зерно, 5 — подсолнечник на семена. То же в табл. 2, 3.

Таблица 2. Содержание K₂O в надземной и подземной биомассе предшественников люцерны (2012–2014 гг.), %

Продукция	Предшественник, № варианта*														
	1			2			3			4			5		
	$M \pm m$	S	$V, \%$	$M \pm m$	S	$V, \%$	$M \pm m$	S	$V, \%$	$M \pm m$	S	$V, \%$	$M \pm m$	S	$V, \%$
Основная продукция															
Основная	1.12 ± 0.03	0.07	6.25	1.20 ± 0.02	0.05	4.16	1.20 ± 0.03	0.06	5.00	1.13 ± 0.02	0.05	4.42	1.95 ± 0.01	0.02	1.03
Побочная	1.20 ± 0.02	0.05	4.16	1.23 ± 0.01	0.03	2.44	1.23 ± 0.02	0.04	3.25	1.62 ± 0.02	0.04	2.47	1.84 ± 0.01	0.03	1.63
Пожнивные остатки	1.01 ± 0.01	0.03	2.97	1.01 ± 0.02	0.04	3.96	1.01 ± 0.02	0.05	4.95	1.33 ± 0.02	0.05	3.76	1.58 ± 0.01	0.03	1.90
Корневые остатки	0.89 ± 0.01	0.03	3.37	0.93 ± 0.02	0.05	5.37	0.90 ± 0.02	0.04	4.44	1.06 ± 0.01	0.02	1.88	1.21 ± 0.02	0.04	3.30
Пожнивная культура (естественный фитоценоз)															
Фитомасса (в переводе на сено)	0	0	0	1.33 ± 0.02	0.05	3.76	1.32 ± 0.02	0.04	3.03		0	0	0	0	0
Пожнивные остатки	0	0	0	0.85 ± 0.02	0.04	4.70	0.86 ± 0.02	0.05	5.81		0	0	0	0	0
Корневые остатки	0	0	0	0.72 ± 0.02	0.04	5.55	0.70 ± 0.01	0.03	4.28	0.	0	0	0	0	0

Таблица 3. Урожайность люцерны 1-го и 2-го года использования в зависимости от предшественника (2012–2014 гг.)

Предшественник, № варианта*	Люцерна 1-го года, укос					Люцерна 2-го года, укос					Всего за 2 года, т/га сена
	1-й	2-й	3-й	4-й	всего	1-й	2-й	3-й	4-й	всего	
	т сена/га										
1	3.48	2.52	1.97	0.74	8.71	5.15	3.92	2.78	0.96	12.81	21.52
2	3.39	2.74	2.11	1.30	9.54	6.48	4.80	3.43	1.39	16.10	25.64
3	3.53	2.48	2.24	0.70	8.95	5.68	4.36	3.16	1.08	14.28	23.23
4	2.84	2.08	1.61	0.54	7.07	4.97	3.77	2.64	1.14	12.52	19.59
5	2.75	1.96	1.38	0.66	6.75	5.08	3.83	2.87	1.05	12.83	19.58
<i>НСР</i> ₀₅	0.14	0.12	0.12	0.10		0.21	0.13	0.17	0.08		

количества продуктивных побегов — 432 экз./м² и массе 10-ти побегов — 21.2 г. Урожайность сена в среднем за 4 укоса составила 9.0 т/га. После кукурузы и подсолнечника эти показатели были меньше, чем после 3-х первых предшественников соответственно на 46.0, 22.9, 3.3 и 23.3%.

В посевах люцерны 2-го года использования количество растений уменьшилось в основном в результате вымокания растений при поливах и гибели их в пониженных элементах рельефа. Густота стояния люцерны снизилась одинаково после всех предшественников на 6.3–6.5%, зато по сравнению с первым годом увеличилось число продуктивных побегов в вариантах 3-х первых предшественников на 33.7, в вариантах пропашных предшественников — на 47.3%, возросли масса 10 побегов соответственно на 16.5 и 25.4%, урожайность сена — в 2.6 и 2.9 раза.

Таким образом, показано, что лучшим предшественником люцерны был естественный фитоценоз, сформированный в пожнивной период, зеленую массу которого использовали на сидерацию или на корм. Урожайность трав при этом повышалась по сравнению с контролем соответственно на 19.1 и 7.9%, после кукурузы и подсолнечника — снижалась на 8.8–9.8%.

С учетом полученных результатов районы орошаемого земледелия Западного Прикаспия могут проектировать зернотравяные севообороты с короткой ротацией, до 75% насыщенные озимой пшеницей при следующем чередовании культур: 1 — люцерна (выводное поле), 2 — 3 — 4 — озимая пшеница, где в пожнивной период ежегодно выращивают естественный фитоценоз на зеленое удобрение или на корм скоту. Хозяйства (крестьянско-фермерские, СПК и др.), имеющие небольшие площади пашни, ограниченный набор технических средств, такие севообороты могут взять за основу ведения аграрного производства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, наибольшую урожайность сена люцерны в районах орошаемого земледелия Западного Прикаспия можно получить при размещении ее посевов после пожнивного естественного фитоценоза, формируемого после уборки озимой пшеницы и используемого на зеленое удобрение или на корм скоту.

По своему влиянию на агрофизические показатели плодородия почвы исследованные предшественники не отличались друг от друга. Недостатком пропашных предшественников было снижение полевой всхожести семян и высокая засоренность посевов люцерны в первом укосе как следствие сохранения послеуборочных остатков на поверхности почвы после вспашки и ухудшения качества предпосевной обработки почвы и посева.

Естественный фитоценоз, сформированный после уборки урожая озимой пшеницы на зеленый корм или зеленое удобрение, позволил получить на 5.6 и 3.9 т/га больше не отчуждаемой из почвы растительной массы по сравнению с контролем и на 66.2 и 57.7%, чем после пропашных предшественников. Значительно увеличивалось и поступление в почву K₂O с растительной массой: в 2.4 раза в варианте с естественным фитоценозом на сидерацию и в 1.7 раза — в варианте на зеленый корм. Несмотря на то что после пропашных предшественников в почве оставалось меньше растительных остатков, количество K₂O с этой массой поступало не меньше (предшественник кукуруза) или больше на 13.3% (предшественник подсолнечник), чем в контроле. Вызвано это было тем, что количество этого элемента в листовых массе кукурузы было больше, чем в соломе озимой пшеницы, на 32.8%, в пожнивных остатках — на 31.6, в корневых остатках — на 10.5%. После подсолнечника эти показатели были еще больше: соответственно 50.8, 56.4 и 33.0%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гасанов Г.Н. Роль полевых культур и севооборотов в формировании почвенного плодородия // Почвенные ресурсы Дагестана, их охрана и рациональное использование / Под ред. Гасанова Г.Н., Баламирзоева М.А. Махачкала: МСХ Республики Дагестан, 1998. С. 164–183.
2. Медведев Г.А. Многолетние травы при орошении. М.: Росагропромиздат, 1989. 175 с.
3. Снеговой В.С., Важов В.М. Продуктивность люцерны в агроценозе. Кишинева: Штиинца, 1989. 195 с.
4. Рекомендации по технологии возделывания люцерны на корм в Ставропольском крае. СтавропольНИИСХ, СтавропольНИИГиМ. Ставрополь, 1984. 52 с.
5. Гасанов Г.Н., Давудов М.Д., Салихов С.А. Факторы формирования высокопродуктивного фитоценоза с люцерной на орошаемых условиях Терско-Сулакской подпровинции // Вестн. РАСХН. 2012. № 5. С. 52–55.
6. Гасанов Г.Н., Давудов М.Д., Аджиев Ас.М. Эффективность летних и весенних сроков посева люцерны при орошении в зависимости от предшественников // Пробл. развития АПК региона. 2012. № 4. С. 27–31.
7. Абдуллаев Ж.Н., Магомедов Н.Р., Гасанов Г.Н., Бексултанов А.А. Продуктивность пожнивных культур в сравнении с естественным фитоценозом в Приморской подпровинции Дагестана // Пробл. развития АПК региона. 2012. № 1 (9). С. 4–7.
8. Гасанов Г.Н., Арсланов М.А. Сорняку в агроценозах можно найти разумное применение // Аграр. Россия. 2016. № 11. С. 18–22.
9. Гасанов Г.Н., Арсланов М.А. О системах содержания почв в ирригационных агроландшафтах и их классификации // Земледелие. 2017. № 1. С. 21–24.
10. Васильев И.П., Тулинов А.М., Баздырев Г.И. Методы изучения физических и физико-механических свойств почвы // Практикум по земледелию. М.: КолосС, 2004. С. 16–47.
11. Методические указания по проведению полевых опытов с кормовыми культурами. М.: ВНИИК, 1987. 198 с.
12. ГОСТ 26205-91. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Мачигина в модификации ЦИНАО.
13. ГОСТ 13496.4-93. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения содержания азота и сырого протеина.
14. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.

Influence of the Size of the Phytomass of Various Precursors and the Content of Potassium in It on the Yield of Alfalfa

E. N. Pakina^{a, #}, G. N. Hasanov^b, and T. A. Asvarova^b

^a Russian Peoples' Friendship University
ul. Miklukho-Maklaya 6, Moscow 117198, Russia

^b Caspian Institute of Biological Resources of the Dagestan Federal Research Center of the RAS
ul. M. Gadzhieva 45, Makhachkala 367000, Russia

[#]E-mail: pakina_en@pfur.ru

The volume of accumulation by the precursors of the total and remaining phytomass in the soil after harvesting, the concentration and reserves of potassium in them and the influence of these factors on the yield of alfalfa grown for hay were studied. It is established that the disadvantage of rowed predecessors is a deterioration in the quality of soil preparation for sowing, a decrease in the field germination of seeds and an increase in the infestation of alfalfa crops in the year of sowing in the first mowing. This is a consequence of the preservation of post-harvest plant residues on the soil surface. The best precursor of alfalfa was a natural phytocenosis, formed by stubble after harvesting winter wheat and used for green fertilizer. It accumulated in the soil an additional green mass of 5.5 t/ha, containing 52.7 kg K₂O/ha, the concentration of the element in the dry phytomass was 1.33%, in the crop residues – 0.85, in the root residues – 0.72%. When plowing this mass for green fertilizer, the yield of alfalfa hay increased by 19.1% compared to the control, when using phytomass for livestock feed – by 7.9%, compared with its predecessors corn for grain and sunflower for seeds – by 30.1 and 36.7%, respectively.

Key words: alfalfa, precursors, phytomass reserves, crop residues, root residues, agrophysical properties, potassium content, potassium reserves, yield.

УДК 546.56:633.16

ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ МЕДИ НА ПРОРОСТКИ СОРТОВ ЯРОВОГО ДВУРЯДНОГО ЯЧМЕНЯ (*Hordeum vulgare* L.) РАЗЛИЧНОГО ГЕОГРАФИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

© 2021 г. А. В. Дикарев¹ *, В. Г. Дикарев¹, Н. С. Дикарева¹¹ Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии
249032 Обнинск, Калужская обл., Киевское шоссе, 109 км, Россия

*E-mail: ar.djuna@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.01.2020 г.

После доработки 25.03.2020 г.

Принята к публикации 11.03.2021 г.

Исследовано воздействие тяжелого металла (ТМ) — меди на проростки нескольких сортов ярового ячменя различного географического происхождения. Оценивали морфометрические параметры растений — длину проростка и корня, количество всхожих семян и сильных проростков. Отмечено подавление развития проростков по мере увеличения концентрации ТМ, возникновение морфологических аномалий корней. На основе полученных данных сделаны выводы о критической дозе Cu^{2+} , вызывающей значимое, но не летальное угнетение указанных параметров, выявлены сорта, обладающие повышенной устойчивостью или чувствительностью к данному ТМ. Для раскрытия механизмов формирования показанных эффектов был проведен цитогенетический анализ клеток апикальной меристемы корней проростков одного из использованных сортов. По мере роста дозы Cu^{2+} отмечено нарастание частоты aberrантных клеток и возникновение цитогенетических аномалий, главным образом связанных с повреждением аппарата веретена деления. Сделаны выводы о механизмах формирования ответа растительного организма на действие повреждающих агентов химической природы на примере меди, определена критическая доза этого ТМ, пригодная для дифференциации сортов ячменя по их устойчивости.

Ключевые слова: медь, морфометрические и цитогенетические параметры, устойчивость к тяжелым металлам, яровой двурядный ячмень.

DOI: 10.31857/S000218812106003X

ВВЕДЕНИЕ

Между всеми циркулирующими в биосфере химическими элементами имеется некое соотношение, обеспечивающее нормальное функционирование экосистем в течение неограниченного времени. Однако деятельность человека ведет к нарушению этого соотношения за счет истощения одних элементов и избыточного накопления других. Например, в процессе добычи полиметаллических руд, в которых совместно встречаются такие элементы, как медь, свинец, кадмий, никель, цинк, происходит их неизбежное накопление в окружающей среде [1, 2]. Накапливаясь в почвах сельскохозяйственных угодий, соединения этих металлов оказывают токсическое воздействие на возделываемые в этих условиях культуры, ограничивая их продуктивность и создавая потенциальную угрозу для здоровья человека и домашних животных. Помимо этого, дополнительно способствует накоплению в почвах токсич-

ных соединений также и внесение минеральных удобрений (фосфатные удобрения могут содержать тяжелые металлы), а также использование для полива промышленных сточных вод [2, 3]. Все эти процессы, ведущие к увеличению содержания в почвах доступных для растений соединений тяжелых металлов (ТМ), делают весьма актуальной задачу исследования механизмов формирования устойчивости растений к их токсическому действию.

Одним из значимых представителей группы ТМ является медь. Данный металл может быть и микроэлементом, необходимым для нормального функционирования растительного организма. Ионы Cu^{2+} входят в состав ряда важных белков, участвующих в различных жизненных процессах, например, пластоцианинов, Cu/Zn -супероксиддисмутазы, цитохром С-оксидазы, лакказы, аминоксидазы, полифенилоксидазы [4, 5]. Медь вовлечена в ряд метаболических процессов, таких

как фотосинтез, дыхание, детоксикация супероксид-радикалов, лигнификация и другие [6]. В то же время в больших количествах медь весьма токсична для растений [7], а вследствие хозяйственной деятельности человека ее содержание в природных и аграрных экосистемах постоянно растет [8]. Основным путем, по которому медь способна проникать в организм растения, является поглощение почвенного раствора через корень.

Учитывая высокое значение для народного хозяйства проблемы загрязнения почв сельскохозяйственных угодий ТМ, становится важной задача глубокого изучения ответа на их воздействие основных групп культурных растений и выведения таких сортов, которые обладали бы повышенной устойчивостью к токсическому стрессу [9, 10]. Подходящим объектом для таких исследований является яровой ячмень (*Hordeum vulgare* L.). Таковым данное растение делают его следующие особенности. Ячмень — однолетник с коротким жизненным циклом, он обладает диплоидным набором из всего лишь 7-ми пар хромосом, легкость в культивировании позволяет выполнять на этом объекте множество разнообразных тестов, разные сорта ячменя обладают широкой вариабельностью физиологических, генетических и морфологических свойств, геном ячменя полностью расшифрован и картирован [11]. Помимо этого, ячмень является одной из важнейших сельскохозяйственных культур, занимая 4-е место по распространению в мире после риса, пшеницы и кукурузы [12]. Его широко возделывают в самых разнообразных почвенно-климатических условиях, и он известен с глубочайшей древности. В связи с этим представляет интерес выполнение такого исследования с использованием сортов ячменя различного географического происхождения, которое позволило бы выявить варианты с повышенной устойчивостью к ТМ, в том числе, к меди. Собранные в его рамках данные могут быть использованы для поиска кандидатных генетических ресурсов в целях селекционной работы, направленной на выведение таких сортов ячменя, которые бы успешно переносили техногенный стресс, и в то же время позволяли получать качественную и безопасную сельскохозяйственную продукцию.

Таким образом, цель работы — определение критической дозы Cu^{2+} в растворе для проростков ячменя по морфометрическим и цитогенетическим показателям на примере нескольких сортов данной культуры различного географического происхождения. Под критической дозой в этом случае понимали такую, которая вызывала существенное угнетение жизненных процессов про-

ростков ячменя и возникновение различных эффектов, наблюдаемых на всех уровнях биологической организации, но еще не была летальной, позволяя растениям относительно нормально развиваться. Помимо этого, важной задачей также являлось выполнение цитогенетического анализа воздействия меди на пролиферативную активность клеток апикальной меристемы корней проростков.

Научной новизной данного исследования явилось то, что впервые была установлена на основе морфометрических и цитогенетических критериев критическая доза Cu^{2+} , пригодная для дифференциации различных сортов ячменя на устойчивые и чувствительные к данному ТМ. Это открывает дорогу для анализа внутривидового полиморфизма этой культуры по ответу растений на токсическое воздействие меди и подбора исходного материала для селекционной работы, направленной на формирование повышенной устойчивости к ТМ.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Выбор сортов для настоящей работы определяли собранные ранее данные [13–15] по исследованию ответа 100 сортов ярового ячменя различного географического происхождения на действие критических концентраций Pb^{2+} и Cd^{2+} . Было интересно выяснить, будут ли сорта ячменя, ранее, с двумя другими ТМ показавшие себя как устойчивые или чувствительные соответственно к кадмию и и/или свинцу сохранять свой статус и для меди. Таким образом, были взяты семена 4-х сортов ярового двурядного ячменя — Симфония (Харьковская обл.), Рек (Югославия), Jelen (Югославия), Местный (Удмуртия). Растения выращивали рулонным методом в сосудах с 300 мл раствора $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ в течение 5-ти сут при 20°C , как рекомендовано в работе [16], в каждом варианте брали по 100 семян. Содержание Cu^{2+} в растворах составляло: 0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35 мг/мл, всего по 8 вариантов для каждого сорта. После завершения указанного срока у проростков оценивали следующие показатели: среднюю длину проростков и корней, число всхожих семян и сильных проростков. Под сильными проростками понимали нормально развитые [16], у которых росток занимал не менее половины coleoptили, а также имелось как минимум 3 корня длиной >5 мм.

Цитогенетический анализ клеток апикальной меристемы корней был выполнен с использованием анафазного метода на проростках сорта Симфония [17, 18]. Семена проращивали рулонным методом в растворах $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ с concentra-

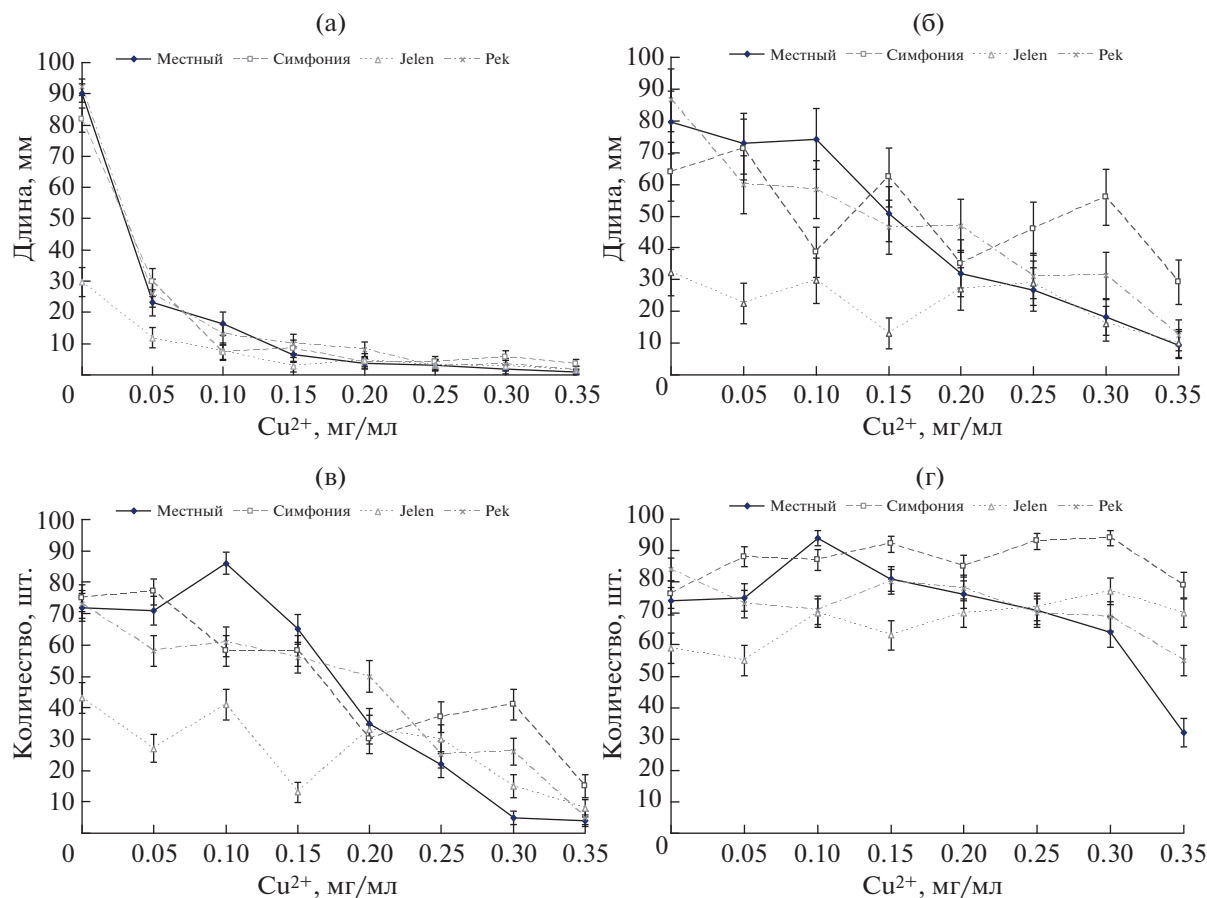


Рис. 1. Влияние разных концентраций меди на проростки 4-х сортов ярового ячменя: (а) — длина корней, (б) — длина проростков, (в) — число сильных проростков, (г) — количество всхожих семян.

циями 0, 0.01, 0.03, 0.07, 0.1 мг/мл. Корни длиной ≈ 10 мм на стадии 1-го митоза фиксировали в фиксаторе Кларка (этанол 95% : ледяная уксусная кислота = 3 : 1). Временные давленные препараты апикальной меристемы корней проростков окрашивали ацетоорсеином и анализировали при увеличении 40×10 на микроскопе “Nikon Eclipse E200” (Япония). В каждом варианте анализировали 6–7 тыс. ана-телофаз. Учитывали частоту (в %) следующих цитогенетических нарушений: мостов, фрагментов, отставаний хромосом, мультиполярных митозов, слипаний хромосом, патологических анафаз, неправильных расхождений хромосом. Для оценки пролиферативной активности клеток апикальной меристемы рассчитывали митотический индекс для 12-ти препаратов. В каждом варианте изучали ≈ 1 –1.5 тыс. клеток. Достоверность собранных данных определяли за счет вычисления оптимального объема выборки, дисперсии, стандартных ошибок и отклонения, доверительного интервала. Расчеты производили в программной среде MS Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ ответа проростков 4-х сортов ячменя на действие диапазона концентраций меди по морфометрическим параметрам дал следующие результаты. Длина корней у всех сортов (рис. 1а) значительно сокращалась уже при минимальной концентрации 0.05 мг Cu^{2+} /мл (до 15–30% от контроля). В дальнейшем уменьшение средних длин корней происходило постепенно до дозы 0.15 мг Cu^{2+} /мл, но далее существенно не менялось. При максимальной дозе 0.35 мг Cu^{2+} /мл корни у большинства проростков практически отсутствовали у всех 4-х сортов. По этому показателю дифференцировать сорта по устойчивости к меди с уверенностью не удалось — изменения показателя во всех случаях находились в пределах ошибки. Только при минимальной концентрации 0.05 мг Cu^{2+} /мл один из сортов (Jelen) имел значимо более меньшую длину корней, чем у других сортов.

Иную закономерность наблюдали для второго из рассмотренных показателей — длины проростков (рис. 1б). В целом отмечено постепенное со-

крашение длины проростков по мере возрастания концентрации ТМ. Для сорта Местный концентрация Cu^{2+} , вызывавшая сокращение в 2 раза рассмотренных показателей, составила 0.2 мг Cu^{2+} /мл. Для сорта Симфония наблюдали синусоидальное изменение величин этого показателя, и в 2 раза он сокращался лишь при максимальной дозе 0.35 мг Cu^{2+} /мл; у сорта Рек тоже отмечены изменения этого показателя, но менее резкие, и сокращение величины показателя в 2 раза наблюдали при концентрации 0.15 мг Cu^{2+} /мл. Интерпретировать данные анализа показателей сорта Jelen оказалось затруднительно, в виду того, что при всех рассмотренных дозах они оказались довольно низкими по сравнению с другими сортами (в том числе в контрольном варианте). Таким образом, по длине проростков удалось выявить разделение испытанных сортов на более или менее устойчивые к действию меди. Наиболее устойчивыми оказались сорта Местный и Симфония, а Jelen продемонстрировал высокую чувствительность к Cu^{2+} . Показатели сорта Рек находились примерно на уровне первых 2-х сортов, но не демонстрировали заметной устойчивости или чувствительности к меди.

По количеству сильных проростков (рис. 1в) также отмечали дифференциацию особенностей ответа исследованных сортов на действие меди. У сорта Местный количество таких проростков не сокращалось до концентрации 0.15 мг Cu^{2+} /мл, более того, при 0.1 мг Cu^{2+} /мл сильных проростков оказалось значимо больше, чем в контрольном варианте. Сокращение количества сильных проростков в 2 раза у этого сорта отмечено лишь при концентрации 0.2 мг Cu^{2+} /мл, далее оно постепенно уменьшалось до дозы 0.3 мг Cu^{2+} /мл и затем уже не менялось при полном угнетении развития растений.

Достаточно устойчивым оказался и сорт Симфония. Сокращение количества сильных проростков под воздействием меди у этого сорта наблюдали с дозы 0.1 мг Cu^{2+} /мл, но оно было не слишком резким. Критическую дозу, вызывавшую сокращение показателя в 2 раза, в данном случае уверенно выявить не удалось, поскольку сокращение этого показателя после концентрации 0.2 мг Cu^{2+} /мл сменялось его постепенным ростом до концентрации 0.3 мг Cu^{2+} /мл. Лишь при максимальной дозе 0.35 мг Cu^{2+} /мл наблюдали угнетение развития проростков. Сорт Рек продемонстрировал более предсказуемый ответ на действие поллютанта. По мере возрастания концентрации меди отмечено постепенное уменьшение величины исследованного показателя, и кри-

тической оказалась доза 0.25 мг Cu^{2+} /мл. Сорт Jelen показал аналогичную с предыдущим показателем (длиной проростков) закономерность: наблюдали изменения этого параметра, но при этом уже при минимальных концентрациях ТМ они были довольно низкими, как и в контроле. Сильных проростков у этого сорта стало в 2 раза меньше, чем в контрольном варианте при концентрации 0.3 мг Cu^{2+} /мл.

Показатель “число всхожих семян” оказался наименее чувствительным к действию меди. У всех изученных сортов наблюдали несущественные изменения этого параметра, в ряде случаев – его рост по сравнению с контрольным вариантом. Даже при максимальной концентрации ТМ (0.35 мг Cu^{2+} /мл) у двух сортов Симфония и Jelen этот параметр был значимо больше контроля. Только сорт Рек показал постепенное уменьшение величины показателя, но при этом отмечены существенные изменения при различных дозах ТМ. Иная закономерность проявилась для сорта Местный, у которого в начале до дозы 0.1 мг Cu^{2+} /мл величина этого показателя возрастала, становясь значимо более высокой, чем в контроле, но затем постепенно уменьшалась. Однако значимо меньше контроля этот показатель для сорта Местный становился только при максимальной концентрации 0.35 мг Cu^{2+} /мл.

Резюмируя полученные при анализе всех дозовых зависимостей данные, можно сказать, что наиболее информативными показателями оказались средняя длина проростков и количество сильных проростков. Два других не позволили выявить отчетливых закономерностей. Относительную устойчивость к токсическому действию меди показали сорта Местный и Симфония, а наиболее чувствительным оказался сорт Jelen.

Вместе с описанными изменениями в морфометрических параметрах воздействие меди провоцировало визуально заметные нарушения морфологии корней проростков (рис. 2): утрату геотропизма некоторых проростков при высоких концентрациях ТМ, изменение цвета с белого на буро-желтый и исчезновение корневых волосков, вздутие кончиков корней, изменение плотности тканей и другие. Аналогичные сообщения об изменениях в морфологии корней под действием ТМ уже неоднократно публиковались ранее [19], и они же были отмечены в нашем исследовании, посвященном влиянию Pb^{2+} на проростки ячменя [13–15].

Чтобы изучить возможные причины формирования рассмотренных в предыдущем эксперименте эффектов, а также чтобы сделать определение

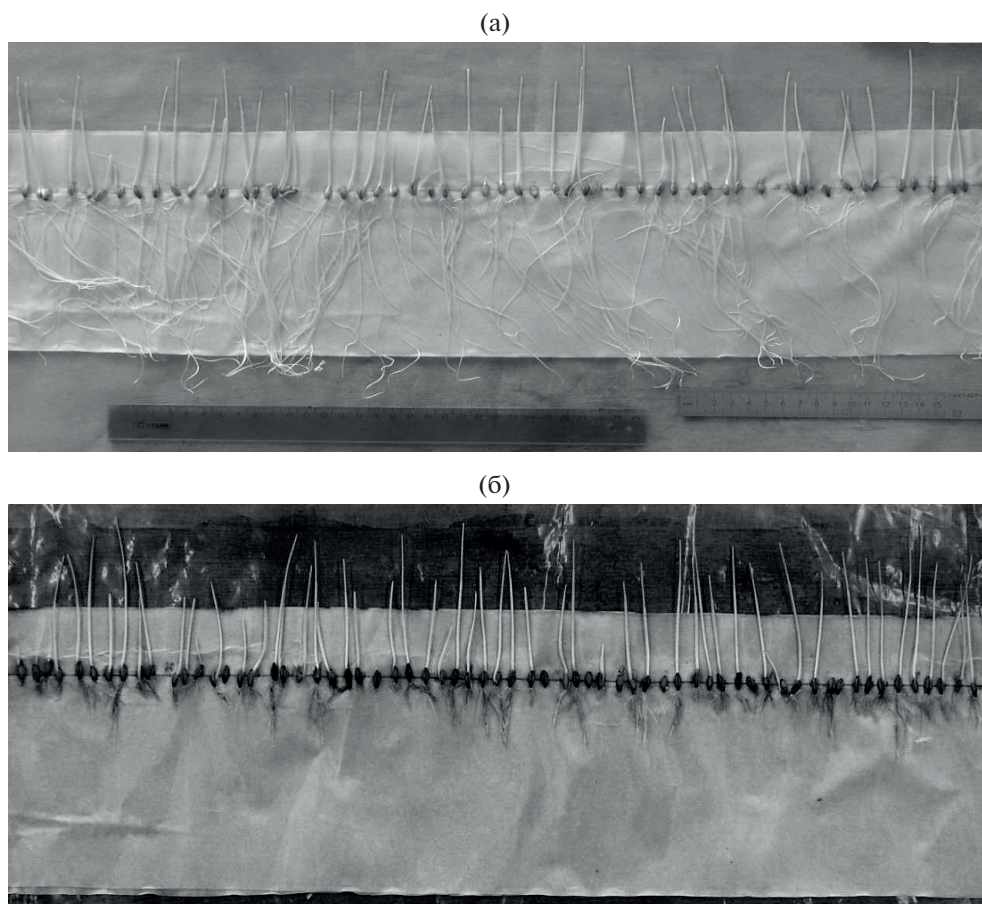


Рис. 2. Изменения морфологии корней 5-суточных проростков ярового ячменя сорта Симфония: (а) — контроль, (б) — $0.15 \text{ мг Cu}^{2+}/\text{мл}$.

критической концентрации Cu^{2+} более точным и комплексным, т.е. учитывающим особенности ответа растительного организма на действие ТМ на разных уровнях организации, был выполнен цитогенетический анализ. Используя такой метод, возможно обнаружить различные нарушения в функционировании живой системы на хромосомном уровне, прежде чем воздействие токсиканта проявится визуально на морфологическом уровне. Были изучены клетки апикальной меристемы проростков сорта Симфония, его выбор для работы был обусловлен тем, что данный сорт проявил себя относительно устойчивым к действию меди, что позволило рассмотреть достаточно широкий диапазон доз поллютанта, проследив постепенное развитие стрессовых эффектов. Кроме того, данный сорт ранее [13–15] также показал свою устойчивость к свинцу и кадмию.

Выявлено, что митотический индекс (МИ) — показатель, позволяющий оценить митотическую активность клеток апикальной меристемы корней проростков, под действием меди изме-

нялся не существенно (рис. 3). При невысоких дозах поллютанта ($0.01\text{--}0.03 \text{ мг Cu}^{2+}/\text{мл}$) наблюдали определенные изменения этого показателя, однако они отклонялись от контроля на незначительную величину. При более высоких концентрациях Cu^{2+} (0.07 и 0.1 мг/мл) МИ все же был меньше контроля, однако все равно мало отличался от варианта $0.01 \text{ мг Cu}^{2+}/\text{мл}$ (различия в пределах ошибки). Отмечено, что форма кривой для частоты профаз была практически идентична таковой для МИ. Из этого следует вывод, что делящиеся клетки главным образом находились на этой стадии клеточного деления. Логично предположить, что такой феномен связан с тем, что токсическое воздействие меди приводило к задержке митоза, в итоге делящиеся клетки не могли нормально завершить этот процесс и перейти в интерфазу.

Дозовые зависимости для остальных фаз митоза приведены на рис. 4. Хорошо видно, что частота метафаз во всем исследованном диапазоне концентраций оставалась стабильной, и отклоне-

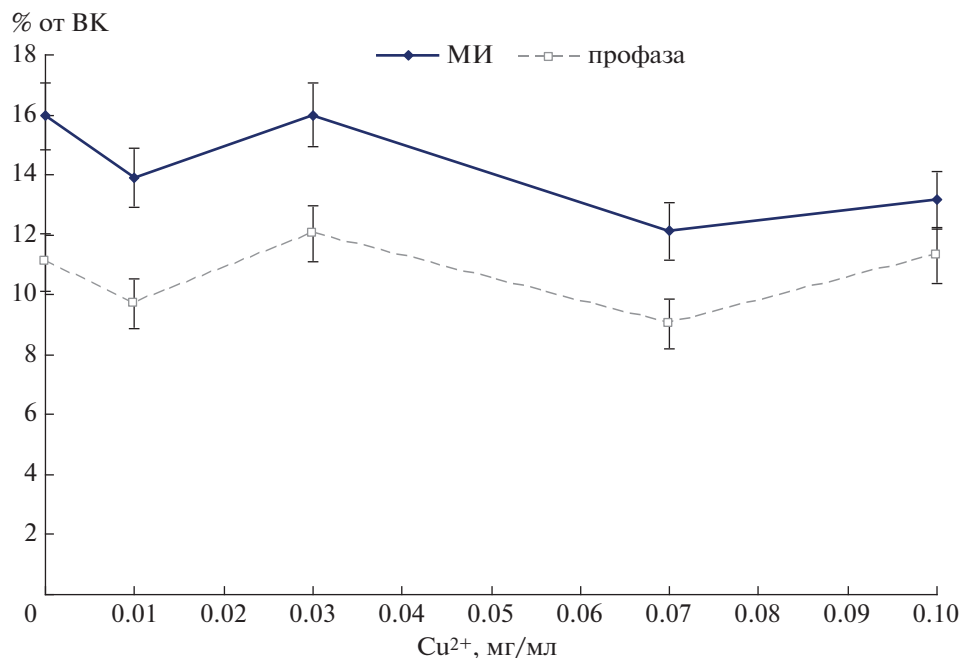


Рис. 3. Митотический индекс и частота профаз в клетках апикальной меристемы корней проростков ячменя сорта Симфония при действии различных концентраций меди.

ния во всех вариантах были минимальными. Иную ситуацию отметили для ана-телофаз: фактически происходило линейное сокращение частот поздних фаз митоза, и при максимальной дозе 0.1 мг Cu^{2+} /мл таковых частот были значительно меньше контроля. Учитывая, что в этих фазах ключевое значение имеет функционирование аппарата веретена деления, можно с уверенностью предположить, что воздействие меди приводило к нарушениям в его работе. Следует отметить, что нами были предприняты попытки изучить воздействие на клеточное деление и более высоких концентраций меди, однако это оказалось невозможным: делящиеся клетки практически исчезали. В этой связи надо указать также и на сближение кривых МИ и профаз, и это говорит о том, что все больше клеток теряют способность миновать данную стадию митоза, и определяется такой феномен накоплением тяжелых цитогенетических аномалий. Фактически хромосомы теряют подвижность и деградируют, слипаясь в неопределенную массу, и это делает переход на поздние фазы митоза крайне затруднительным. Таким образом, величина МИ остается стабильной, несмотря на исчезновение клеток в ана-телофазах, и она определяется главным образом профазам. Полученные нами данные о реакции процесса пролиферации на действие меди в основном соответствуют эффектам, наблюдавшимся в наших предшествующих исследованиях, выполненных на

том же объекте (яровом ячмене), но при действии других ТМ — свинца и кадмия [13–15]. Имеются и сообщения иных авторов [20], получивших сходные результаты на других объектах.

Высказанное выше предположение о том, что воздействие меди на клетки апикальной меристемы приводит к повреждению аппарата веретена деления, подтверждается анализом частоты и спектра цитогенетических нарушений. Отмечено, что в отличие от эффектов, вызываемых действием, например, ионизирующего излучения, в рассмотренном случае не отмечено увеличения выхода аномалий, связанных с повреждением собственно вещества хромосом и ДНК (фрагментов, мостов). В то же время нарушения, сопряженные с повреждением веретена деления и сбоями нормального процесса кариокинеза (отставание и слипание хромосом, многополюсные митозы, патологические анафазы, неправильные расхождения хромосом) составляли основное количество регистрируемых аномалий, и их частоты, как правило, возрастали по мере увеличения дозы ТМ (табл. 1). В целом дозовая зависимость для частоты aberrантных клеток показала практически линейный рост по мере увеличения концентрации меди, описываемый прямой с постоянным углом наклона (рис. 5). Сравнивая результаты, полученные при цитогенетическом анализе ответа клеток апикальной меристемы корней проростков ячменя для 3-х ТМ (свинца, кадмия и

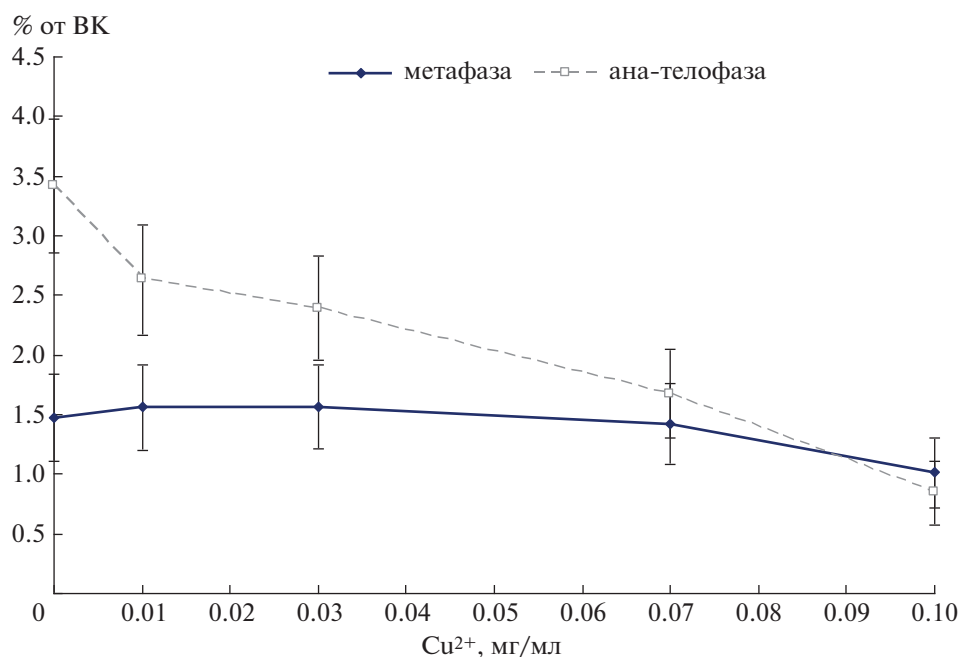


Рис. 4. Частота клеток в мета- и ана-телофазах апикальной меристемы корней проростков сорта Симфония при действии различных концентраций меди.

меди), можно отметить общие закономерности — высокий выход нарушений, связанных с повреждением веретена деления.

Таким образом, угнетение процесса кариокinesis следует считать общим явлением, характерным для воздействия различных ТМ. При этом в плане токсичности рассмотренные ТМ можно разместить в ряд: $Pb < Cd < Cu$. Например, для свинца действующие дозы были максимальными (1–3 мг/мл) [13–15], и частота aberrantных клеток (АК) сначала возрастала незначительно, выходя на плато (диапазон 1–2 мг/мл), и лишь при 3 мг/мл отмечали резкий рост частоты АК. Для кадмия действующие дозы были меньше (0.25–1.5 мг/мл), а частоты АК возрастали более резко,

но кривая имела два перелома: 0.5 мг/мл (рост по сравнению с контролем примерно в 2 раза) и 1 мг/мл (рост по сравнению с контролем в 8 раз, при максимальной дозе 0.5 мг/мл — 16 раз). В случае с медью частота АК возрастала во всем диапазоне концентраций равномерно.

На основе полученных данных можно утверждать, что воздействие меди на клетки апикальной меристемы корней проростков ячменя препятствовало нормальному митозу. Главным образом наблюдали повреждение структур хромосом и сбои в работе аппарата веретена деления. Вследствие этого процесс пролиферации останавливался на стадии профазы или метафазы. Подобные явления отмечены для действия всех ТМ, а

Таблица 1. Спектр цитогенетических нарушений в клетках апикальной меристемы корней проростков сорта Симфония при действии различных концентраций Cu^{2+}

Cu^{2+} , мг/мл	Число клеток с разными типами нарушений										Всего
	f'	f''	m'	m''	g	mp	ndis	agg	pata	and	
0	0.018	0.236	0.109	0.055	0.672	0	0	0	0	0	1.090
0.25	0.087	0.115	0.144	0.087	0.505	0.115	0.115	0	0.014	0.058	1.140
0.5	0.060	0.120	0.040	0.180	0.779	0.180	0.180	0	0	0.140	1.499
0.7	0.025	0.126	0.101	0.226	1.056	0.277	0.277	0.050	0.126	0.251	2.237
1	0.081	0.363	0.040	0.081	1.410	0.443	0.443	0.242	0.081	0.322	3.062

Примечания. 1. f' — фрагмент одинарный, f'' — фрагмент двойной, m' — мост одинарный, m'' — мост двойной, g — отставание, mp — многополюсный митоз, ndis — нерасхождение хромосом, agg — слипание хромосом, pata — патологическая анафаза, and — неправильное расхождение хромосом. 2. Данные достоверны при $p = 0.05$.

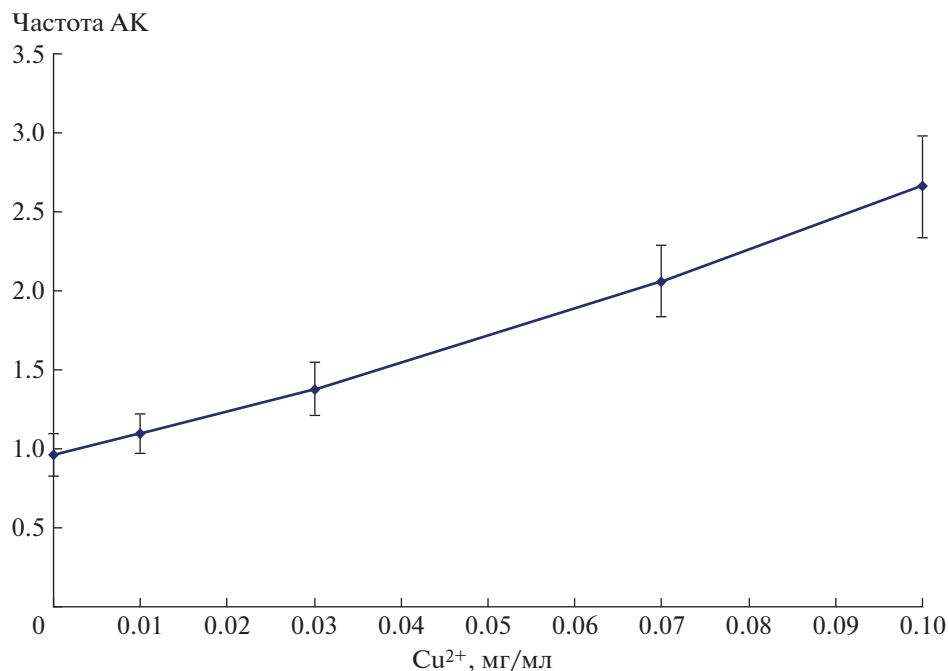


Рис. 5. Частота аберрантных клеток (АК) в апикальной меристеме проростков ячменя сорта Симфония.

также других ядов, вызывающих цитотоксические эффекты, таких как колхицин [17, 18]. Фотографии основных типов нарушений приведены на рис. 6.

Известно, что медь, равно как и другие ТМ, поступает в растительный организм в первую очередь через корень. Процесс корневого поглощения так или иначе регулирует накопление и распределение Cu^{2+} в тканях растений [21, 22]. При этом, несмотря на то что медь является ценным микроэлементом, ее избыток способен вызывать серьезные нарушения в работе различных систем и органов растения [23], что и было показано в нашем исследовании: уже при относительно низких концентрациях данного ТМ в питательном растворе (0.05, а особенно >0.15 мг Cu^{2+} /мл) наблюдали существенное угнетение развития корней проростков на ранних стадиях их развития. По мере возрастания дозы меди эти эффекты лишь усиливались, и токсический стресс выявляли уже по изменению и других параметров (например, сокращалась средняя длина проростков, отмечали повышенный выход цитогенетических аномалий). Таким образом, основываясь на полученных данных, можно утверждать, что корень является наиболее чувствительным к стрессовым воздействиям органом растения. В этой связи необходимо отметить, что именно оценку особенностей развития корней используют в ряде исследований [7] как удобный и надежный тест для

изучения ответа различных видов растений на действие техногенных поллютантов, в том числе меди.

Очевидно, что развитие корней прямо зависит от процесса митоза. Например, в работе [24] показано, что у чувствительных к действию ТМ сортов и линий различных видов растений угнетение их развития связано с разнообразными нарушениями процесса пролиферации. Митотический индекс, характеризующий общее количество делящихся клеток, часто используют для оценки цитотоксичности различных агентов. Таковая может быть обнаружена посредством увеличения или сокращения МИ [25]. В соответствии с [26], МИ, значимо более низкий, чем в контроле (без воздействия токсического агента), может отражать изменения, происходящие с растением под действием стресса. С другой стороны, рост МИ и следовательно активизация клеточного деления, также указывает на негативные изменения в клетках. Излишняя митотическая активность опасна для клеток, поскольку ведет к дезорганизации процесса деления и даже развитию патологических состояний (наподобие злокачественных опухолей у животных).

Однако как сокращение, так и рост МИ являются важными индикаторами при мониторинге загрязнения окружающей среды, особенно для оценки эффектов, вызываемых поллютантами с доказанным цитотоксическим потенциалом [26].

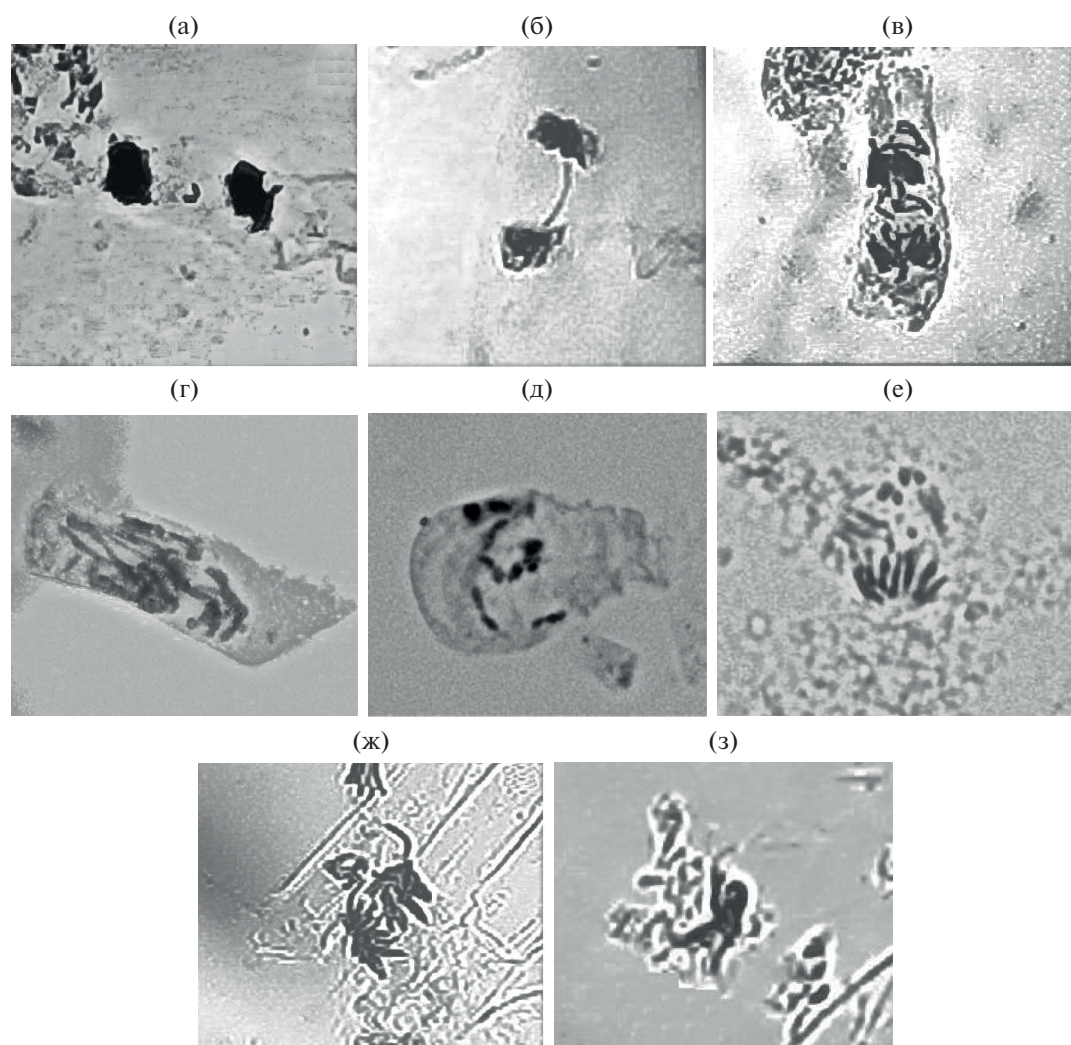


Рис. 6. Типы цитогенетических аномалий, отмеченных при действии Cu^{2+} на клетки апикальной меристемы корней проростков ячменя: (а) — фрагмент, (б) — мост, (в) — отставания хромосом, (г) — нерасхождение хромосом, (д) — неправильное расхождение хромосом, (е) — патологическая анафаза, (ж) — трехполюсный митоз, (з) — слипание хромосом.

Например, в работе [27] показано, что сокращение МИ в меристематических клетках *Allium cepa* L. можно считать надежным маркером для определения наличия токсических веществ в окружающей среде. Таким образом, величина МИ — подходящий тест для оценки уровней загрязнения. Поэтому в ряде исследований [25, 27, 28] МИ использовали для изучения цитотоксических эффектов и зачастую удавалось получить удовлетворительные результаты.

Данные, полученные в настоящей работе, показали явное негативное воздействие меди на митотический процесс, что выражалось в повышении выхода цитогенетических аномалий, а также возникновении блокировок пролиферации на поздних стадиях. Аналогичные результаты полу-

чены в исследованиях, посвященных сходным темам [24, 29]. Хотя следует заметить, что в отличие от приведенных в указанных источниках данных, нами не выявлено снижение МИ, что вероятно было связано с меньшим временем экспозиции проростков в содержащем Cu^{2+} растворе. Учитывая, что было отмечено постепенное исчезновение поздних фаз митоза по мере роста концентрации ТМ, можно предположить, что при более длительной выдержке проростков в растворе делющиеся клетки в апикальной меристеме корней проростков постепенно могли исчезнуть или, как минимум, начать встречаться гораздо реже.

Также отмечено, что основными типами цитогенетических нарушений, вызванных действием меди, были такие, которые связаны с деградацией

вещества хромосом или повреждением аппарата веретена деления (трехполюсные митозы, слипание хромосом и др.). Похожие результаты были получены и в работе [30]. Исследователи оценивали частоты цитогенетических аномалий в апикальной меристеме корней *Allium cepa* с целью выяснить ответ этого растения на действие различных концентраций сточных вод с медных рудников. Полученные результаты показали явную дозовую зависимость, отражающую подавление МИ по мере роста концентрации ТМ. При этом наиболее частыми типами цитогенетических нарушений были разные виды деградации вещества хромосом, их отстаивания и слипания, мосты.

К аналогичным выводам, что воздействие ТМ приводит к развитию нарушений в структуре хромосом, пришли и в работе [31]. Авторы связывали такой феномен с тем, что действие ТМ вызывает нарушения в нативной структуре различных белков хромосом, таких как гистоны, что препятствует нормальному распределению хромосом, и, как следствие, провоцирует возникновение нарушений. При этом, если сравнивать различные типы аномалий, то К-митозы и хромосомные мосты можно считать более легкими нарушениями, чем отмеченное нами слипание хромосом. Последнее указывало на больший токсический стресс, и скорее всего вероятность того, что клетка восстановится после таких повреждений, не слишком высока, и накопление таких aberrаций в конечном счете ведет к клеточной смерти [29]. Внешне все эти процессы выражаются в замедлении развития проростков и возникновении всевозможных нарушений морфологии корней, которые и были отмечены нами.

Выявленное в нашей работе сокращение частот клеток, проходящих поздние фазы пролиферации, можно увязать с особенностями синтеза и функционирования микротрубочек. Они встречаются практически у всех эукариот и состоят из белков α - и β -тубулинов. Микротрубочки вовлечены в формирование таких структур, как кортикальные пучки в интерфазе, веретена деления, фрагмопласт, играющих важную роль в различных процессах, например, транслокации хромосом, дифференциации клеток и их движении [32, 33]. В работе [34] показано, микротрубочки формируют в делящихся клетках 4 типа последовательных пучков, наличие которых связано с конкретной стадией клеточного цикла. Эти агрегаты принимают участие в разнообразных клеточных процессах, связанных с пролиферацией, например, формируют цитоскелет [35].

Ряд исследований [35, 36] показали, что микротрубочки весьма чувствительны к стрессовым

воздействиям, и их размещение в клетке и процесс синтеза способны существенно модифицироваться в ответ на изменения температуры, введение в среду органических веществ или ионов металлов. Имеются сведения [33, 37], что воздействие меди как раз приводит к изменениям в структуре микротрубочек, что можно увязать с повышенным выходом цитогенетических аномалий, связанных с работой аппарата веретена деления. Еще сообщали [34], что по мере роста концентрации меди отмечено уменьшение экспрессии α -тубулина — одного из составляющих веществ микротрубочек. При этом любые изменения в концентрации этого белка негативным образом отражаются на структуре микротрубочек и соответственно отрицательно сказываются на их функциях. В качестве одной из причин, ведущей к таким последствиям, в работе [38] называли снижение концентрации кальмодулина и/или нарушение гомеостаза Ca^{2+} в цитозоле. В другом исследовании [39] отмечено, что разрушение цитоскелета и повреждение микротрубочек хорошо коррелируют с накоплением в клетке активных форм кислорода (АФК), которые окисляют и разрушают белки этих структур. В конечном счете повреждения микротрубочек прямо связаны с сокращением митотической активности [34]. В работе [32] показано, что нарушения организации и деполимеризация микротрубочек препятствуют формированию веретена деления, отвечающего за перемещение хромосом в процессе цитокинеза, эти явления и ведут к развитию цитогенетических аномалий, наблюдавшихся в нашей работе. Таким образом, можно утверждать, что наличие в клеточной среде ионов меди действительно способствует повреждению аппарата веретена деления, и, как следствие, угнетает процесс пролиферации и развития корней. Такие процессы, видимо, проявляются как угнетение развития растений ячменя по мере возрастания концентрации меди в питательной среде, что и наблюдали в настоящей работе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, оценили ряд морфометрических и цитогенетических параметров, характеризующих ответ проростков ярового ячменя 4-х сортов на действие диапазона концентраций Cu^{2+} . Выяснено, что воздействие меди вело к существенному угнетению развития проростков ячменя, что проявилось как на уровне целого организма (изменение морфометрических показателей, появление аномалий морфологии корней), так и на клеточном уровне организации растения (на-

копление цитогенетических аномалий). При этом особенности ответа растений ячменя на действие данного ТМ были связаны с внутривидовой (межсортовой) изменчивостью. Удалось выявить дозу Cu^{2+} , которая вызывает значимое угнетение изученных показателей, хотя еще не является летальной. Полученные данные могут быть использованы для исследования устойчивости различных сортов ячменя к действию меди с целью выявить варианты с повышенной устойчивостью или чувствительностью. Собранные данные могут служить в качестве исходного материала для нужд селекционной работы, направленной на создание таких сортов этой сельскохозяйственной культуры, которые могли бы успешно развиваться в условиях наличия избыточных концентраций меди (а потенциально и других ТМ) в почвах.

В процессе исследования были получены новые данные о различных аспектах ответа проростков ячменя на действие меди с использованием цитогенетических и морфометрических показателей. Показано цитотоксическое действие Cu^{2+} , вызывающее повышение выхода цитогенетических аномалий, преимущественно связанных с работой аппарата веретена деления и нарушением нативной структуры хромосом. С привлечением данных литературы были проанализированы причины развития наблюдаемых феноменов.

На основе рассмотренных показателей выявлен полиморфизм ответа различных сортов ячменя на действие меди, выявлены варианты с повышенной устойчивостью или чувствительностью к данному ТМ. С привлечением материалов предшествующих исследований было показано, что некоторые из использованных сортов могут показывать устойчивость или чувствительность не только к Cu^{2+} , но и к другим тяжелым металлам, таким как свинец и кадмий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Holmgren G.G.S., Meyer M.W., Chaney R.L., Daniels R.B. Cadmium, lead, zinc, copper and nickel in agricultural soils of the United States of America // J. Environ. Qual. 1993. V. 22. № 4. P. 335–348.
2. Stefanov I., Frank J., Gedamu L., Misra S. Effect of cadmium treatment on the expression of chimeric genes in transgenic tobacco seedlings and calli // Plant Cell Reports. 1997. V. 16. P. 291–294.
3. Foy C.D., Chaney R.L., White M.C. The physiology of metal toxicity in plants // Annu. Rev. Plant Physiol. 1978. V. 29. P. 511–566.
4. Burkhead J.L., Reynolds K.A.G., Abdel-Ghany S.E., Co-hu C.M., Pilon M. Copper homeostasis // New Phytol. 2009. V. 182. P. 799–816.
5. Yruela I. Copper in plants: Acquisition, transport and interactions // Funct. Plant Biol. 2009. V. 36. P. 409–430.
6. Andres-Colas N., Perea-Garcia A., Puig S., Penarrubia L. Deregulated copper transport affects *Arabidopsis* development specially in the absence of environmental cycles // Plant Physiol. 2010. V. 153. P. 170–184.
7. Meng Q.M., Zou J., Jiang W.S., Liu D.H. Effect of Cu^{2+} concentration on growth, antioxidant enzyme activity and malondialdehyde content in garlic (*Allium sativum* L.) // Acta Biol. Cracov. Ser. Bot. 2007. V. 49. P. 95–101.
8. Wang Y.T., Bjorn L.O. Heavy metal pollution in Guangdong province, China, and the strategies to manage the situation // Front. Environ. Sci. 2014. V. 2. P. 1–12.
9. Черных Н.А., Эдмон С.А. Оценка содержания тяжелых металлов в почвах и сельскохозяйственных растениях Республики Кот-д'Ивуар // Агрохимия. 2004. № 10. С. 78–85.
10. Минкина Т.М. Групповой состав соединений тяжелых металлов в почвах агроценозов, загрязненных аэрозольными выбросами Новочеркасской ГРЭС // Агрохимия. 2011. № 6. С. 68–77.
11. Forster B.P., Ellis R.P., Thomas W.T.B., Newton A.C., Tuberosa R., This D., Elenein R.A., Bahri M.H., Ben Salem M. The development and application of molecular markers for abiotic stress tolerance in barley // J. Exp. Bot. 2000. V. 51. № 342. P. 19–27.
12. Bengtsson B.O. Barley genetics // Trends in genetics. 1992. V. 8. P. 3–5.
13. Дикарев А.В., Дикарев В.Г., Дикарева Н.С., Гераськин С.А. Внутривидовой полиморфизм ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L.) по устойчивости к действию свинца // Сел.-хоз. биол. 2014. № 5. С. 78–87.
14. Дикарев А.В., Дикарев В.Г., Дикарева Н.С. Влияние нитрата свинца на морфологические и цитогенетические показатели растений ярового двурядного ячменя (*Hordeum vulgare* L.) // Агрохимия. 2014. № 7. С. 45–52.
15. Дикарев А.В., Дикарев В.Г., Дикарева Н.С. Исследование продуктивности, морфометрических и физиолого-биохимических показателей контрастных по устойчивости к свинцу сортов ярового двурядного ячменя // Агрохимия. 2019. № 10. С. 72–84.
16. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести / Под ред. Василенко Т.И. М.: Изд-во стандартов, 2010. 30 с.
17. Паушева З.П. Практикум по цитологии растений. М.: Колос, 1974. 288 с.
18. Атабекова А.И., Устинова Е.И. Цитология растений. М.: Колос, 1971. 256 с.
19. Таланова В.В., Тутов А.Ф., Боева Н.П. Влияние свинца и кадмия на проростки ячменя // Физиол. и биохим. культ. раст. 2001. Т. 33. № 1. С. 33–37.
20. Wierzbicka M. Resumption of mitotic activity in *Allium cepa* L. root tips during treatment with lead salts // Environ. Exp. Bot. 1994. V. 34. P. 173–180.
21. Song J., Zhao F.J., Luo Y.M., McGrath S.P., Zhang H. Copper uptake by *Elsholtzia splendens* and *Silene vulgaris* and assessment of copper phytoavailability in contaminated soils // Environ. Pollut. 2004. V. 128. P. 307–315.

22. Geremias R., Fattorini D., Favere V.T.D., Pedrosa R.C. Bioaccumulation and toxic effects of copper in common onion *Allium cepa* L. // Chem. Ecol. 2010. V. 26. P. 19–26.
23. Ducic T., Polle A. Transport and detoxification of manganese and copper in plants // Brazil. J. Plant Physiol. 2005. V. 17. P. 103–112.
24. Souguir D., Ferjani E., Ledoigt G., Goupil P. Exposure of *Vicia faba* and *Pisum sativum* to copper-induced genotoxicity // Protoplasma. 2008. V. 233. P. 203–207.
25. Fernandes T.C.C., Mazzeo D.E.C., Marin-Morales M.A. Mechanism of micronuclei formation in polyploidized cells of *Allium cepa* exposed to trifluralin herbicide // Pest. Biochem. Physiol. 2007. V. 88. P. 252–259.
26. Leme D.M., Marin-Morales M.A. *Allium cepa* test in environmental monitoring: a review on its application // Mutat. Res. 2009. V. 682. P. 71–81.
27. Smaka-Kinci V., Stegnar P., Lovka M., Toman M.J. The evaluation of waste, surface and ground water quality using the *Allium* test procedure // Mutat. Res. 1996. V. 368. P. 171–179.
28. Leme D.M., Marin-Morales M.A. Chromosome aberration and micronucleus frequencies in *Allium cepa* test exposed to petroleum polluted water – a case study // Mutat. Res. 2008. V. 650. P. 80–86.
29. Liu D.H., Jiang W.S., Li M.X. Effects of cadmium on root growth, cell division and nucleoli in root tip cells of garlic // Biol. Plant (Prague). 2003/2004. V. 47. P. 79–83.
30. Inceer H., Beyazoglu O., Ergul H.A. Cytogenetic effects of wastes of copper mine on root tip cells of *Allium cepa* L. // Pak. J. Biol. Sci. 2000. V. 3. P. 376–377.
31. Saxena P.N., Gupta S.K., Murthy R.C. Carbofuran induced cytogenetic effects in root meristem cells of *Allium cepa* and *Allium sativum*: A spectroscopic approach for chromosome damage // Pestic. Biochem. Physiol. 2010. V. 96. P. 93–100.
32. Wade R.H. On and around microtubules: An overview // Mol. Biotechnol. 2009. V. 43. P. 177–191.
33. Soltys D., Rudzinska-Langwald A., Kurek W., Gniazdowska A., Sliwinska E., Bogatek R. Cyanamide mode of action during inhibition of onion (*Allium cepa* L.) root growth involves disturbances in cell division and cytoskeleton formation // Planta. 2011. V. 234. P. 609–621.
34. Qin R., Wang C., Chen D., Bjorn L.O., Li S. Copper-induced root growth inhibition of *Allium cepa* var. *Agrogarum* L. involves disturbances in cell division and DNA damage // Environ. Toxicol. Chem. 2015. V. 34. № 5. P. 1045–1055.
35. Elefthereos P.E., Ioannis-Dimosthenis S.A., Pelagia M. Effects of hexavalent chromium on microtubule organization, ER distribution and callose deposition in root tip cells of *Allium cepa* L. // Protoplasma. 2012. V. 249. P. 401–416.
36. Shimizu Y., Shimizu T., Nara M., Kikumoto M., Kojima H., Morii H. Effects of the KIF2C neck peptide on microtubules: Lateral disintegration of microtubules and structure formation // FEBS J. 2013. V. 280. P. 1681–1692.
37. Gichner T., Patkova Z., Szakova J., Znidar I., Mukherjee A. DNA damage in potato plants induced by cadmium, ethyl methanesulphonate and γ -rays // Environ. Exp. Bot. 2008. V. 62. P. 113–119.
38. Buljan V., Yeung S., Rushdi S., Delikatny E.J., Hambly B. Mercury and cadmium effects on microtubule polymerization and depolymerization // Biophys. J. 2001. V. 80. P. 99A.
39. Rudrappa T., Bonsall J., Gallagher J.L., Seliskar D.M., Bais H.P. Root-secreted allelochemical in the noxious weed *Phragmites australis* deploys a reactive oxygen species response and microtubule assembly disruption to execute rhizotoxicity // J. Chem. Ecol. 2007. V. 33. P. 1898–1918.

Assessment of Copper Influence to the Spring Barley (*Hordeum vulgare* L.) Variants Seedlings of Different Geographical Origin

A. V. Dikarev^{a, #}, V. G. Dikarev^a, and N. S. Dikareva^a

^a All-Russian Research Institute of Agricultural Radiology and Agroecology,
Kievskoe shosse 109 km, Kaluga region, Obninsk 249032, Russia

[#] E-mail: ar.djuna@yandex.ru

An influence of the heavy metal (HM) on some spring barley variants of different geographical origin was researched on the example of copper. Some morphological indexes of the seedlings were assessed, such as length of shoots and roots, number of germinating seeds and strong seedlings. A suppression of seedlings development and formation of roots morphological anomalies were noticed on high Cu^{2+} doses. The critical concentration of Cu^{2+} , which is provoked a significant, but not lethal suppression of listed indexes was discovered on the base of collected data. Some barley variants, which have a comparatively high or low sensitivity to HM toxic influence, were chosen. A cytogenetic analysis of barley seedlings root apical meristem was completed for examination of the described effects causes. With the copper dose increasing an accumulation of the cytogenetic anomalies was observed, herewith a main amount of such breaches was bound with the mitotic spin apparatus damaging. On the base of collected data some conclusions about mechanisms of the plant organism reactions on the chemical agents influence were made. The copper dose, which is suitable for the barley variants differentiation on sensitive and tolerant to this HM influence, was discovered.

Key words: copper, morphological and cytogenetic indexes, tolerance to the heavy metals stress, spring barley.

120 ЛЕТ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ Е.Н. МИШУСТИНА (1901–1991)

DOI: 10.31857/S0002188121060119

22 февраля 2021 г. исполнилось 120 лет со дня рождения Евгения Николаевича Мишустина, советского микробиолога, академика АН СССР (1974 г.), заслуженного деятеля науки РСФСР (1961 г.), дважды лауреата Государственной премии СССР (1951 и 1970 гг.). Евгений Николаевич ушел из жизни почти тридцать лет назад, 3 мая 1991 г., но актуальность его исследований и их итоги имеют значение и в настоящее время.

Перечислять научные и государственные награды, звания Евгения Николаевича нет необходимости, т.к. это хорошо отражено в многочисленных печатных публикациях его последователей и учеников, а также в электронных публикациях [1–3].

Будучи выпускником Тимирязевской академии, вобрав в себя ученье Д.А. Сабина, Д.Н. Прянишникова, В.Р. Вильямса, Н.Н. Худякова и других ученых начала XX века, Евгений Николаевич распространил и укоренил в СССР именно почвенное направление микробиологии. Так как Е.Н. Мишустин активно способствовал становлению и развитию почвенной микробиологии в союзных республиках СССР, можно говорить не только об его участии, а о прямом создании почвенной микробиологии в СССР, хотя для исторической точности нужно упомянуть имя Николая Александровича Красильникова, который после образования в Москве Института микробиологии в 1934 г., как отмечал сам Евгений Николаевич, “формально ведал лабораторией почвенной микробиологии”.

Нужно отметить, что и преподавание, и исследования в микробиологии во время становления Евгения Николаевича как будущего мирового ученого, конечно, активно развивались, но развитие было общим, т.е. без учета особенностей именно почвенной микробиологии. Однако, как описывал Евгений Николаевич сам, в книге, изданной при его жизни [4], в 1920–1940-х гг. прошлого столетия в СССР уже формировались такие частные направления микробиологии, как сельскохозяйственная, молочная микробиология. Но именно Е.Н. Мишустин был приглашен Б.Л. Исаченко в Институт микробиологии АН СССР из ВИУАА для развития именно почвен-

ной микробиологии, что было им успешно осуществлено.

Память об ученом проявляется в первую очередь в обсуждениях его научного вклада и тех современных успехах и научных направлениях, которым в свое время он уделял внимание. Научных направлений, которыми Евгений Николаевич занимался, много. Обсудить их все в настоящем посвящении невозможно, поэтому отметим некоторые из них, особенно те, которые остаются наиболее актуальными или в которых имеется значимый прогресс. Как уже отмечено, Евгений Николаевич способствовал становлению и развитию почвенной микробиологии не только в Российской Федерации, не только в Союзных республиках СССР, но и в странах социалистического лагеря, образовавшихся после второй мировой войны. С Евгением Николаевичем связано становление и развитие именно почвенной микробиологии на Украине, Казахстане, Туркменистане, в других южных и прибалтийских республиках бывшего СССР. Евгений Николаевич был бескорыстным, неутомимым консультантом и просто дружеским советчиком для всех почвенных микробиологов из всех институтов СССР.

Особенностью научного подхода Евгения Николаевича было сочетание объективности и аккуратности в оценке научных результатов как своих, так и литературных, способности проявить устойчивость к “модным” результатам, которые хотя и были объективны, но практически мало значимы, но выразить свою объективность он умел так, что его оценка действовала только оздоравливающе. Он рано понял безуспешность применения биопрепаратов, состоящих из свободноживущих азотфиксирующих бактерий. Он остался устойчив к модным результатам о способности большинства гетеротрофных бактерий, проявлять способность к азотфиксации и остался уверенным в необходимости изучать симбиотическую азотфиксацию, внедрять и расширять использование бобовых культур для стимуляции восполнения азота в почвенной экосистеме и поддержания плодородия. Это оказалось пророческим. Современные исследования показали,

что действительно в здоровой залежной почве азотфиксирующая активность, как актуальная, так и потенциальная, оказываются на границе чувствительности современных распространенных методов количественного определения азот-фиксации, т.е. практический вклад этого процесса в обеспечении азотом нативной почвенной экосистемы — эфемерный. В то же время практики органического земледелия внесли в международные руководства по органическим технологиям в виде облигатных требований использование бобовых культур для восполнения азота в почвенной экосистеме.

Другое научное направление, занимавшее внимание Евгения Николаевича в течение всей его научной жизни, — это микробиология сохранения почвы, ее плодородия и судьба основного “держателя” органо-минерального вещества почвы — гумуса. В настоящее время это направление переросло в концепцию здоровья почвы, здоровья почвенной экосистемы. Здоровье почвы, как всеобъемлющая характеристика почвенной экосистемы, включила категории физико-химических свойств почвы, ее биоразнообразия в виде микробиома почв, поддержания продуктивности как способности к самообеспечению почвенной экосистемы, как биологической системы, биофильными элементами. Эта характеристика включила академические и фактологические параметры.

Внимание Евгения Николаевича также занимала и проблема почвообразования, почвообразования и роль микроорганизмов в этом процессе. В этой связи актуально отметить роль фундаментального академического образования ученого. Дипломная работа Евгения Николаевича, выпол-

ненная в Тимирязевской академии под руководством микробиолога Худякова Н.Н., определила все его дальнейшее развитие и успехи. В проблеме познания почвообразования, почвообразования Евгений Николаевич был убежден в основной роли микроорганизмов в этом процессе, а не геологии.

Свои труды и исследования сотрудников, которые работали с ним, Евгений Николаевич обобщил во множестве книг. Монография “Санитарная микробиология почвы” и учебник “Микробиология” стали научными “нерукотворными” памятниками Евгению Николаевичу. Роль почвы, почвенной экосистемы в круговороте микроорганизмов была впоследствии развита и дополнена его учениками в виде разработки цикла микроорганизмов в природе. В успехах России в XXI веке в производстве продовольствия, достаточного не только для самообеспечения, но и для значительного экспорта, несомненно, есть и заслуга Евгения Николаевича Мишустина.

А. М. Семенов, В. Н. Кудяров

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Евгений Николаевич Мишустин // Выдающиеся ученые (выпускники, профессора) Петровской (Тимирязевской) академии, Российского государственного университета—МСХА им. К.А. Тимирязева. Иркутск, 2017. 98 с.
2. *Минеев В.Г.* История и состояние агрохимии на рубеже XXI века. Т. 2. М.: Изд-во МГУ, 2006. 790 с.
3. Ученые МГУ — действительные члены и члены-корреспонденты РАН. М., 2004. 933 с.
4. *Мишустин Е.Н.* Моя жизнь в науке. Воспоминания. М.: Наука, 1997. 272 с.

**Джукич Д.А., Семенов А.М., Лутовац М.В., Мандич Л.Г., Иутинская Г.А.,
Подгорский В.С. Почвенные экосистемы — загрязнение и очистка.
Сербия, Нови Сад: Крагуевацкий ун-т, фак-т агрономии в Чачаке,
Балканский НЦ РАЕН, изд-во “SAJNOS” ДОО, 2020.
ISBN 978-86-87611-77-1 (AFC). 628 с.**

DOI: 10.31857/S0002188121060120

Уникальная монография “Почвенные экосистемы — загрязнение и очистка”, подготовленная международным коллективом авторов из Сербии, России и Украины, издана в 2020 г. в Сербии. Авторы монографии Д.А. Джукич, А.М. Семенов, М.В. Лутовац, Л.Г. Мандич, Г.А. Иутинская, В.С. Подгорский являются известными микробиологами, экологами, точнее сказать — микробными экологами почвенной экосистемы. Монография посвящена самой актуальной проблеме текущего временного периода — сохранению, защите и оздоровлению почвы в окружающей среде, почвенной экосистеме. Человечество обитает и проживает на почве, поэтому почва и связанная с почвой биота, т.е. почвенная экосистема и подстилающий почву грунт, продолжают обеспечивать подавляющую часть человечества продуктами питания, кислородом, жилищем и продуктами технологического прогресса. Однако основной особенностью монографии является ее биологичность, а в биологичности именно микробиологичность. Показана роль микроорганизмов, как движущей силы и источника всего полезного, а также как “стока” для всего вредного, как авангард и арьергард в создании того продукта, называемого почвой, в сохранении, защите и оздоровлении той системы, которую называют окружающей средой. Необходимость такого высоконаучного труда очевидна.

Монография издана на сербском языке. В Сербии, как известно, используется славянский язык, что существенно приближает содержание для русскоязычного и украинского читателя, к тому же есть и уверенность, что в недалеком будущем этот очень нужный труд будет переиздан и на других языках, в частности, на русском. Не разделяя и не умаляя труд и вклад всех соавторов, но зная предысторию подготовки настоящей книги, необходимо отметить заслугу первого автора — профессора Драгутина А. Джукича, который является известным ученым в Сербии и убежденным русофилом. Именно благодаря Драгутину А. Джукичу, его энергии, настойчивости, организационному таланту и фантастическому трудолюбию этот уникальный труд увидел свет.

Монография состоит из 6-ти частей, каждая часть в свою очередь содержит несколько глав с многочисленными подглавами разного уровня, т.е. содержание и изложение материала хорошо структурировано. В кратком введении авторы подчеркивают, что именно санитарно-микробиологические исследования, тестирование незагрязненных и загрязненных почв на индикаторные микроорганизмы (сапротрофные и патогенные), санитарная защита и очистка загрязненных почв с применением небиологических, биологических и комбинированных методов ремедиации, специализированных биопрепаратов и фиторемедиации занимают центральное место в монографии.

Изложение материала в первой части начато с рассмотрения почвы как среды обитания микроорганизмов. Рассмотрены биогеоценотические функции почвы, ее биологические компоненты и экологические взаимоотношения между микроорганизмами и средой. Показаны принципы организации микробных (сообществ) ценозов. Уделено внимание описанию почвы как среды обитания микроорганизмов с традиционными представлениями характеристик почвы и рассмотрением характеристик почвы с точки зрения значения и вклада “эндемичности” изучаемых проблем. Завершен первый раздел главой с описанием и обсуждением гигиенического и эпидемиологического значения почвенной экосистемы где, конечно, рассмотрена санитарная оценка почвы по микробиологическим показателям.

Во второй короткой, но очень важной части описаны санитарно-микробиологические исследования почвы. В этой части с двумя главами даны фундаментальные представления о специфических свойствах микроорганизмов в разных типах почв, роль почвы в распространении инфекционных заболеваний (для человека и животных). Это все дано в сравнении и описании микробных сообществ нативных, не загрязненных почв, что и позволяет понимать почву как единую экосистему. Наверное, было бы не менее логично, если бы авторы разместили 4-ю часть следующей после

2-й части. В 4-й части рассматривается санитарная защита почвы, противоэпидемические мероприятия в санитарной охране почв, санитарно-противоэпидемиологический контроль и охрана почвы и др. Однако возможно такое впечатление возникает в результате быстрого ознакомления с содержанием книги, а авторы прочувствовали материал конечно более глубоко.

Третья часть книги, озаглавленная “Микроорганизмы — индикаторы загрязнения почвы”, является самой объемной, самой сложной по разнообразию информации, насыщенности и детальности включенного материала и представлена 14-ю главами. Эта часть по своему содержанию и по существу могла бы быть отдельной самостоятельной книгой. В изложении материала в этой части использован классический подход сравнения.

Сначала рассмотрена биология сапротрофных микробных сообществ и те изменения в них, которые выявляются при загрязнении почв, т.е. использование характеристик сапротрофных бактерий как индикаторов загрязнения почв. При этом подчеркивается важность динамического подхода в таких анализах. Далее рассмотрены наиболее общие индикативные показатели, которые позволяют выявлять и составлять наиболее общие представления и мнения о том, что произошло при загрязнении почвы. Рассмотрены термофилия и термофильные микроорганизмы как индикаторы возможных загрязнений. Сначала дан необходимый краткий экскурс о термофилии как явлении. Обнаружение микроорганизмов, вырастающих на средах при инкубировании посевов в температурных условиях, заметно превышающих мезофильные, дает основание предполагать наличие фекальных загрязнений в такой почве. Конечно, рассмотрены бактерии кишечной группы как показатели санитарного состояния почвы. Рассмотрены другие патогенные бактерии (граммотрицательные и грамположительные, спорообразующие, особо опасные возбудители), вызывающие пищевые токсические инфекции и другие смертельные заражения. В последних 4-х главах 3-й части рассмотрены инфекции, которые можно отнести к редким. Однако иногда такие возбудители обнаруживаются в почвах, и инфицирование которыми приводит к тяжелым последствиям. Из бактерий это, например, возбудитель туберкулеза. Обсуждены представители патогенных эукариот, микромицетов, дрожжей и патогенных амёб. Уделено внимание и вирусным инфекциям.

Пятая и шестая части монографии, которые по объему почти равны предыдущим 4-м частям, посвящены очистке загрязненных почв. В 5-й части представлены в основном главы с описанием физических и химических методов и способов очистки загрязненных почв, т.е. небиологических, но включено и описание биологических и комбинирован-

ных способов. В частности, пятая глава в этой части посвящена биопрепаратам, как для устранения загрязнений, так и биопрепаратам для мелиорации и восстановления плодородия почвы.

В шестой, заключительной части монографии, состоящей из 2-х довольно объемных глав, представлены способы и методы очистки загрязненных почв с упором на микробиологические биотехнологии для защиты не только почвенной экосистемы, но и в целом окружающей среды. Например, обсужден подход к использованию микроорганизмов как альтернативы химическим пестицидам, биологической очистке сточных вод, биоконверсии недефицитного возобновляемого растительного сырья, микробиологическому разложению нефти и продуктов ее переработки и многое другое.

Монография включает потрясающее количество процитированной литературы, т.е. монография не только высоконаучная, но и очень информативная. В первых 4-х частях список литературы помещен в конце каждой части. Литература 2-х последних частей представлена одним списком в конце 6-й части. Монография достаточно хорошо иллюстрирована рисунками, схемами и таблицами. Нумерация рисунков, схем и таблиц в монографии произведена для каждого раздела. В целом монография является образцом последовательности и детальности.

Традиционно в рецензии отмечают и какие-то недостатки, погрешности, обнаруженные в тексте. В книге несколько страниц при верстке и печати оказались пустыми (18 стр.). Некоторые схемы и рисунки, которые приведены в книге, по-видимому, заимствованы из устаревших источников, они хотя и научно верные, но с устаревшими представлениями. Некоторые методы, рекомендованные для глубокого очищения почв, пригодны только для таких почв, которых немного, например, тепличные грунты, т.к. имеют технологические ограничения, а также высокзатратные финансово (стр. 434, гл. 3.2.2). Встречаются устаревшие термины, например, сапрофиты для бактерий, некоторые таблицы и первой части не имеют названия и нумерации. Следует пожелать авторам при переиздании этой книги включить в соответствующие главы молекулярные биологические методы индикации биологических загрязнений почвенных экотопов и экосистем с молекулярными биологическими методами идентификации микроорганизмов. Подводя итог обзору этого колоссального труда, содержание которого представляет не только научно-познавательную ценность, но и обучение экологическим методам с основами микробиологии, биохимии, гидробиологии и др., можно только выразить благодарность авторам, университету и издательству за выпуск в свет этой уникальной книги.

Ю. Я. Спиридонов

80 ЛЕТ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ В.И. КИРЮШИНА



21 марта 2021 г. исполнилось 80 лет доктору биологических наук, профессору, академику Российской академии наук Валерию Ивановичу Кирюшину.

Будучи студентом Тимирязевской академии, которую он окончил в 1964 году, В.И. Кирюшин начал заниматься научными исследованиями. Его становление ученым и первые крупные научные достижения пришлись на годы работы во Всесоюзном НИИ зернового хозяйства под руководством выдающегося ученого А.И. Бараева. В институте В.И. Кирюшин руководил сначала лабораторией, затем отделом почвоведения в 1964–1980 гг. и являлся одним из ближайших сподвижников А.И. Бараева в разработке и продвижении по стране почвозащитной системы земледелия. Тогда же В.И. Кирюшиным была разработана система земледелия на солонцовых землях Казахстана, которой предшествовали глубокие теоретические исследования генезиса и мелиорация этих почв.

В 1980-х годах, будучи директором Сибирского НИИ земледелия и химизации сельского хозяйства, В.И. Кирюшин возглавил разработку зональных систем земледелия. Уже тогда в его работах это понятие отличалось конкретизацией экологического адреса, обусловленного определенными ландшафтно-экологическими условиями. Развивая далее понятийный аппарат систем земледелия, В.И. Кирюшин включил в него, помимо экологических условий, обусловленность системы земледелия социально-экономическими факторами, в том числе рынком, многоукладностью экономики, производственно-ресурсным потенциалом. В начале 1990-х годов им была предложена концепция адаптивно-ландшафтного земледелия, дано определение, классификация, и методология формирования, основанная на моделировании систем земледелия. Модели были созданы по материалам многофакторных полевых экспериментов, проводившихся под его руководством в различных природно-сельскохозяйственных провинциях Западной Сибири.

В дальнейшем, в период руководства кафедрой почвоведения РГАУ–МСХА им. К.А. Тимирязева, В.И. Кирюшиным была разработана агроэкологическая типизация земель, система их агроэкологической оценки, методика почвенно-ландшафтного картографирования и на этой основе – методология проектирования адаптивно-ландшафтных систем земледелия (АЛСЗ). В 1996 году был разработан первый проект АЛСЗ для ОПХ “Михайловское” МСХА им. К.А. Тимирязева, а в 2002 году совместно с академиком А.Л. Ивановым – первый цифровой проект для ОПХ Владимирского НИИСХ.

Научно-исследовательская и инновационная деятельность В.И. Кирюшина тесно сопряжена с подготовкой специалистов различных уровней и, соответственно, с разработкой образовательных программ. Особое внимание он уделяет подготовке магистров, им разработаны магистерская программа “Агроэкологическая оценка земель и проектирование агротехнологий” (2008 г.) и учебно-методические комплексы. Издан учебник “Агрономическое почвоведение” (2010 г.) для дипломированных специалистов и магистров. Всего им опубликовано более 400 науч-

ных работ в т.ч. 14 монографий — это, по сути, библиотека наставлений для молодых и маститых ученых в области ландшафтного земледелия и почвоведения.

Книга “Экологизация земледелия и технологическая политика” В.И. Кирюшина (2000 г.) оказала и оказывает наибольшее влияние на мировоззрение современной молодежи, решившей связать свою жизнь и судьбу с аграрной наукой. Монографии В.И. Кирюшина отличаются простотой и изяществом повествования, великолепным русским языком, образцом высокой научной культуры.

Серия работ академика В.И. Кирюшина “Почвенно-экологическое обеспечение адаптивно-ландшафтного земледелия и природопользования”, выдвинутая Почвенным институтом им. В.В. Докучаева на соискание Золотой медали имени В.В. Докучаева, включает 12 монографий и 35 статей в научных изданиях. В этих работах получили развитие заложенные В.В. Докучаевым принципы рационального природопользования и ландшафтно-экологические основы ведения агропроизводства. В них в значительной мере реализовалась идеология устойчивого развития сельскохозяйственной деятельности, декларированная сессией ООН в Рио-де-Жанейро в 1992 г., и задача проектирования устойчивых и продуктивных агроландшафтов, рассмотренная в том же году сессией РАСХН, посвященной научному наследию В.В. Докучаева. Эта задача наиболее эффективно решена в работах В.И. Кирюшина, благодаря глубоким и разносторонним исследованиям почв и почвенно-ландшафтных связей, положенных в основу разработанных моделей земледелия и, соответственно, теории адаптивно-ландшафтного земледелия.

За последнее двадцатилетие на кафедре почвоведения Московской сельскохозяйственной академии им. К.А. Тимирязева и в Почвенном институте им. В.В. Докучаева накоплен большой опыт по проектированию АЛСЗ и агротехнологий в различных зонах и регионах страны по заказам крупных сельскохозяйственных предприятий. Этот опыт наряду с обобщением теоретических и экспериментальных исследований представлен в монографии “Теория адаптивно-ландшафтного земледелия и проектирование агроландшафтов”.

В последние годы В.И. Кирюшин активно развивает новые подходы к территориальному планированию на ландшафтно-экологической основе и к проектированию сельскохозяйственных ландшафтов. Им разработаны классификации экологических и социально-экономических функций ландшафтов и методика структурно-функционального анализа ландшафтов с целью ландшафтного планирования и проектирования, представленные в монографии “Экологические основы проектирования сельскохозяйственных ландшафтов” (2018 г.) и “Концепция развития земледелия в Нечерноземье” (2020 г.).

Научная школа В.И. Кирюшина получила широкое признание и успешно развивается его учениками, среди которых 15 докторов наук, в том числе с академическими званиями, и 17 кандидатов наук.

Сейчас Валерий Иванович, работает в Почвенном институте им. В.В. Докучаева, в полном соответствии высокому статусу главного научного сотрудника Федерального исследовательского Центра. Он — один из основных и непосредственных участников крупных научно-организационных проектов Центра, будь то национальные доклады “Глобальный климат и почвенный покров России” (3 тома), или работа над “Рекомендациями по развитию агропромышленного комплекса и сельских территорий Нечерноземной зоны Российской Федерации до 2030 года” (2021 г.).

Многогранная научная и педагогическая деятельность В.И. Кирюшина отмечена званием заслуженного деятеля науки РФ, орденом Трудового Красного Знамени и медалями, присуждением премии Правительства РФ в области образования за 2013 г., премией им. Д.Н. Прянишникова, премией им. В.Р. Вильямса и многими другими ведомственными наградами. В 2021 г. научная деятельность Валерия Ивановича Кирюшина была отмечена Президиумом РАН золотой медалью имени В.В. Докучаева за серию работ “Почвенно-экологическое обеспечение адаптивно-ландшафтного земледелия и природопользования”.

Желаем юбиляру доброго здоровья и дальнейших творческих успехов!

*Почвенный институт им. В.В. Докучаева
Редакция журнала “Агрохимия”*